



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA PARA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO
DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA, POR MEDIO
DE CONTROLADORES DE LAZOS MÚLTIPLES**

Carlos René Ochoa Yumán

Asesorado por el Ing. Julio Edgar Castillo Rojas

Guatemala, abril de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO
DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA, POR MEDIO
DE CONTROLADORES DE LAZOS MÚLTIPLES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS RENÉ OCHOA YUMÁN

ASESORADO POR EL ING. JULIO EDGAR CASTILLO ROJAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruíz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Arturo Estrada Martínez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA PARA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA, POR MEDIO DE CONTROLADORES DE LAZOS MÚLTIPLES,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 17 de Febrero de 2006.



Carlos René Ochoa Yumán

Guatemala, 15 de Enero del 2008

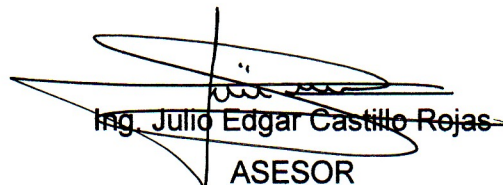
Ingeniero
Otto Fernando Andrino González
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero,

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **Propuesta para automatización del proceso de clarificación del jugo de caña por medio de controladores de lazos múltiples**, elaborado por el estudiante Carlos René Ochoa Yumán.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, por lo que le indico que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,


Ing. Julio Edgar Castillo Rojas
ASESOR



Guatemala, 10 de ABRIL 2008.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

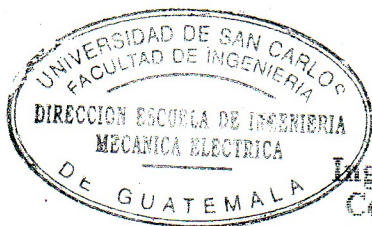
Señor Director:

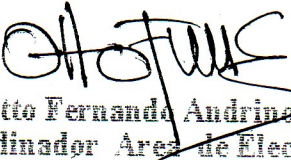
Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
Propuesta para automatización del proceso de clarificación del jugo de
caña por medio de controladores de lazos múltiples, del estudiante:
Carlos René Ochoa Yumán, por considerar que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS




Ing. Otto Fernando Andriano González
Coordinador Área de Electrotécnica

OFAG/sro



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: Carlos René Ochoa Yumán titulado: Propuesta para automatización del proceso de clarificación del jugo de caña por medio de controladores de lazos múltiples, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 15 DE ABRIL 2005.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA, POR MEDIO DE CONTROLADORES DE LAZOS MÚLTIPLES**, presentado por el estudiante universitario **Carlos René Ochoa Yumán**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, abril de 2008



/cc

c.c.

archivo.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme la fortaleza para llegar a este momento tan importante en mi vida, y por poner a tantas personas maravillosas en mi camino para poder volver este sueño una realidad.

Mis padres

Por darme todo el apoyo y recursos necesarios para poder estudiar mi carrera, pero por sobre todas las cosas por haber depositado su confianza en mí, y por haber sido un ejemplo en cada paso de mi vida para ayudar a convertirme en un hombre de bien, del cual puedan estar orgullosos.

Mi amada esposa

Por ayudarme a obtener la fortaleza para seguir adelante en los momentos difíciles de mi carrera, por compartir los buenos momentos conmigo, pero especialmente por siempre estar allí para escucharme cuando necesité una palabra de aliento o de motivación.

Mi hija

Por ser una hermosa inyección de motivación para ayudarme a finalizar mi carrera.

Mis hermanos

Por todo el apoyo que me brindaron en el transcurso de mi carrera.

Mis amigos

Por haberme ayudado en tantas etapas difíciles de mi carrera, pero sobre todo por regalarme su amistad de forma desinteresada.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Mis padres

Carlos René Ochoa González

Josefina de Jesús Yumán Santos

Mi esposa

Laura Melina Ponce Cruz

Mis hermanos

Carlos Raul Ochoa Yumán

Silvia Noemí Ochoa Yumán

Mi asesor

Julio Edgar Castillo Rojas

La Facultad de Ingeniería

Mis catedráticos

Mis amigos

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXVIII
OBJETIVOS	XXXI
INTRODUCCIÓN	XXXII
1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA EN INGENIOS AZUCAREROS	1
1.1 Objetivo de la clarificación del jugo de caña y los productos involucrados	1
1.1.1 Consideraciones primarias	1
1.1.2 Proceso de defecación	1
1.1.3 Sistemas de clarificación	2
1.2 Descripción de sistemas de clarificación	4
1.2.1 Circulación de la adición de la cal	4
1.2.2 Control del pH	4
1.2.3 Intervalos de temperatura	5
1.2.4 Función del fosfato y los floculantes en el proceso	5
1.3 Equipos y procedimientos especiales de clarificación	6
1.3.1 Antecedentes históricos	6
1.3.2 Funcionamiento de los clarificadores discontinuos y su evolución	7
1.3.3 Funcionamiento de los clarificadores continuos y su evolución	8
1.3.3 Proceso de sulfitación	13
1.3.3.1 Variaciones de los procedimientos	13
1.3.3.2 Sulfitación en frío	13

1.3.3.3	Sulfitación después de la alcalización	14
1.3.3.4	Sulfitación en caliente	14
1.3.3.5	Sulfitación continua	15
2.	SISTEMAS DE CONTROL UTILIZADOS EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE CAÑA	17
2.1	Control automático de adición de la cal	17
2.1.1	Aplicación de la cal como sacarato	17
2.1.2	Alcalización continua	18
2.1.3	Sistemas de control para la adición de la cal	18
2.1.4	Control del pH	19
2.2	Control automático del pH en el proceso de clarificación	20
2.2.1	Control automático de la alcalización por medio del pH	20
2.2.2	Disminución del pH durante la clarificación	21
2.2.3	Control manual con registradores del pH	22
2.2.4	Control automático del calentamiento	22
2.3	Dosificación de fosfato y los floculantes en el proceso	23
2.3.1	Parámetros a considerar para la dosificación del fosfato	23
2.3.2	Dosificación del floculante	23
3.	TEORÍA Y SELECCIÓN DE SENSORES Y ELEMENTOS FINALES DE CONTROL, UTILIZADOS EN LA AUTOMATIZACIÓN DE UN CLARIFICADOR	25
3.1	Medida de temperatura	25
3.1.1	Introducción	25
3.1.2	Tipos de termómetros	27
3.1.2.1	Termómetros de líquido	27
3.1.2.2	Termómetros de gas	28

3.1.3	Termómetros de dilatación	29
3.1.3.1	Termómetros de líquido en vidrio	29
3.1.3.2	Termómetro de Beckmann	29
3.1.3.3	Termómetro de cinta bimetálica	30
3.1.4	Termómetros de sistemas llenos	31
3.1.4.1	Termómetros llenos de gas	31
3.1.4.2	Termómetros de vapor a presión	33
3.1.5	Termómetros de líquido en dilatación	34
3.1.6	Termómetros magnéticos	36
3.1.7	Termómetros de resistencia	36
3.1.7.1	Detectores de temperatura de resistencia	37
3.1.8	Termopares	39
3.1.8.1	Funcionamiento	39
3.1.8.2	Linearización	41
3.1.8.3	Modalidades de termopares	42
3.1.8.4	Tipos de termopares	43
3.1.8.5	Códigos de colores de los termopares	44
3.1.9	Comparación y selección del tipo de sensor de temperatura adecuado para cada aplicación	46
3.2	Medidas de caudal	48
3.2.1	Medidores volumétricos	48
3.2.2	Instrumentos de presión diferencial	48
3.2.2.1	Tubo de Venturi	50
3.2.2.2	Placa de orificio	55
3.2.2.3	Boquilla o tobera de flujo	57
3.2.3	Medidores de área variable (rotámetros)	59
3.2.4	Medidores ultrasónicos	60
3.2.4.1	Medidores tipo Doppler	61
3.2.4.2	Medidores de tiempo de tránsito	62

3.2.5	Turbinas	63
3.2.5.1	Características del comportamiento	65
3.2.6	Medidores magnéticos	66
3.2.6.1	Principio de operación	66
3.2.7	Medidores de caudal másico	69
3.2.7.1	Medidores térmicos	69
3.2.7.2	Medidores de momento angular	70
3.2.7.3	Medidores por frecuencia natural de oscilación	70
3.2.7.4	Principios de operación	71
3.2.8	Comparación de características de los medidores de caudal	74
3.3	Medición de nivel	75
3.3.1	Introducción	75
3.3.2	Instrumentos de medida directa	75
3.3.2.1	Medidor de sonda	75
3.3.2.2	Medidor de cinta y plomada	76
3.3.2.3	Medidor de cristal	77
3.3.2.4	Medidor de flotador	78
3.3.3	Instrumentos basados en la presión hidrostática	79
3.3.3.1	Medidor manométrico	79
3.3.3.2	Medidor de membrana	80
3.3.3.3	Medidor de tipo burbujeo	80
3.3.3.4	Medidor de presión diferencial	81
3.3.4	Instrumentos basados en el desplazamiento	83
3.3.4.1	Medidor de nivel de tipo desplazamiento	83
3.3.5	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	85
3.3.5.1	El medidor de nivel conductivo o resistivo	85
3.3.5.2	Medidor de nivel capacitivo	86
3.3.5.3	Medidor de nivel ultrasónico	88
3.3.5.4	Sistema de medición de nivel radiactivo	89

3.4	Medición de variables químicas	91
3.4.1	Medición de la conductividad	91
3.4.1.1	Principio de medición de la conductividad	91
3.4.1.2	Constante de la celda	95
3.4.2	Medición del pH	98
3.4.2.1	El electrodo de vidrio	100
3.4.2.2	El electrodo de referencia	101
3.4.2.3	Electrodo de cloruro de plata	101
3.4.2.4	Salida de señal del electrodo	102
3.4.2.5	Compensación de temperatura	105
3.5	Elementos finales de control	106
3.5.1	Válvulas de control	106
3.5.1.1	Especificación de válvulas	109
3.5.1.2	Tipos de válvulas de control	109
3.5.2	Bombas dosificadoras	111
3.5.2.1	Bomba dosificadora electromagnética	111
3.5.2.2	Bomba dosificadora electromecánica	112
3.5.2.3	Bombas dosificadoras de gran potencia	117
4.	CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO Y CONTROLADORES DE LAZOS MÚLTIPLES	119
4.1	Sistemas de control electrónico y digital	119
4.1.1	Introducción	119
4.1.1.1	El principio de realimentación	120
4.1.2	Control todo o nada (ON - OFF)	121
4.1.3	Control proporcional de tiempo variable	122
4.1.4	Control proporcional	123
4.1.5	Control Integral	128
4.1.6	Control derivativo	131

4.1.7	Control PID	133
4.1.7.1	Ajuste de los parámetros PID	134
4.2	Tipos de controladores y selección del sistema de control	135
4.2.1	Controladores digitales	135
4.2.1.1	Introducción	135
4.2.1.2	Características del control digital	135
4.2.2	Controladores de lazos múltiples	137
4.2.2.1	Elementos de <i>hardware</i>	137
4.2.2.2	Elementos de <i>software</i> :	141
4.2.3	Selección del sistema de control adecuado para el proceso	144
4.2.4	Criterios de estabilidad en el control	147
4.2.5	Métodos de ajuste de controladores	149
4.2.5.1	Métodos clásicos de ajuste de Ziegler and Nichols	149
4.2.5.2	Método de oscilación	149
4.2.5.3	Método basado en la curva de reacción	151
4.2.6	Interfaces humano máquina (HMI)	153
4.2.6.1	Tipos de HMI	154
4.2.6.2	Funciones de un <i>software</i> HMI	155
4.2.6.3	Tareas de un <i>software</i> de supervisión y control	156
4.2.6.4	Tipos de <i>software</i> de supervisión y control para PC	156
4.2.6.5	Cómo facilitan las tareas de diseño los paquetes orientados HMI/SCADA	157
5.	PROPUESTA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UN CLARIFICADOR DE JUGO DE CAÑA	161
5.1	Descripción de la propuesta para la automatización del proceso de clarificación de jugo de caña	161
5.2	Lazos de control	161
5.2.1	Lazo de control del flujo de jugo de caña	161

5.2.2	Lazo de control de calentamiento de jugo de caña.	163
5.2.3	Lazo de control para dosificación de ácido fosfórico.	163
5.2.4	Lazo de control de pH.	164
5.2.5	Lazo de control para dosificación del floculante (aniónico).	165
5.2.6	Función para cambio en la dosificación en función de las ppm requeridas por el proceso	166
5.3	Equipo de control y visualización propuesto	167
5.3.1	Controlador MOD30ML	168
5.3.1.1	Descripción	168
5.3.1.2	Funcionalidad	169
5.3.1.3	Bloques de control disponibles	169
5.3.1.4	Plataforma de <i>hardware</i>	173
5.3.1.5	Entradas y salidas de proceso	174
5.3.1.6	<i>Display</i> del operador	175
5.3.1.7	Comunicaciones	178
5.3.1.8	Configuración	178
5.3.2	Diseño del sistema de visualización e interacción del sistema	180
5.3.2.1	<i>Software</i> Micro PWC	181
5.3.2.2	Arquitectura de la aplicación	182
6.	DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS Y ALGORITMOS DE CONTROL, NECESARIOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL CLARIFICADOR DE JUGO DE CAÑA	185
6.1	Funcionamiento de las estrategias	185
6.1.1	Descripción de bloques utilizados en la programación de las estrategias de control	186
6.1.2	Control del flujo de jugo de caña	194
6.1.2.1	Descripción del programa de control de flujo de jugo de caña	190

6.1.3	Control de temperatura del jugo de caña	199
6.1.3.1	Descripción del programa de control de temperatura	201
6.1.4	Control de dosificación de ácido fosfórico	203
6.1.4.1	Descripción del programa de control de dosificación de ácido fosfórico	205
6.1.5	Control de dosificación de floculante (aniónico)	206
6.1.5.1	Descripción del programa de control de dosificación de floculante	208
6.1.6	Control del pH	209
6.1.6.1	Descripción del programa de control de pH	211
6.2	Diagramas de conexionado de las señales de control y monitoreo	213
	CONCLUSIONES	223
	RECOMENDACIONES	225
	BIBLIOGRAFÍA	227

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Partes de un cono Callow	9
2.	Sistema de raspadores del clarificador Dorr	10
3.	Sistema de dosificación automática del Ph	21
4.	Técnica de medición de dos hilos	38
5.	Técnica de medición de cuatro hilos	39
6.	Diagrama de termocopla tipo K	40
7.	Moderno termopar	42
8.	Código de colores según Norma ASTM de Estados Unidos	44
9.	Código de colores según Norma BS 1843: 1952 de Inglaterra	45
10.	Código de colores según Norma BS 4937: 1993 de Inglaterra	45
11.	Código de colores según Norma DIN de Alemania	46
12.	Principio de medición de flujo por presión diferencial	48
13.	Tubo Venturi	50
14.	Medición en un Venturi	52
15.	Curva del coeficiente de descarga Cd	53
16.	Comparación de diferentes dispositivos de presión diferencial	54
17.	Distintos tipos de placas de orificio	56
18.	Boquilla o tobera de flujo	57
19.	Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador	59
20.	Medidor de flujo ultrasónico para montaje en tubería	61

21.	Cabezal individual transmisor/receptor de un medidor tipo Doppler	62
22.	Funcionamiento de medidor de flujo de tiempo de tránsito	63
23.	Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos	64
24.	Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos	65
25.	Principio de medición de medidores de flujo electromagnéticos	68
26.	Principios de operación de los medidores de flujo másico	72
27.	Tubo de flujo en vibración	72
28.	Medidor de sonda	76
29.	Medidores de nivel de cristal	77
30.	Diferentes aplicaciones para medidores de nivel por flotador	79
31.	Medidor de tipo burbujeo	81
32.	Medidores de nivel por presión diferencial	82
33.	Medidor de nivel por desplazamiento	84
34.	Funcionamiento de medidor de nivel conductivo o resistivo	86
35.	Medidor de nivel capacitivo	87
36.	Medidor de nivel ultrasónico	89
37.	Sistema de medición de nivel por radiación	90
38.	Solución acuosa conduciendo	92
39.	Unidad de medición de conductividad	94
40.	Restricción en la resistencia debida al cable de conexión de la celda	95
41.	Representación de una celda de conductividad con una constante (K) de 1.0	97
42.	Sistema básico de medición del pH,	100
43.	Electrodo de referencia de cloruro de plata	102
44.	Potenciales generados en el electrodo de pH	103
45.	Efectos de la temperatura en la pendiente del electrodo de vidrio	105
46.	Errores causados por cambios en la temperatura	106

47.	Corte de una válvula de control con sus partes	107
48.	Diagrama de bloques de representación de válvula de control	108
49.	Componentes de bomba dosificadora electromagnética	112
50.	Componentes de bomba dosificadora electromecánica	113
51.	Principio de funcionamiento de la excéntrica de una bomba dosificadora	114
52.	Funcionamiento de bombas dosificadoras de gran capacidad	117
53.	Diagrama de bloques del sistema de control de un proceso	120
54.	(A) Característica de un controlador ON – OFF ideal y modificaciones con (B) zona muerta y (C) histéresis	122
55.	Control proporcional de tiempo variable	123
56.	Control proporcional	124
57.	Acción proporcional	125
58.	Respuesta de lazo cerrado	127
59.	Acción Integral	128
60.	Acción proporcional más integral	129
61.	Acción derivativa	131
62.	Acción proporcional más derivativa	132
63.	Respuesta de un control PID	134
64.	Lazo típico de control digital	137
65.	Arquitectura de controlador multilazo PID	138
66.	Estructura detallada de un controlador PID	139
67.	Multiplexado de entradas y desmultiplexado de salidas en un controlador PID	140
68.	Estructura de filtro RC en un controlador PID	144
69.	Acciones PID	144
70.	Respuesta al escalón de la planta	152
71.	Arquitectura de las HMI	154
72.	Estructura general del <i>software</i> HMI	158

73.	Bloques en estructura de cadenas para procesar una señal	160
74.	Controlador multilazo MOD30ML	168
75.	Plataforma de <i>hardware</i> de controlador multilazo MOD30ML	173
76.	Pantalla frontal del controlador	177
77.	<i>Software</i> de configuración ViZapp, para controladores multilazo MOD30ML	179
78.	<i>Software</i> HMI Micro PWC <i>Personal Work Center</i> PW6000	180
79.	Arquitectura de conexionado de HMI con controladores MOD30ML	183
80.	Vista general del programa de control de flujo y temperatura, en el software <i>Visual Application Designer</i>	185
81.	Vista general del programa de los controles de dosificación, en el software <i>Visual Application Designer</i>	186
82.	Diagrama de lazo de retroalimentación del control de flujo, según la simbología SAMA	196
83.	Diagrama de lazo de control de flujo, según normas ISA	197
84.	Programación de lazo de control de flujo de jugo de caña	198
85.	Diagrama de lazo de retroalimentación del control de temperatura, según la simbología SAMA	200
86.	Diagrama de lazo de control de temperatura según normas ISA	200
87.	Programación de lazo de control de temperatura de clarificación	201
88.	Diagrama de lazo de retroalimentación del control de dosificación de ácido fosfórico, según la simbología SAMA	203
89.	Diagrama de lazo de control de dosificación de ácido fosfórico, según normas ISA	204
90.	Programación de lazo de control de dosificación de ácido fosfórico	204
91.	Diagrama de lazo de retroalimentación del control de dosificación de floculante, según la simbología SAMA	206

92.	Diagrama de lazo de control de dosificación de floculante , según normas ISA	207
93.	Programación de lazo de control de dosificación de floculante	207
94.	Diagrama de lazo de retroalimentación del control de pH, según la simbología SAMA	209
95.	Diagrama de lazo de control de pH, según normas ISA	210
96.	Programación de lazo de control de pH	210

TABLAS

I.	Comparación de sensores de temperatura	47
II.	Comparación de distintos sensores de flujo	74
III.	Constante de las celdas y conductividad	97
IV.	Características de los principales tipos de válvulas de control	110
V.	Guía de selección de un sistema de control	146
VI.	Parámetros de ajuste (método de oscilación)	150
VII.	Parámetros de ajuste (método de curva de reacción)	153
VIII.	Distribución de señales en controladores multilazo MOD30ML	167
IX.	Relación entre nivel del tanque pulmón y flujo de descarga	195

GLOSARIO

Alcalinidad	La basicidad o alcalinidad, es la capacidad ácido neutralizante de una sustancia química en solución acuosa. Esta alcalinidad de una sustancia se expresa en equivalentes de base por litro o en su equivalente de carbonato cálcico.
Algebra de Boole	(también llamada Retículas booleanas). En informática y matemática, son estructuras algebraicas que "capturan la esencia" de las operaciones lógicas Y, O y NO, así como el conjunto de operaciones unión, intersección y complemento.
Batch	Se denomina de esta forma a aquellos procesos que son realizados en lotes o por etapas.
Bias	Es la diferencia entre las expectativas de un estimador y el valor real del parámetro siendo estimado.

Cárter En una máquina, envoltura protectora de algunos engranajes y piezas que a veces sirve como depósito de lubricante.

Clarificación Procedimiento de eliminación de determinadas partículas que existen en el jugo de caña, tanto en solución como en suspensión y que lo afectan tanto en la transparencia como en la limpidez.

Cv Representa la capacidad de flujo o la "capacidad de conducción" de la válvula de cierto fluido. Por definición, es el número de galones por minuto de agua a 15°C, que pasa a través de una válvula con una diferencial de presión entre la presión de entrada y la presión de salida de la válvula de 1 psi.

DCS (*Distributed Control System*). Es un proceso de control que utiliza computadoras distribuidas a lo largo de la línea de fabricación para lograr un control más íntegro de la calidad.

DDE (*Dynamic Data Exchange*). Es una tecnología de comunicación entre varias aplicaciones bajo Microsoft *Windows* y en OS/2. Aunque es apto para las últimas versiones de *Windows*, ha sido reemplazado por su mucho más poderoso sucesor *Object Linking and Embedding, COM* y *OLE Automation*. Sin embargo, todavía se usa en varios sitios dentro de *Windows*, por ejemplo en la asociación de archivos.

Defecación Coagulación de las sustancias en suspensión contenidas en un jugo natural, a fin de obtener un líquido claro. En la industria azucarera, con este término se indica el proceso de depuración del azúcar calcificando y carbonatando el sumo de caña o de remolacha y dejándolo sedimentar.

Diagrama de Nyquist Es una traza polar de la respuesta en frecuencia de un sistema que se quiere analizar.

Driver

Es un programa informático que permite al sistema operativo interactuar con un periférico, haciendo una abstracción del *hardware* y proporcionando una interfaz -posiblemente estandarizada- para usarlo. Se puede esquematizar como un manual de instrucciones que le indica cómo debe controlar y comunicarse con un dispositivo en particular. Por tanto, es una pieza esencial, sin la cual no se podría usar el *hardware*.

Efecto Doppler

Llamado así por Christian Andreas Doppler, consiste en la variación de la longitud de onda de cualquier tipo de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento.

Electrolitos

Son soluciones de sales en agua, que dan lugar a la formación de iones y que permiten que la energía eléctrica pase a través de ellos.

Firmware

Es un bloque de instrucciones de programa para propósitos específicos, grabado en una memoria tipo *ROM*, que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo.

Flujo incompresible Se denomina a todo aquel fluido en el cual las propiedades termodinámicas del mismo, no afectan de manera apreciable su movimiento.

Flujo másico Es el flujo de masa que pasa a través de un área de sección transversal, en un intervalo de tiempo definido.

Grado Baumé Equivale a un 1% de cloruro de sodio en agua. Es decir, una solución de cloruro sódico de 15° Be, es una disolución de cloruro de sodio al 15% (15g de NaCl y 85g de agua).

Handheld Del lenguaje Inglés que significa llevar en la mano. Su nombre completo es *Handheld Computer* o *Handheld device*, y describe a un ordenador portátil para diversas aplicaciones, que puede ser llevado a cualquier parte mientras se utiliza.

Hastelloy

Es el nombre de la marca registrada por Haynes *International, Inc.* La marca está aplicada como el prefijo de un rango de más de veinte diferentes aleaciones metálicas, altamente resistentes a la corrosión, comúnmente agrupados por la industria metalúrgica bajo el término de “superaleaciones” o “aleaciones de alto desempeño”.

Histéresis

Es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado. Se pueden encontrar diferentes manifestaciones de este fenómeno.

Invar

También llamado FeNi36, Elinvar o Nivarox, es una aleación de hierro (64%) y níquel (36%) con muy poco carbono y algo de cromo.

Jumper

Elemento para interconectar dos terminales de manera temporal, sin tener que efectuar una operación que requiera herramienta adicional, dicha unión de terminales cierra el circuito eléctrico del que forma parte.

RAM

Se compone de uno o más chips, y se utiliza como memoria de trabajo para programas y datos. Es un tipo de memoria temporal, que pierde sus datos cuando se queda sin energía (por ejemplo, al apagar el ordenador).

ROM

Es la sigla de *read-only memory*, que significa "memoria de sólo lectura". Es una memoria de semiconductor, destinada a ser leída y no destructible, es decir, que no se puede escribir sobre ella y que conserva intacta la información almacenada, incluso en el caso de que se interrumpa la corriente (memoria no volátil). La *ROM* suele almacenar la configuración del sistema, o el programa de arranque de la computadora.

Modbus

Es un protocolo de comunicaciones situado en el nivel 7 del Modelo OSI, basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, diseñado en 1979 por Modicon para su gama de controladores lógicos programables (PLCs). Fue convertido en un protocolo de comunicaciones estándar, de hecho en la industria es el que goza de mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales.

Monel	Es el nombre que se asigna a las aleaciones comerciales con razones níquel-cobre de aproximadamente 2:1 de peso. El Monel es más duro que el cobre y extremadamente resistente a la corrosión.
Multiplexor	En el campo de las telecomunicaciones, se utiliza como dispositivo que puede recibir varias entradas y transmitir las por un medio de transmisión compartido. Para ello, lo que hace es dividir el medio de transmisión en múltiples canales, para que varios nodos puedan comunicarse al mismo tiempo. Una señal que está multiplexada debe demultiplexarse en el otro extremo.
Nefelómetro	Es un instrumento para medir partículas suspendidas en un líquido. Esto lo hace empleando una fotocelda colocada en un ángulo de 90° con respecto a una fuente luminosa. La densidad de partículas es entonces una función de la luz reflejada por las partículas a la fotocelda.
Número de Reynolds	Es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

- OPC** (*OLE for Process Control*) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos. Este estándar permite que diferentes fuentes, envíen datos a un mismo servidor *OPC*, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con *drivers* para dialogar con múltiples fuentes de datos, ya que basta que tengan un *driver OPC*.
- Péndulo de Foucault** Es un péndulo largo, que puede oscilar libremente en cualquier plano vertical, y es capaz de oscilar durante horas. Se utiliza para demostrar la rotación de la Tierra, y la fuerza de Coriolis. Se llama así en honor de su inventor, León Foucault.
- Pol** Término utilizado comúnmente en la industria azucarera para denotar la cantidad de azúcar que no se logra extraer de la caña y que queda en el bagazo.

Poli electrolitos

Son, en química, cualquier molécula que presente varias cargas eléctricas descompensadas. Los poli electrolitos se diferencian de los iones comunes (o electrolitos) en que presentan simultáneamente ambos signos de carga, positivo y negativo. Estas cargas se encuentran fijas en distintas posiciones moleculares, por lo que no pueden anularse mutuamente.

Rayos gamma

Es un tipo de radiación electromagnética, producida generalmente por elementos radiactivos o procesos subatómicos, como la aniquilación de un par positrón-electrón. Este tipo de radiación de tal magnitud, también es producida en fenómenos astrofísicos de gran violencia. Debido a las altas energías que poseen, los rayos gamma constituyen un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta.

Rayos X

Designan a una radiación descubierta por Wilhelm Röntgen a finales del siglo XIX, invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos y de impresionar las películas fotográficas. La longitud de onda está entre 10 a 0,1 nanómetros, correspondiendo a frecuencias en el rango de 30 a 3.000 GHz.

Setpoint Es el valor objetivo al que un sistema de control automático, por ejemplo un controlador PID, tratará de llegar. Por ejemplo, un sistema de control de caldera podrá tener un *setpoint* de temperatura, que es la temperatura que el sistema de control buscará mantener.

Span Es la diferencia entre el valor superior e inferior del campo de medida.

Sulfitación Introducción de solución sulfurosa en un jugo, como parte del proceso de clarificación

Tags En sentido informático, es un conjunto de juegos informáticos interactivos que se añaden a un elemento de los datos para identificarlo

Tamizado Es un mecanismo de filtración de aire en el que las partículas de un diámetro superior a la distancia libre entre dos fibras no pueden pasar. La partícula es retenida y no puede ir más lejos en la media filtrante. El tamizado es un mecanismo que detiene las partículas gruesas

Tantalio

Es un elemento químico de número atómico 73 que se sitúa en el grupo 5 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Ta. Se trata de un metal de transición, raro, azul grisáceo, duro, presenta brillo metálico y resiste muy bien la corrosión. Se encuentra en el mineral tantalita.

Titulación

Es un proceso cuantitativo que se basa en la medición de la cantidad de un reactivo de concentración conocida (solución patrón) que se consume por un analito (sustancia a la que se le quiere averiguar la concentración). Una titulación ácido-base es una titulación de neutralización donde se mide el ácido o la base por medio de una reacción y un indicador de color.

Tubo Bourdon

Es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón. La ley de deformación del tubo Bourdon es bastante compleja y ha sido determinada empíricamente a través de numerosas observaciones y ensayos en varios tubos. El material empleado normalmente en el tubo Bourdon es de acero inoxidable, aleación de

cobre o aleaciones especiales como Hastelloy y Monel.

Vena contracta

Sección transversal mínima de un chorro o fluido que sale de un orificio o rebosa por un vertedero.

Zona muerta

Es el máximo campo de variación de la variable en el proceso real, para el cual el instrumento no registra ninguna variación en su indicación, registro o control.

RESUMEN

El control automático de procesos es parte del progreso industrial desarrollado durante lo que ahora se conoce como la segunda revolución industrial. El uso intensivo de la ciencia de control automático es producto de una evolución que es consecuencia del uso difundido de las técnicas de medición y control. Su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas.

El control automático de procesos se usa fundamentalmente porque reduce el costo de los procesos industriales, lo que compensa con creces la inversión en equipo de control. Además, hay muchas ganancias intangibles, como por ejemplo la eliminación de mano de obra pasiva, la cual provoca una demanda equivalente de trabajo especializado. La eliminación de errores es otra contribución positiva del uso del control automático.

El principio del control automático o sea el empleo de una realimentación o medición para accionar un mecanismo de control, es muy simple. El mismo principio del control automático se usa en diversos campos, como control de procesos químicos y del petróleo, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas herramientas, y en el control y trayectoria de un proyectil.

El uso de las computadoras analógicas y digitales ha posibilitado la aplicación de ideas de control automático a sistemas físicos que hace apenas pocos años eran imposibles de analizar o controlar.

Es necesaria la comprensión del principio del control automático en la ingeniería moderna, por ser su uso tan común como el uso de los principios de

electricidad o termodinámica, siendo por lo tanto, una parte de primordial importancia dentro de la esfera del conocimiento de ingeniería. También son tema de estudio los aparatos para control automático, los cuales emplean el principio de realimentación para mejorar su funcionamiento.

En los ingenios, la calidad del azúcar está asociada directamente a la eficiencia del proceso de clarificación del jugo de caña. La falta de un tratamiento eficaz en este proceso, se traduce en un azúcar de menor calidad, con incidencia más grande de color, impurezas y puntos negros. Los sistemas de clarificación de jugo de caña existentes en la mayoría de los ingenios, funcionan con tecnologías y procedimientos de operación obsoletos, que no garantizan la buena calidad de la meladura en etapas posteriores.

El principal objetivo de la clarificación es eliminar la máxima cantidad de impurezas del jugo en la etapa más temprana del proceso, que permitan las otras consideraciones del mismo, tales como la claridad y reacción del jugo claro. En la fabricación de azúcar cruda, la cal y el calor son prácticamente los únicos agentes que se utilizan con este fin, aunque generalmente se añade una pequeña cantidad de fosfato soluble. La fabricación de azúcares para consumo directo (es decir, azúcar blanca, “granulado de plantación”, “azúcar morena”, o cualquier otro tipo de azúcar no refinada que se destina al consumo) requiere el uso de otras sustancias químicas además de la cal.

Buscando solucionar este problema, se propone la automatización del proceso mencionado por medio de elementos de campo, controladores de lazos múltiples y elementos finales de control para buscar lograr mejorar la eficiencia del sistema de clarificación. Así, con un proceso controlado sumado a una metodología de proceso adecuada, se podría lograr una operación más estable y consistente, traduciéndose en mayor capacidad de procesamiento, mejor calidad y menor costo en insumos químicos y energéticos.

OBJETIVOS

- **General**

Elaborar una propuesta factible para la automatización del proceso de clarificación del jugo de caña en los ingenios azucareros, por medio de controladores de lazos múltiples, instrumentos de campo y elementos finales de control.

- **Específicos**

1. Presentar en forma concisa los fundamentos teóricos en que se basa el proceso de la clarificación del jugo de caña, en los ingenios azucareros.
2. Conocer los principios básicos en que se basa el funcionamiento de los instrumentos de campo, y elementos de control final que se proponen utilizar para la automatización del proceso de clarificación de jugo de caña.
3. Estudiar el funcionamiento básico de los controladores de lazos múltiples, haciendo énfasis en los diferentes tipos de algoritmos de control necesarios para realizar el objetivo deseado.
4. Presentar una descripción detallada de la propuesta para la automatización de cada etapa del proceso, así como los elementos necesarios para su realización.

INTRODUCCIÓN

La automatización industrial ha venido, durante los últimos años, a mejorar los procesos productivos y la eficiencia de los mismos, ya que de una forma indirecta ayuda a eliminar parte de los errores humanos, al delegar la responsabilidad de manipular los elementos finales de control, a un instrumento o mecanismo autónomo que responde a instrucciones definidas, con lo cual se puede garantizar que las variables de proceso se mantendrán en los valores necesarios para la correcta operación del mismo.

El proceso de fabricación del azúcar involucra muchas etapas, de las cuales depende la calidad del producto final. De las etapas mencionadas, una de las más importantes es la de la clarificación del jugo de caña, ya que de ésta dependerán las características de color, consistencia, turbidez, y otras de la meladura en etapas posteriores. Actualmente, en muchos ingenios azucareros, el proceso de clarificación se controla de forma manual, dependiendo su efectividad de la habilidad y experiencia del operador, lo cual vuelve el proceso aleatorio, ya que cada operador tiene una forma distinta de controlar.

El principal objetivo de la clarificación en el proceso de la fabricación del azúcar, es el de eliminar la máxima cantidad de impurezas en el jugo en la etapa más temprana del proceso, que permitan las otras consideraciones del mismo, tales como la claridad y la reacción del jugo claro. En la fabricación del azúcar crudo, la cal y el calor son casi los únicos agentes que se utilizan con este fin, aunque generalmente se adhieren otros componentes tales como el fosfato soluble.

Desde hace mucho tiempo, se conoce el proceso de clarificación del jugo de caña por diversos métodos, los cuales para ser eficientes dependen en gran medida de la habilidad y experiencia de los operadores que se encargan de esta tarea.

Al diseñar un sistema de automatización adecuado para el proceso antes descrito, se pueden considerar las diferentes variaciones que se requieran en el proceso, ya que la dosificación de los diferentes químicos involucrados y parámetros como los tiempos de elevación de temperatura y otros dependen en gran medida de las condiciones atmosféricas, tipo de caña, impurezas en la cosecha, etcétera. Estos cambios en el proceso, pueden ser aplicados con simplemente presionar una tecla o escoger una receta dentro del controlador, mientras que para poder realizar el proceso manualmente, se requiere de una gran experiencia y habilidad por parte del operador y de las personas encargadas de realizar las pruebas de calidad de la meladura.

En el presente trabajo se pretenden estudiar los puntos más importantes que se deben considerar para la automatización del proceso de clarificación del jugo de caña, empezando por las bases teóricas en que se fundamenta el proceso para su ejecución; la teoría sobre la selección y funcionamiento de los elementos para sensor las variables del proceso, los elementos finales de control y los controladores considerados para la propuesta, hasta llegar a las estrategias de control requeridas para llevar a cabo el objetivo deseado.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL JUGO DE CAÑA EN INGENIOS AZUCAREROS

1.1 Objetivo de la clarificación del jugo de caña y los productos involucrados

1.1.1 Consideraciones primarias

El principal objetivo de la clarificación es eliminar la máxima cantidad de impurezas del jugo en la etapa más temprana del proceso, que permitan las otras consideraciones del mismo, tales como la claridad y reacción del jugo claro. En la fabricación de azúcar cruda, la cal y el calor son prácticamente los únicos agentes que se utilizan con este fin, aunque generalmente se añade una pequeña cantidad de fosfato soluble. La fabricación de azúcares para consumo directo (es decir, azúcar blanca, “granulado de plantación”, “azúcar morena”, o cualquier otro tipo de azúcar no refinada que se destina al consumo), requiere el uso de otras sustancias químicas además de la cal.

1.1.2 Proceso de defecación

La clarificación con cal y calor, conocida como proceso de defecación simple, es el método más antiguo para purificar el jugo y en muchos sentidos el más efectivo. El procedimiento varía ampliamente en las diferentes localidades y en las diferentes condiciones.

Por lo general, se añade la cal suficiente para neutralizar los ácidos orgánicos que contiene el jugo, y después se eleva la temperatura a 95 °C (200 °F) o más. Este tratamiento con cal y calor forma un precipitado denso de composición compleja, en parte más ligero y en parte más denso que el jugo, que contiene sales insolubles de calcio, albúmina coagulada y proporciones variables de ceras, grasas y gomas. El precipitado por floculación arrastra consigo la mayor parte del material fino que está en suspensión en el jugo y que no ha sido extraído por el tamizado mecánico. La separación del precipitado del jugo que lo rodea se efectúa casi universalmente mediante la sedimentación y la decantación. Los diferentes tipos de defecadores y clarificadores están diseñados para llevar a cabo esta separación tan completa y rápidamente como sea posible.

El grado de clarificación que se logra tiene un efecto importante sobre los siguientes departamentos de la fábrica dentro del ingenio azucarero: afecta la ebullición en los tachos, el centrifugado, la calidad de los productos y, lo que es más importante, el rendimiento del azúcar crudo. La velocidad de filtración y la facilidad de elaboración del azúcar en la refinería también resultan afectadas en grado notable por las cualidades del azúcar crudo atribuibles a la clarificación.

1.1.3 Sistemas de clarificación

El proceso de clarificación, sólo con cal y calor, era antiguamente uniforme en todo el mundo, pero se han efectuado muchas modificaciones, no sólo por la importancia que se da actualmente al logro de una clarificación más eficiente, sino también por la necesidad de dar tratamiento especial a los jugos refractarios o difíciles de tratar que producen ciertas variedades de caña.

Las etapas del proceso y las modificaciones o variantes de cada una son las siguientes:

1. Método de añadir la cal: como lechada, en forma discontinua o continua; como sacarato.
2. Regulación de la cantidad de cal: pruebas periódicas; registro continuo del pH; alimentación automática mediante el control del pH.
3. Momento en que se añade la cal: antes de calentar el jugo; "alcalización demorada" (aumento del tiempo de reacción antes de calentar); después de calentar; en fracciones, antes y después de calentar.
4. Temperaturas: ebullición, sobrecalentamiento; calefacción en dos etapas.
5. Tratamiento de los jugos procedentes de diferentes molinos; clarificación simple; clarificación compuesta y clarificación separada.
6. Método de decantación: decantadores abiertos; decantadores continuos y cerrados.
7. El tratamiento de espumas: filtración simple; filtración doble; retorno a los molinos; redefecación por separado, o con jugos diluidos, como en la clarificación compuesta.

Resulta evidente que la combinación de las anteriores modificaciones hace posible una gran variedad de procedimientos. El procedimiento ya bastante generalizado de añadir algún tipo de fosfato soluble, generalmente al jugo crudo pero a menudo en una etapa posterior, y la innovación más reciente que consiste en el uso de poli electrólitos como agentes floculadores han complicado todavía más los procesos de defecación. La sulfitación, que también se emplea en cierta medida en la elaboración de crudos, se emplea de manera más general como un procedimiento para la producción de azúcar blanco.

1.2 Descripción de sistemas de clarificación

1.2.1 Circulación de la adición de la cal

La mayoría de las instalaciones modernas poseen sistemas de circulación de la cal, que consisten esencialmente en dos tanques para mezclar la cal equipados con agitadores y en los cuales puede mezclarse la cal con el agua a la densidad deseada, la que suele ser de 15 Baumé (148 g de CaO por la densidad de 1 litro, 1.116 g/ml). Sin embargo, sucede con frecuencia que el contenido de cal es menor, especialmente cuando se emplea la alcalización automática. Se puede utilizar cal viva en trozos, cal hidratada pulverizada, o cal viva en polvo, la que resulte más conveniente desde el punto de vista económico. La lechada de cal así preparada se bombea por el sistema de circulación a aquellos lugares de la fábrica donde sea necesaria. Se llena uno de los tanques mezcladores, y en él se apaga la cal, mientras se vacía el otro. Para apagar la cal y diluirla se deben utilizar condensados del tercero y cuarto vaso del evaporador. Los efectos de estas precauciones sobre la calidad de la lechada pueden ser tan grandes como los de la calidad de la cal original.

1.2.2 Control del pH

El pH óptimo al que se debe llevar el jugo mediante la alcalización depende de muchas condiciones y varía según la localización de la fábrica, la variedad y madurez de la caña, la capacidad del equipo de decantación y otras condiciones locales.

En general, resulta deseable agregar el mínimo de cal que produzca un jugo claro con una reacción final cercana a un pH de 7.0. En las áreas donde la caña no está completamente madura al cosecharse, los ácidos orgánicos del jugo mantienen el pH por debajo de 7.0 en el jugo claro. Si el pH de los jugos claros llega a 7.0 puede haber una adición excesiva de cal.

1.2.3 Intervalos de temperatura

La temperatura final a la que se calientan los jugos en la clarificación varía entre 194 y 238 °F (90 – 115 °C), a pesar de que el procedimiento más común consiste en calentar el jugo hasta un punto ligeramente superior a la ebullición.

Por lo general, se piensa que el sobrecalentamiento no resulta ventajoso y que las temperaturas ligeramente superiores a la ebullición, por ejemplo, 218 °F (130 °C) son las máximas admisibles para una buena práctica.

1.2.4 Función del fosfato y los floculantes en el proceso

Las pruebas acumuladas indican que el contenido de fosfato en el jugo es el factor más importante para una clarificación eficiente. En la caña de azúcar, los fosfatos son de naturaleza inorgánica y orgánica. Los fosfatos inorgánicos existen como iones de fosfato libres, mientras que los fosfatos orgánicos existen en formas variadas.

Es comprensible que sólo los iones de fosfato libres tomen parte en la clarificación del jugo. Por lo tanto, los jugos con una cantidad adecuada de fosfatos inorgánicos son los más deseables.

Las pruebas sugieren que la cantidad de fosfato inorgánico que se deja en el jugo clarificado no debe ser menor de 10 ppm; ya que de otra forma, existe el riesgo considerable de que el jugo se alcalice en exceso, condición acompañada de un alto contenido de no azúcares en el jugo clarificado, mayores número de sales de calcio y azúcares crudos resultantes de baja calidad.

Varios polímeros sintéticos solubles en agua con diversos nombres comerciales se han incorporado al uso general en los ingenios. La acción de estos poli electrólitos es la de producir la floculación secundaria. Por lo general, un buen floculador mejora la floculación, aumenta la velocidad de decantación, reduce el volumen de cachaza, disminuye la Pol en la torta, y lo que es más importante, aumenta la transparencia del jugo clarificado.

1.3 Equipos y procedimientos especiales de clarificación

1.3.1 Antecedentes históricos

Se acepta que el hombre primitivo utilizó el principio básico de clarificación al tratar el agua turbia que usaría diariamente al dejarla reposar en una cueva sobre la tierra. Él se dio cuenta que el agua tratada de este modo se separaba en dos productos distintos, siendo ellos: una superficie de agua clara potable y el fango que se depositaba en el fondo.

En el siglo XVI, se descubrió que las operaciones de espesamiento y clarificación se habían vuelto una unidad importante en la explotación de minerales de cobre en las montañas. Los obreros tuvieron alimentación y rebalse continuos, pero la descarga del lodo era discontinúa.

En general, los métodos usados por aquella época eran una pequeña mejora de aquellos logrados por el hombre primitivo.

Esta unidad de tipo “por tandas” de separación continuaría siendo usada hasta finales del siglo XIX hasta que se encontraron métodos más eficientes para lograr la clarificación.

1.3.2 Funcionamiento de los clarificadores discontinuos y su evolución

Los sedimentadores intermitentes eran de diferentes formas y tamaños dependiendo del proceso, sin embargo predominaban los tipos rectangulares y cilíndricos. Se colocó después un medio conveniente para remover el sedimento del fondo del tanque. El líquido clarificado se retiraba por medio de un sifón de salida movable o por conexiones de desalojo colocadas a varias profundidades en los lados de los sedimentadores.

En general, la operación de tal unidad consiste en llenarlo con la solución que debe ser clarificada y, después permitiéndole alcanzar un estado de reposo hasta que haya transcurrido el tiempo necesario para que el asentamiento de sólidos se efectúe.

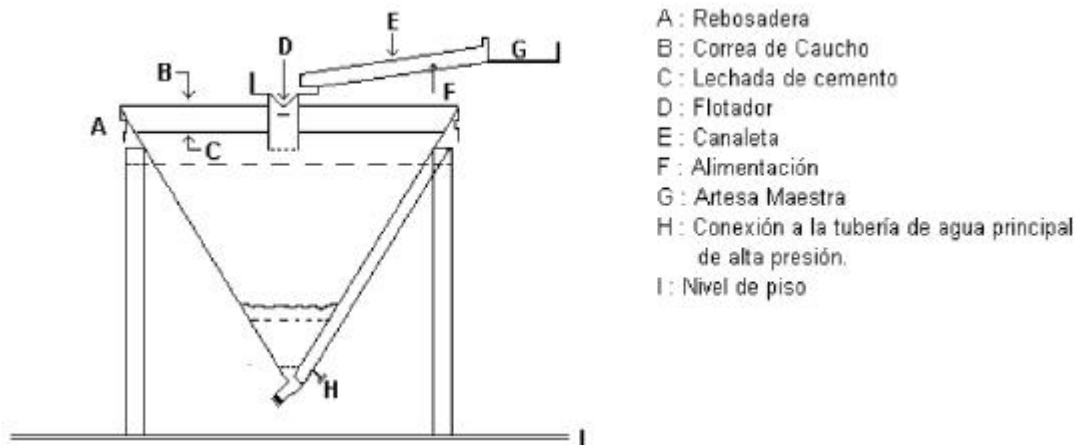
La capa superior de la solución clarificada puede removerse hasta la capa intermedia entre la parte clarificada y los lodos. La decantación se detiene y el lodo se desaloja. El ciclo se repite cuantas veces sea necesario. Varios tanques de asentamiento intermitente se operan conjuntamente, dando como resultado llenados y descargas simultáneas que originan una clarificación más rápida.

1.3.3 Funcionamiento de los clarificadores continuos y su evolución

El depósito continuo “no mecánico” y el cono de asentamiento evolucionaron antes del siglo XX. Estos se utilizaron antes del proceso de cianuración del proceso de obtención del oro en Sudáfrica, Australia y Estados Unidos, ya que permitía una operación continua porque el depósito fue equipado para tener un rebalse continuo del líquido clarificado y una descarga continua de los lodos del fondo. Los conos de asentamiento patentados por Allen y Callow son ejemplos de esta categoría .

Para ilustrar el proceso descrito anteriormente se utilizará la operación de un cono Callow como se muestra en la figura 1. La alimentación entraba a través de un tubo central al tanque. La canal periférica de rebalse para la recolección de la solución clarificada, fue formada por una tira metálica ajustable a través de toda la periferia. El lodo del fondo era descargado por una válvula o por medio de un sifón ajustable; el sifón tenía como propósito el controlar la densidad de descarga; a mayor elevación del sifón sobre la punta del cono, mayor era el flujo de descarga y viceversa.

Figura 1. Partes de un cono Callow

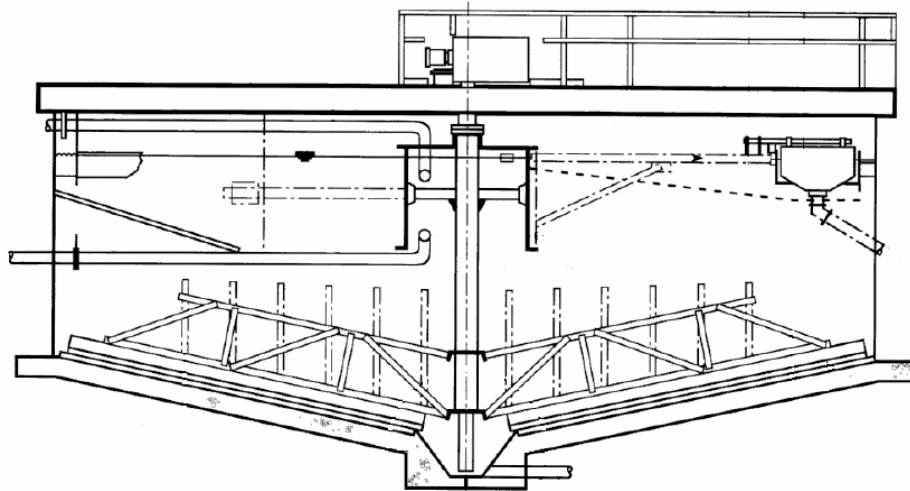


Fuente: Unidad técnica Federico Santa Maria, Operación Unitaria II, Decantación, pág. 14

El orificio de salida de estos clarificadores se obstruía a causa de los grumos formados por los sólidos liberados en las paredes del clarificador. Este efecto necesariamente restringía su uso, pero nuevas técnicas mecánicas fueron usadas para mejorar la clarificación continua. La evolución de este tipo de unidad comenzó a principios de este siglo. Un método simple para obtener continuidad se propuso en 1902. Consistía en colocar deflectores en el compartimiento de asentamiento de la unidad.

En 1906, Dorr incorporó a un clarificador un conjunto de raspadores que giraban lentamente como se muestra en las figura 2. Estos raspadores removían en forma continúa los lodos del fondo hacia un tubo central, sin interferir en la zona superior de asentamiento. Esta forma de remover el lodo evitaba la obstrucción en la salida del tanque.

Figura 2. Sistema de raspadores del clarificador Dorr



Fuente: Dorr- Oliver Eimco *Component Clarifiers & Thickeners Catalog*, Pág. 7

Para aliviar la resistencia que el sedimento acumulado presentaba a los raspadores, se adicionó un elevador en la parte superior de la unidad que se operaba manualmente. Esto permitía al operador elevar 30 centímetros o un poco más los raspadores, aliviando la tensión entre ellos.

Un gran adelanto se alcanzó cuando se aplicó el concepto de torque a los raspadores, ya que se levantaban en forma automática por medio de un mecanismo cuando se experimentaba una sobrecarga, y luego retornaba a su posición normal cuando la sobrecarga desaparecía.

En 1920, se introdujo un clarificador con un nuevo método para remover el lodo. El clarificador contenía un pozo de lodos en el centro, el sedimento pesado se forzó a pasar a través de este pozo por medio de presión hidrostática. En la parte superior del pozo se colocó un medio adecuado para la expulsión de este lodo.

Se desarrolló otro método para accionar los raspadores. El cual destacaba la aplicación de la fuerza motriz a lo largo del brazo por medio de un carrito accionado por un motor eléctrico que circulaba alrededor del clarificador en su parte superior. También se incluyó un dispositivo de seguridad que accionaba una válvula de compuerta en el tubo de alimentación cuando ocurría una sobrecarga. La introducción de un brazo raspador con aletas verticales mejoró las características de espesamiento del tanque convencional.

Recientemente se utilizó raspadores fijos para ayudar en el espesamiento y clarificación, este equipo de proceso se denominó "*Gelsol Process*", cada raspador tenía una inclinación de aproximadamente 25° respecto a la horizontal, lo que produce un componente de fuerza vertical como resultado de su movimiento. El efecto de este componente vertical se añade a la fuerza de empuje gravitacional, lo cual ayuda al engrosamiento en la fase de sedimentación.

Los clarificadores rectangulares o cuadrados requerían un tipo diferente de raspadores, éstos fueron reformados de unidades circulares y cilíndricas. Uno de los brazos rígidos en el mecanismo del clarificador, estaba equipado con raspadores especiales los cuales alcanzaban las cuatro esquinas del tanque y movían el lodo asentado hacia el centro donde era recogido por un mecanismo corriente de raspadores.

Además de los métodos previamente mencionados para sacar el lodo, también se introdujo un medio de transferencia de sedimento por un conductor de tornillo sinfín. El lodo generalmente se acumulaba en la garganta del conductor, localizado en el fondo del tanque, y era expulsado a un desagüe como resultado del empuje del tornillo.

Un adelanto significativo en el diseño de clarificadores ocurrió con la llegada en 1915 del sedimentador de bandejas múltiples; este tipo era similar en principio a la unidad de un solo compartimiento. De cualquier forma éste preveía una capacidad máxima por unidad de área de piso. Como la capacidad es proporcional a la superficie de decantación, y como cada compartimiento actúa como una unidad individual, el sedimentador de bandejas múltiples incrementa en 100% el compartimiento original simple. La ventaja económica de este tipo de construcción en sus costos fijos y de operación es reconocida fácilmente.

Estos clarificadores fueron subdivididos en una serie de compartimentos de sedimentación de bajo fondo, por medio de una serie de bandejas cónicas. Estas bandejas estaban adheridas a los lados del tanque por medio de un anillo hecho de un perfil angular. Los compartimentos individuales tenían sus propias conexiones de alimentación y recolección de jugo clarificado. Los sólidos asentados en cada bandeja eran descargados, a través de un desagüe central, al fondo del tanque por gravedad donde podían removerse fácilmente.

1.3.3 Proceso de sulfitación

1.3.3.1 Variaciones de los procedimientos

Los procesos de sulfitación están sujetos a casi tantas modificaciones como la defecación simple. Entre las variaciones pueden incluirse las siguientes: 1) modificación de la secuencia de adición de la cal y el SO₂ (primero la alcalización, primero la sulfitación, adición simultánea de la cal y el gas, procedimientos fraccionados); 2) modificaciones de la temperatura (sulfitación en caliente o en frío, calentamiento por etapas); y 3) adición de los reactivos (intermitente, continua, control ya sea manual o automático). Es obvio que dichas variables permiten una larga serie de combinaciones, y sólo las que se usan con mayor frecuencia se esbozan en este lugar.

1.3.3.2 Sulfitación en frío

El jugo crudo frío se bombea a través de una torre o caja de azufre con una contracorriente de SO₂ para absorber tanto gas como sea posible (acidez 3.0 – 4.0 ml de álcali 0.1 N por 10 ml de jugo; pH de 4.0 o menos). El encalado hasta alcanzar una ligera acidez (pH alrededor de 6.5) es seguido por el calentamiento, sedimentación y decantación como en el proceso de defecación. Se continúa con la evaporación hasta obtener un jarabe ligero, y luego dicho jarabe se deja sedimentar durante 6 a 24 hrs antes de hervirlo en el tacho al vacío. Una ebullición, la que produce un azúcar casi blanco que se lava intensamente en las centrifugas, es seguida frecuentemente por una segunda ebullición hasta obtener azúcar crudo. La miel de “recocción” se deja decantar durante varias semanas antes de ponerla en el mercado. Los buenos resultados del proceso dependen en gran parte de la calidad y el precio de la miel.

Asimismo, la sulfitación se lleva a cabo por inyección del SO₂ (SO₂ líquido de uso industrial en cilindros) al jugo crudo y frío hasta un nivel de aproximadamente 400 ppm de SO₂. Lo anterior se hace en el caso de la producción de azúcar crudo y miel A. La miel A es invertida para obtener una proporción de sacarosa– inversión de cerca de 1:1, lo que da un total de azúcar de 65% a 80° Brix, con un nivel de SO₂ de 30 a 40 ppm.

1.3.3.3 Sulfitación después de la alcalización

Este proceso se denomina sulfitación alcalina en oposición a la sulfitación ácida que se acaba de describir. Utiliza aproximadamente 8 gal (30 l) de lechada de cal con un Brix de 80° por 100 gal (378 l) de jugo, lo que da un gran exceso de cal. Luego se lleva a cabo la sulfitación hasta un pH de alrededor de 7.5, a fin de producir un precipitado pesado, el que se puede eliminar mediante sedimentación y decantación. Una alcalización más fuerte (10 – 12 gal, 38 – 45 l) dará por resultado un precipitado que permitirá utilizar el filtro prensa. Después de la evaporación, el jarabe es enfriado y sulfitado hasta obtener una ligera acidez (pH 6.5).

El tratamiento del jugo de difusión con cal seguida por la sulfitación disminuye el color del jarabe, el azúcar crudo y el azúcar refinado en 25%, 46% y 35%, respectivamente. La filtrabilidad se mejora y la pureza de las mieles es más baja, lo que permite una mayor recuperación de azúcar.

1.3.3.4 Sulfitación en caliente

La sulfitación en caliente ayuda a reducir la solubilidad del sulfito de calcio, que es más soluble a una baja temperatura ; la solubilidad mínima tiene lugar a aproximadamente 75°C (167°F). Se calienta primero el jugo a esta temperatura,

luego se sulfita y se alcaliza, se hierve y se deja sedimentar. El proceso de Harloff es un procedimiento de tratamiento en caliente en el que el jugo se calienta a 75°C y la cal y el SO₂ se añaden simultáneamente de tal manera que se mantenga la reacción ácida a la fenolftaleína y la alcalina al tornasol (pH entre 7.4 y 7.8), excepto cerca del final, cuando se añade una cantidad de lechada de cal a fin de obtener una fuerte reacción alcalina (pH mayor de 10), después de lo cual se completa la sulfitación hasta la neutralidad al tornasol (pH cerca de 7.2). Como ocurre en todos los demás procesos similares, el jugo se lleva finalmente a temperaturas de ebullición en calentadores de jugo y se deja sedimentar.

1.3.3.5 Sulfitación continua

El término sulfitación continua indica la adición continua de SO₂ y cal a la corriente de jugo que fluye de manera continua. Marches describe muchos procedimientos diferentes, con diagramas que indican detalles de construcción, métodos para la adición de la cal y el gas, pantallas para asegurar una circulación apropiada, así como otros detalles.

2. SISTEMAS DE CONTROL UTILIZADOS EN LOS CLARIFICADORES DE JUGO DE CAÑA

2.1 Control automático de adición de la cal

2.1.1 Aplicación de la cal como sacarato

El manejo de la lechada de cal en bombas, tuberías, tanques y válvulas requiere una limpieza frecuente y un mantenimiento constante. La cal se disuelve en las soluciones de sacarosa formando sacarato de calcio, una verdadera solución, misma que puede manejarse sin ninguno de los problemas de la lechada.

El método de operación consiste en mezclar 10% del jugo mezclado o mixto frío con toda la cal que se utilizará en la clarificación; esta mezcla se aplica a su vez al 90% restante del jugo mixto calentado. (Este procedimiento es para el encalado continuo en caliente, pero es igualmente aplicable a la alcalización intermitente en frío.) Se requiere un poco más de 5 minutos de contacto entre el jugo mixto frío y una lechada de cal de buena calidad para formar cuantitativamente sacarato de calcio.

Para aplicar la alcalización por sacarato al jugo mixto, se compara un desarrollo práctico del sistema de alcalización por sacarato con el método convencional de encalado en caliente. En vez de utilizar jugo mixto, se utiliza jarabe crudo, de 68° Brix, para mezclarlo con la lechada de cal de 15° Bé en una proporción de 7:1, durante un tiempo de retención de 5 minutos.

La solución resultante de sacarato tiene un pH de 11.0 a 11.5. A continuación, el sacarato es dosificado al jugo mixto en un punto anterior a la bomba intermedia después de la etapa primaria de calentamiento. Los resultados de la comparación muestran que el proceso de alcalización por sacarato produce un jugo de claridad superior y mejora la caída de pureza a lo largo de la estación de clarificación. Más aún, las soluciones de sacarato se manejan más fácilmente que la suspensión de lechada de cal, lo que mejora el control del pH del jugo alcalizado.

2.1.2 Alcalización continua

Muchos de los sistemas descritos anteriormente emplean propulsores para obtener una mezcla rápida, tanques de retención de tamaño variable, a fin de asegurar una reacción completa entre la cal y el jugo y un mecanismo de válvulas para regular la cantidad añadida. El ajuste de la cal de acuerdo con el pH se realiza en forma manual. Es obvio que tales regulaciones manuales dependen de la habilidad del operador. Los dispositivos automáticos de alcalización continua controlados por el pH del jugo encalado constituyen la forma más satisfactoria para controlar la reacción.

2.1.3 Sistemas de control para la adición de la cal

La adición de la cantidad correcta de cal es la base de una buena clarificación. Una cantidad demasiado baja de cal producirá una decantación deficiente y un jugo turbio con posibles pérdidas por inversión, y un exceso de cal produce oscurecimiento de los jugos, aumento de sustancias gomosas en productos de baja pureza, aumento en las cenizas a causa de las sales de calcio disueltas, y una alta producción de mieles.

Los papeles indicadores y las titulaciones que antes se utilizaban en el trabajo de los ingenios, han sido completamente sustituidos por el control del pH. El pH indica la acidez efectiva, mientras que la titulación indicaba la acidez total. No existen relaciones sencillas entre el pH y la acidez del jugo de caña. Es importante recordar que por lo general el pH se determina en la práctica a la temperatura ambiente y que no es igual al pH determinado a la temperatura de trabajo.

2.1.4 Control del pH

El pH óptimo al que se debe llevar el jugo mediante la alcalización depende de muchas condiciones y varía según la localización de la fábrica, la variedad y madurez de la caña, la capacidad del equipo de decantación y otras condiciones locales.

En general, resulta deseable agregar el mínimo de cal que produzca un jugo claro con una reacción final cercana a un pH de 7.0. En las áreas donde la caña no está completamente madura al cosecharse, como ocurre en Luisiana, los ácidos orgánicos del jugo mantienen el pH por debajo de 7.0 en el jugo claro. Si el pH de los jugos claros llega a 7.0 puede haber una adición excesiva de cal. Es necesario evitar la alcalización excesiva, y si no es posible obtener un jugo claro por defecación simple sin tener que alcalizarlo hasta un pH muy alto, debe añadirse fosfato o emplearse alguna otra modificación del proceso.

La adición de polímeros floculantes ha demostrado ser útil como auxiliar del proceso de cal y calor. Asimismo, debe evitarse alcalizar el jugo mixto a un pH de 8.5 o mayor. Entre las desventajas reconocidas de lo anterior se incluyen: la presencia de una cantidad excesiva de sales solubles de calcio, descomposición de los azúcares reductores con el consecuente aumento de

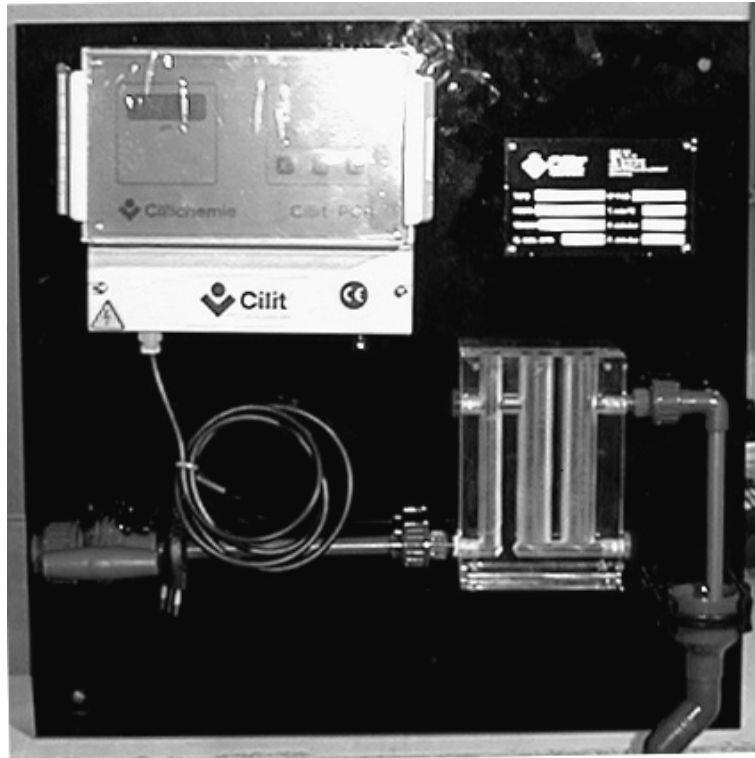
color y que nuevamente se pongan en solución algunos cuerpos nitrogenados. Por consiguiente, son necesarias algunas pautas para el control efectivo del pH; se ha llegado a la conclusión que la operación efectiva de: 1) el control del flujo del jugo, 2) la preparación del jugo y 3) la dilución de la cal para la inyección pueden controlar el pH dentro de una precisión de ± 0.05 de unidad.

2.1 Control automático del pH en el proceso de clarificación

2.2.1 Control automático de la alcalización por medio del pH

Muchos fabricantes de instrumentos de Estados Unidos y otros países construyen sistemas que incorporan aparatos que indican y registran el pH, así como mecanismos de mando que controlan la aplicación de cal al jugo mixto. La figura 3 muestra un ejemplo de uno de estos equipos. La muestra del jugo pasa a través de una cámara de flujo que encierra un electrodo de vidrio para medición y referencia que detecta un voltaje proporcional al pH del jugo alcalizado. Esta señal de milivoltaje que se desarrolla a través de la membrana de vidrio de alta resistencia es alimentada a un amplificador indicador adecuado y de aquí a un servo registrador potenciométrico que incluye un control de resistencia de cursor que cambia de posición debido a un cambio en el pH, de tal manera que se añade suficiente cal a fin de mantener el pH final óptimo del jugo encalado que sale del tanque mezclador.

Figura 3. Sistema de dosificación automática del pH



Fuente: www.cilit.com/products/cilichemie

2.2.2 Disminución del pH durante la clarificación

Durante el calentamiento y la decantación, siempre tiene lugar una disminución del pH. Muchos atribúan este descenso del pH a la acción microbiológica; pero el cambio constituye de hecho una función de la cantidad de P_2O_5 contenida en el jugo; mientras más alto sea el contenido de fosfato, más notable será la diferencia entre el pH antes y después del calentamiento del jugo. La cal reacciona con los fosfatos para originar varios fosfatos básicos

de calcio; los fosfatos cálcicos son más insolubles y se precipitan en el lodo, dejando la solución más ácida (es decir con un pH más bajo).

Una alcalización elevada, por arriba de un pH de 8.5, produce una disminución del pH debido a la formación de ácidos por la acción del exceso de cal sobre los azúcares reductores. De igual manera, tiene lugar un descenso del pH en todos los casos debido a la destrucción de los azúcares por el calor. Un descenso similar del pH ocurre en la defecación en las refinerías.

2.2.3 Control manual con registradores del pH

Los registradores electromecánicos del pH con control manual de la aplicación de la cal resultan menos costosos que los equipos totalmente automáticos, pero no resultan tan satisfactorios ya que dependen de la destreza y cuidado del operador. El registrador, se debe de colocar en un sitio en el que el operador lo pueda ver en todo momento, preferiblemente en el caudal de jugo después de la mezcla completa con la cal. En el caso de los métodos discontinuos de alcalización, este sistema da resultados bastante satisfactorios ya que el factor tiempo permite que el operador cambie la dosificación de cal de acuerdo con las lecturas del pH. La instalación de un registrador del pH en el afluente del jugo clarificado sería un refinamiento posterior, de modo que la comparación del pH antes y después de la clarificación permitiría la disminución del pH. Existen interruptores de electrodos múltiples que permiten la utilización de varios pares de electrodos con un solo registrador.

2.2.4 Control automático del calentamiento

Sin importar si el proceso de alcalización es en frío o en caliente, la temperatura puede controlarse mediante sensores de temperatura, cuyas

señales son transmitidas a reguladores neumáticos o electrónicos, los cuales se encargan de modular una válvula de vapor para controlar el calentamiento a los valores predeterminados por el operador, los cuales pueden ser modificados en cualquier momento por medio de un ajuste mecánico o de instrucción a través del panel frontal del equipo.

2.3 Dosificación de fosfato y los floculantes en el proceso

2.3.1 Parámetros a considerar para la dosificación del fosfato

La función del fosfato en la clarificación es de gran importancia debido a que ayuda a disminuir la cantidad de sales de calcio en el jugo, una decantación más rápida, filtración más rápida de las cachazas, mejores azúcares y mejor calidad de trabajo de los materiales de bajo grado en el ingenio. Para determinar la cantidad necesaria de fosfato en partes por millón (ppm) que se aplicaran al jugo es necesario considerar las condiciones de la caña de azúcar tales como el tipo, humedad y acidez. La adición de fosfatos se puede efectuar no sólo en la defecación simple sino también en las modificaciones como la alcalización en caliente, la alcalización fraccionada o la alcalización retardada o en la sulfitación. El tipo de fosfato que se utiliza en el proceso de clarificación es importante para determinar la cantidad adecuada que debe ser agregada para lograr la proporción óptima en el jugo, ya que la concentración que tienen los diferentes tipos de fosfato es dependiente en muchas oportunidades del fabricante o proveedor del mismo.

2.3.2 Dosificación del floculante

Por lo general, la dosificación óptima se halla en el intervalo de 2 a 4 ppm. El exceso de la dosificación puede tener un efecto adverso.

La proporción de jugo puede controlarse mediante un medidor magnético de flujo instalado en la línea del jugo, el cual transmite señales a un registrador de flujo y a una estación de relación, que a su vez envía señales a una unidad propulsora de velocidad variable que controla la bomba que envía la solución madre del floculante a la línea del jugo. El sistema de circuito abierto opera satisfactoriamente para dosificación entre 1.6 y 4.0 ppm.

Al aumentar la dosificación, algunos floculantes pueden ayudar a incrementar la velocidad de sedimentación, pero los sólidos en suspensión en el jugo pueden también aumentar. El nefelómetro resulta un buen auxiliar para la indicación y control de la clarificación del jugo.

3. TEORÍA Y SELECCIÓN DE SENSORES Y ELEMENTOS FINALES DE CONTROL UTILIZADOS EN LA AUTOMATIZACIÓN DE UN CLARIFICADOR

3.1 Medida de temperatura

3.1.1 Introducción

La sensación fisiológica de calor y frío es el origen del concepto primario de temperatura. Se pueden apreciar variaciones de temperatura de acuerdo con las variaciones de intensidad de estas sensaciones, pero el sentido del tacto carece de la sensibilidad y alcance necesarios para dar una forma cuantitativa a esta magnitud. Además, los efectos producidos por la conductividad de los cuerpos dan lugar a confusión en la apreciación de temperaturas al tacto.

Así, por ejemplo, debido a la mejor conductividad de los metales, una pieza de hierro o aluminio parece más fría que un trozo de madera situado en el mismo recinto y, por lo tanto, a igual temperatura. De igual modo, el cuerpo humano experimenta un daño muy semejante al contacto con el agua en ebullición o con aceite hirviendo y, en cambio, es muy sensible a ligeros cambios de temperatura en las proximidades de los 36,5 °C.

Además, los términos que se utilizan corrientemente para describir la temperatura son términos subjetivos. Un «día caluroso» para un esquimal puede ser algo muy distinto de un «día caluroso» para un árabe del desierto.

La experiencia sensorial de un objeto frío o caliente tiene además otro aspecto. Si sobre la mano se derrama un cazo de agua hirviendo, el daño recibido es grande, con una temperatura de 100 °C. En cambio, una chispa de un castillo de fuegos artificiales cae sobre la piel sin producir daño alguno a pesar de que su temperatura puede ser muy superior. En realidad es un problema de capacidad calorífica. Para expresar la temperatura de modo que condiciones idénticas pueden describirse de un modo absoluto se necesita una definición exacta de esta magnitud y una escala numérica de valores.

Para un gas ideal la temperatura se mide por la expresión $T = p V / n R$, pero el verdadero concepto de la temperatura se alcanza con la teoría molecular, según la cual esta magnitud mide la energía cinética media de las moléculas de una sustancia o mediante la mecánica estadística que la define como la sensibilidad de la energía a los cambios de entropía a volumen constante. No obstante, el principio cero de la termodinámica permite definir de un modo operacional la temperatura de un sistema sin hacer hipótesis sobre la estructura de la materia.

De todas las magnitudes físicas, sin duda la temperatura es la de medida más frecuente. Posiblemente sea la variable que determine de forma más decisiva las propiedades de la materia, bien dependiendo de ella como función continua (tal es el caso de la resistividad eléctrica, presión, etc.) o bien presentando características muy diferentes según que su temperatura sea superior o inferior a una bien definida (caso de los cambios de fase, punto de Curie, etc.). Por ello es por lo que la medida de la temperatura es vital tanto en la industria como en la investigación.

No obstante, asignar un valor numérico a una temperatura plantea un problema importante. En efecto, la mayoría de las magnitudes físicas suelen estar definidas por un valor numérico obtenido por comparación con otra

tomada como referencia. A éstas se las conoce con el nombre de magnitudes extensivas, pues a partir del patrón de la unidad se pueden definir de forma sencilla, al menos conceptualmente, múltiplos y submúltiplos de ella. Este no es, evidentemente, el caso de la temperatura, que pertenece al grupo de las llamadas variables intensivas. Multiplicar o dividir por un número el valor de una temperatura no tiene significado físico alguno. Esto nos lleva a plantearnos el estudio de las bases físicas en las que se funda el establecimiento de una escala de temperaturas.

3.1.2 Tipos de termómetros

En física se utilizan varios tipos de termómetros, según el margen de temperaturas a estudiar o la precisión exigida. Todos se basan en una propiedad termométrica de alguna sustancia: que cambie continuamente con la temperatura (como la longitud de una columna de líquido o la presión de un volumen constante de gas).

3.1.2.1 Termómetros de líquido

Los termómetros de líquido encerrado en vidrio son, ciertamente, los más familiares: el de mercurio se emplea mucho para tomar la temperatura de las personas, y, para medir la de interiores, suelen emplearse los de alcohol cobreado en tubo de vidrio. Los de mercurio pueden funcionar en la gama que va de $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto de congelación del mercurio) a $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ (su punto de ebullición), con la ventaja de ser portátiles y permitir una lectura directa. No son, desde luego, muy precisos para fines científicos.

El termómetro de alcohol coloreado es también portátil, pero todavía menos preciso; sin embargo, presta servicios cuando más que nada importa su cómodo empleo. Tiene la ventaja de registrar temperaturas desde $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto de congelación del etanol, el alcohol empleado en él) hasta $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ (su punto de ebullición), cubriendo por lo tanto toda la gama de temperaturas que se encuentran en nuestro entorno.

3.1.2.2 Termómetros de gas

El termómetro de gas de volumen constante es muy exacto, y tiene un margen de aplicación extraordinario: desde $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $1477\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pero es más complicado, por lo que se utiliza más bien como un instrumento normativo para la graduación de otros termómetros.

El termómetro de gas a volumen constante se compone de una ampolla con gas -helio, hidrógeno o nitrógeno, según la gama de temperaturas deseada- y un manómetro medidor de la presión. Se pone la ampolla del gas en el ambiente cuya temperatura hay que medir, y se ajusta entonces la columna de mercurio (manómetro) que está en conexión con la ampolla, para darle un volumen fijo al gas de la ampolla. La altura de la columna de mercurio indica la presión del gas. A partir de ella se puede calcular la temperatura.

En un termómetro de gas de volumen constante, el volumen del hidrógeno que hay en una ampolla metálica se mantiene constante levantando o bajando un depósito. La altura del mercurio del barómetro se ajusta entonces hasta que

toca justo el indicador superior: la diferencia de los niveles (h) indica entonces la presión del gas y, a la vez, su temperatura.

3.1.3 Termómetros de dilatación

3.1.3.1 Termómetros de líquido en vidrio

El vidrio del termómetro debe elegirse por su estabilidad y debe estar bien recocido. El bulbo, a altas temperaturas y presiones, está expuesto a aumento permanente de volumen, ocasionando que la indicación del termómetro sea más baja de lo debido.

Los termómetros de mercurio más exactos están graduados y calibrados para inmersión total; esto es, con todo el mercurio, incluyendo el del tubo, a la temperatura que se está midiendo. Si parte del mercurio de la columna se extiende fuera de la región en que se ha de medir la temperatura, hay que aplicar una corrección a la lectura, basada en la longitud en grados de la columna emergente, en la diferencia de temperatura entre la columna emergente y el bulbo y en la dilatación relativa del mercurio y del vidrio.

3.1.3.2 Termómetro de Beckmann

El termómetro diferencial de Beckmann tiene una escala de 30 cm de largo, aproximadamente, con una escala total de 5 a 6 grados Centígrados. en divisiones de 0.01 de grado. Está construido de forma que una parte del

mercurio del bulbo puede ser trasladada a un depósito, de manera que lleve el extremo de la columna de mercurio a la sección graduada para las zonas de temperaturas en que se han de medir las diferencias. Se emplea sólo para medir diferencias de temperatura. La exactitud conseguida está entre 0.002 y 0.005 grados en la medida de cualquier intervalo dentro de los límites de la escala.

3.1.3.3 Termómetro de cinta bimetálica

Este termómetro consiste en una cinta hecha de dos metales de coeficientes de dilatación térmica muy diferentes, tales como el Invar y el latón, soldados cara con cara en toda su longitud. La cinta puede ser casi recta o puede formar una espiral para conseguir mayor sensibilidad. Una elevación de temperatura cambia la curvatura de la cinta, puesto que el latón aumenta más rápidamente en longitud que el Invar. Si uno de los extremos es fijo, un indicador unido al extremo libre se mueve sobre una escala graduada en temperaturas, o una pluma se mueve sobre una tarjeta movable para registrar la temperatura. Las cintas bimetálicas se emplean para obrar sobre contactos eléctricos que controlan la temperatura de habitaciones, baños de aire y otros dentro del intervalo.

La respuesta a los cambios de temperatura es casi lineal. Dentro del intervalo de temperaturas aceptado (no superior a 1500 °C. cuando se emplea el latón, considerablemente superior cuando se emplea en lugar del latón una aleación de cromo y níquel), los errores inherentes a la cinta son insignificantes. Pueden ocasionarse errores apreciables en el enlace mecánico. Hay una forma, en la cual la cinta bimetálica es una espiral dentro de un tubo delgado de metal,

y la aguja indicadora se mueve sobre una escala circular graduada, coaxial con el tubo. Puede reemplazar al termómetro de mercurio para numerosos usos.

3.1.4 Termómetros de sistemas llenos

3.1.4.1 Termómetros llenos de gas

El termómetro de gas de volumen constante, mencionado al hablar del establecimiento de la escala termodinámica de temperaturas, pertenece a la categoría de termómetros llenos de gas y es el más exacto de este tipo. Sólo se emplea en los laboratorios de patrones a causa de su complejidad y de su tamaño. Para usos industriales, un termómetro por presión de gas consta de un elemento que mide la presión, como el tubo Bourdon conectado por un tubo capilar a una ampolla que se expone a la temperatura que se ha de medir. El sistema se llena, a presión, con un gas inerte, ordinariamente el nitrógeno. Puesto que la presión del gas en un recipiente cerrado es proporcional a su temperatura absoluta, el elemento medidor puede ser calibrado en grados de temperatura con una escala dividida uniformemente. Como el gas del elemento medidor y del tubo de conexión no está a la temperatura del bulbo, el volumen de éste tiene que ser grande para que los errores introducidos por la diferencia de temperatura del elemento medidor de la presión y del tubo capilar resulten insignificantes. El bulbo debe tener por lo menos cuarenta veces el volumen del resto del sistema. Por ello, y a causa del retardo en la transmisión de los cambios de presión por el tubo capilar, la longitud de éste se limita a un máximo de 60 m, y es preferible menos.

La presión inicial en el termómetro de gas es ordinariamente de 10 a 35 Kg/cm². El par de torsión producido es entonces amplio para operar una pluma registradora cuando la dimensión de la escala es 200 grados centesimales, o más. Las dimensiones de la escala menores de 50 grados no son recomendadas. Con una dimensión de escala de 200 grados, o más, la reproducibilidad de las lecturas es del orden de +/- 1/4 % de aquella dimensión. El tiempo de respuesta tiende a ser largo, en parte a causa de la necesidad de transmitir los cambios de presión por medio de un tubo de calibre fino y en parte a causa del gran volumen y escasa conductividad térmica del nitrógeno. Para el volumen suficiente, el bulbo tiene ordinariamente 22 mm. de diámetro, lo que da una respuesta lenta. El tiempo de respuesta puede ser disminuido consiguiendo el volumen deseado mediante el empleo de un tubo largo de 6.5 mm., ordinariamente en forma de hélice de 5 cm.

La temperatura es indicada por una aguja que se mueve sobre una escala graduada o se registra en un papel de gráficas sobre un cilindro por una pluma accionada por el elemento que mide la presión. La escala para los registradores rara vez es menor de 100 grados centesimales, pero en los aparatos indicadores el campo puede ser menor.

Las variaciones en la presión barométrica no suelen ser tan grandes que afecten apreciablemente las indicaciones pero los grandes cambios en altitud deben ser corregidos en la graduación.

Los termómetros de gas a presión se emplean en temperaturas entre -450 °F. y +1000 °F. (-268 °C. y + 538 °C.), lo cual queda parcial o enteramente fuera de los límites de los sistemas de vapor a presión y en aplicaciones en que la menor exactitud y el mayor tamaño del bulbo no exigen la elección de un termómetro de alto costo del tipo de expansión de líquido.

3.1.4.2 Termómetros de vapor a presión

Los termómetros de vapor a presión utilizan el hecho de que en una vasija cerrada que no contiene más que un líquido y su vapor, llenando el líquido sólo parcialmente el recinto, la presión es dependiente solamente de la especie del líquido y de su temperatura. Un uso muy extenso se hace de esta relación entre la presión del vapor y la temperatura en la medida y registro de las temperaturas industriales.

El termómetro de presión de vapor se parece al termómetro de gas a presión en que consta de un bulbo, un tubo de conexión de longitud fija, de 1.5 a 75 m de largo, y un elemento sensible a la presión.

El bulbo está parcialmente ocupado por un líquido con una temperatura de ebullición bastante baja para producir una presión de trabajo de 5 a 35 Kg/cm² en el intervalo de temperaturas a cubrir. El extremo superior de este intervalo debe ser mas bajo que el punto crítico del líquido. Se emplean el cloruro de metilo, el anhídrido sulfuroso, el éter, el alcohol etílico y el tolueno, elegidos para la presión de vapor apropiada según las relaciones de temperatura, la inercia de los metales empleados (o el sistema y la disponibilidad del líquido en forma pura). Los citados líquidos cubren una gama de -180 hasta 300 °C.

La presión de vapor aumenta con la temperatura más rápidamente a medida que la temperatura se eleva, de suerte que la curva temperatura presión de vapor no es lineal, y las gráficas de temperatura tienen sus marcas de grados más separadas en el extremo superior de la escala que en el inferior. Un aparato registrador de 10 a 100 °C puede tener divisiones de 2 grados C. entre 10 y 40 °C. y solamente de medio grado desde 40 hasta 100 °C. La exactitud de la lectura es escasa en el extremo inferior de la escala.

La reproducibilidad de los termómetros de vapor a presión es del orden de ± 1 %, y en algunos casos considerablemente mejor.

El nivel del bulbo con respecto al aparato de medición de la presión es importante, pues si la temperatura del tubo de conexión es inferior a la temperatura del bulbo, el vapor se condensará en el tubo de conexión. El aparato de medición de la presión está sometido a la presión del vapor en el bulbo más la carga hidrostática de esta columna de líquido si el bulbo está sobre el aparato de medición, o a la presión del vapor en el bulbo menos la carga hidrostática si el bulbo está bajo el aparato de medida. Si la temperatura de operación del bulbo ha de ser más alta que la temperatura del aparato de medida de la presión, el instrumento se gradúa para una diferencia de nivel definida, deben hacerse correcciones si se cambia la elevación del bulbo.

Un gran defecto en este sistema de medida es el trastorno debido al paso del líquido desde el bulbo al elemento de presión, o inversamente, cuando la temperatura medida cruza la temperatura del instrumento.

3.1.5 Termómetros de líquido en dilatación

En un termómetro de líquido en dilatación, el sistema se llena completamente con un líquido apropiado y consiste en un bulbo conectado por tubo capilar a un elemento en forma de hélice o espiral de Bourdon situado en la caja del instrumento. A medida que aumenta la temperatura y se dilata el líquido, la hélice tiende a deshacerse para proporcionar el aumento de volumen y es mayor. La presión de llenado elegida debe ser tal, que la temperatura de ebullición del líquido sea apreciablemente más alta que la mayor temperatura que el sistema haya de medir. Pueden medirse temperaturas desde -1.75 °C.

hasta + 300 °C. (550 °C. para el mercurio). Aunque los cambios de volumen son relativamente pequeños, las fuerzas ejercidas pueden ser grandes para accionar el elemento, y por consiguiente, este tipo de medida se considera bueno para aparatos reguladores que requieran alto grado de estabilidad.

El origen mayor de error en este tipo de medida es la dilatación térmica del líquido que no está en el bulbo. Cuando la longitud del tubo es corta, el error está en su mayor parte en el elemento Bourdon, y normalmente se coloca un elemento bimetálico de corrección en la caja para compensar este error.

Cuando el tubo capilar es largo, se usa uno de estos dos métodos para la corrección:

- 1) Un hilo metálico central se coloca en el tubo capilar en toda su longitud; este hilo tiene un coeficiente de dilatación que corrige el cambio de volumen del líquido. Normalmente se emplea esto únicamente en los sistemas llenos con mercurio.
- 2) Un segundo tubo capilar sin bulbo, cerrado en el extremo correspondiente al bulbo, va paralelo al tubo capilar desde el bulbo y acciona un Bourdon helicoidal idéntico en la caja del instrumento, de tal modo enlazado con el elemento original, que cualquier dilatación en este capilar corrector se resta del otro sistema y corrige toda dilatación, excepto la del bulbo medidor.

Cualquier dilatación térmica del bulbo es incluida automáticamente en la graduación del sistema. La dilatación térmica del tubo capilar y del elemento sensible es del todo insignificante.

3.1.6 Termómetros magnéticos

A temperaturas próximas al cero absoluto la mayor parte de los métodos mencionados (termómetros de resistencia, pares termoeléctricos, pirómetros de radiación...) resultan ineficaces. En su lugar se utilizan los termómetros magnéticos, basados en la variación con la temperatura de la susceptibilidad magnética "c" de las sales paramagnéticas.

Estas sales siguen la ley de Curie $cT = \text{cte}$. Por lo tanto, para medir la temperatura T, es suficiente determinar la susceptibilidad de la sal paramagnética correspondiente, lo cual se realiza midiendo la autoinducción de un arrollamiento que rodea la muestra. El método es particularmente útil en los sistemas que utilizan sales paramagnéticas como refrigerantes para obtención de bajas temperaturas.

No obstante, esta ley deja de ser válida por debajo de la temperatura de Curie. Por debajo de este punto se define una temperatura magnética T^* , a partir de la propia ley de Curie (admitiendo que siguiera cumpliéndose). Así, si la susceptibilidad es c a una temperatura T por encima del punto de Curie y c^* por debajo del mismo a la temperatura magnética T^* , se cumplirá $T^* = (c/c^*) T$, temperatura que puede reducirse al valor Kelvin correspondiente.

3.1.7 Termómetros de resistencia

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de las características de resistencia en función de la temperatura que son propias del elemento de detección.

El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica. El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado "coeficiente de temperatura de resistencia" que expresa, a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

La relación entre estos factores puede verse en la expresión lineal siguiente:

$$R_t = R_0 (1 + a t)$$

En la que:

R_0 = Resistencia en ohmios a 0°C.

R_t = Resistencia en ohmios t °C.

a = Coeficiente de temperatura de la resistencia.

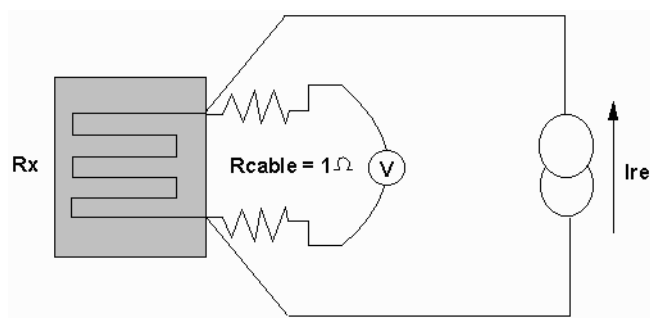
3.1.7.1 Detectores de temperatura de resistencia

El detector de temperatura de resistencia (RTD) se basa en el principio en el cual la resistencia de todos los metales depende de la temperatura. La elección del platino en los RTD de la máxima calidad permite realizar medidas más exactas y estables hasta una temperatura de aproximadamente 500 °C. Los RTD más económicos utilizan níquel o aleaciones de níquel, pero no son tan estables ni lineales como los que emplean platino.

En cuanto a las desventajas, el platino encarece los RTD, y otro inconveniente es el auto calentamiento. Para medir la resistencia hay que aplicar una corriente, que, por supuesto, produce una cantidad de calor que distorsiona los resultados de la medida.

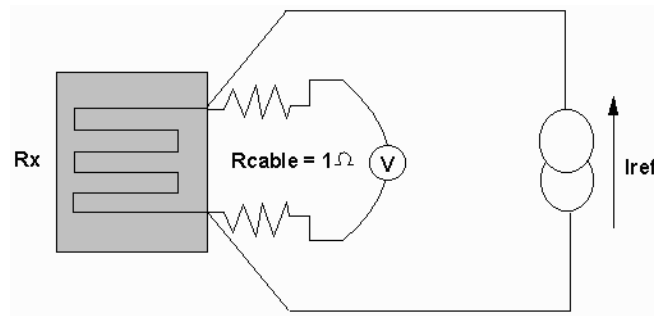
Una tercera desventaja, que afecta al uso de este dispositivo para medir la temperatura, es la resistencia de los RTD. Al ser tan baja, la resistencia de los hilos conductores que conectan el RTD puede provocar errores importantes. En la denominada técnica de dos hilos (Figura 4), la resistencia se mide en los terminales del sistema de adquisición de datos, por lo que la resistencia de los hilos forma parte de la cantidad desconocida que se pretende medir. Por el contrario, la técnica de cuatro hilos (Figura 5) mide la resistencia en los terminales del RTD, con lo cual la resistencia de los hilos queda eliminada de la medida. La contrapartida es que se necesita el doble de cables y el doble de canales de adquisición de datos. (La técnica de tres hilos ofrece una solución intermedia que elimina un cable, pero no es tan precisa.)

Figura 4. Técnica de medición de dos hilos



Fuente: Timothy J. Maloney, *Electrónica Industrial Moderna*, Pág. 25

Figura 5. Técnica de medición de cuatro hilos



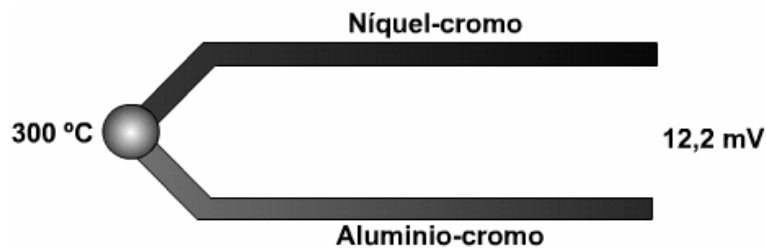
Fuente: Fuente: Timothy J. Maloney, *Electrónica Industrial Moderna*, Pág. 26

3.1.8 Termopares

3.1.8.1 Funcionamiento

En 1822, el físico estonio Thomas Seebeck descubrió accidentalmente que la unión entre dos metales genera un voltaje que es función de la temperatura. Los termopares funcionan bajo este principio, que es llamado efecto Seebeck. Si bien casi cualquier par de metales pueden ser usados para crear un termopar, se usa un cierto número debido a que producen voltajes predecibles y amplios gradientes de temperatura para poder facilitar la linearización de los mismos.

Figura 6. Diagrama de termopar tipo K



Fuente: www.wikipedia.com/termopar

En la figura de arriba, este termopar de tipo K producirá 12,2mV a 300 °C. Desafortunadamente no es posible conectar un voltímetro al termopar para medir este voltaje porque la conexión a las guías del voltímetro hará una segunda unión no deseada. Para realizar mediciones precisas se debe compensar al usar una técnica conocida como compensación de unión fría (CUF).

La ley de los metales intermedios dice que un tercer metal introducido entre dos metales distintos de una unión de termopar no tendrá efecto siempre y cuando las dos uniones estén a la misma temperatura. Esta ley es importante en la construcción de uniones de termopares. Es posible hacer una unión termopar al estañar dos metales, ya que la estañadura no afectará la sensibilidad. En la práctica, las uniones termopares se realizan con soldaduras de los dos metales (por lo general con una carga capacitiva) ya que esto asegura que el desempeño no esté limitado al punto de fusión de una estañadura.

Por lo general, la temperatura de la unión fría es detectada por un termistor de precisión en buen contacto con los conectores de salida del instrumento de medición. Esta segunda lectura de temperatura, junto con la lectura del termopar es usada por el instrumento de medición para calcular la temperatura verdadera en el extremo del termopar. Para aplicaciones menos críticas, la CUF es usada por un sensor de temperatura semiconductor. Al combinar la señal de este semiconductor con la señal del termopar, la lectura correcta puede ser obtenida sin la necesidad o esfuerzo de registrar dos temperaturas. La comprensión de la compensación de unión fría es importante; cualquier error en la medición de la temperatura de la unión fría terminará en el error de la temperatura medida en el extremo del termopar.

3.1.8.2 Linearización

Además de lidiar con la CUF, el instrumento de medición debe enfrentar el hecho que la energía generada por un termopar es una función no lineal de la temperatura. Esta dependencia se puede aproximar por un polinomio complejo (de 5º a 9º orden dependiendo del tipo de termopar). Los métodos análogos de linearización son usados en medidores termopares de bajo costo.

3.1.8.3 Modalidades de termopares

Los termopares están disponibles en diferentes modalidades, como sondas. Estas últimas son ideales para variadas aplicaciones de medición, por ejemplo, en la investigación médica, sensores de temperatura para los alimentos, en la industria y en otras ramas de la ciencia, etc.

A la hora de seleccionar una sonda de este tipo debe tenerse en consideración el tipo de conector. Los dos tipos son el modelo estándar, con pines redondos y el modelo miniatura, con pines chatos, siendo estos últimos (contradictoriamente al nombre de los primeros) los más populares.

Otro punto importante en la selección es el tipo de termopar, el aislamiento y la construcción de la sonda. Todos estos factores tienen un efecto en el rango de temperatura a medir, precisión y confiabilidad en las lecturas.

Además, en la actualidad existen modernos termopares portátiles como el que se muestra en la figura 7 que incluyen además un *display* digital para poder apreciar más fácilmente el valor de temperatura indicado.

Figura 7. Moderno termopar



Fuente: www.wikipedia.com/termopar

3.1.8.4 Tipos de termopares

Tipo K: (Cromo (Ni-Cr) / Aluminio (aleación de Ni-Al)): con una amplia variedad de aplicaciones, está disponible a un bajo costo y en una variedad de sondas. Tienen un rango de temperatura de -200 °C a +1.200 °C y una sensibilidad 41 μ V/°C aprox.

Tipo E: (Cromo / Constantán (aleación de Cu-Ni)): No son magnéticos y gracias a su sensibilidad, son ideales para el uso en bajas temperaturas, en el ámbito criogénico. Tienen una sensibilidad de 68 μ V/°C.

Tipo J: (Hierro / Constantán): debido a su limitado rango, el tipo J es menos popular que el K. Son ideales para usar en viejos equipos que no aceptan el uso de termopares más modernos. El tipo J no puede usarse a temperaturas superiores a 760 °C, ya que una abrupta transformación magnética causa una descalibración permanente. Tienen un rango de -40°C a +750°C.

Tipo N: (Nicrosil (Ni-Cr-Si / Nisil (Ni-Si)): es adecuado para mediciones de alta temperatura gracias a su elevada estabilidad y resistencia a la oxidación de altas temperaturas, y no necesita del platino utilizado en los tipos B, R y S que son más caros. Por otro lado, los termopares tipo B, R y S son los más estables, pero debido a su baja sensibilidad (10 μ V/°C aprox.) generalmente son usados para medir altas temperaturas (superiores a 300 °C).

Tipo B: (Platino (Pt)-Rodio (Rh)): son adecuados para la medición de altas temperaturas superiores a 1.800 °C. El tipo B por lo general presentan el mismo resultado a 0 °C y 42 °C debido a su curva de temperatura/voltaje.

Tipo R: (Platino (Pt)-Rodio (Rh)): adecuados para la medición de temperaturas de hasta 1.600 °C. Su baja sensibilidad (10 μ V/°C) y su elevado costo quitan su atractivo.

Tipo S (Hierro / Constantán): ideales para mediciones de altas temperaturas hasta los 1.600 °C, pero su baja sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y su elevado precio lo convierten en un instrumento no adecuado para el uso general. Debido a su elevada estabilidad, el tipo S es utilizado para la calibración universal del punto de fusión del oro (1064,43 °C).

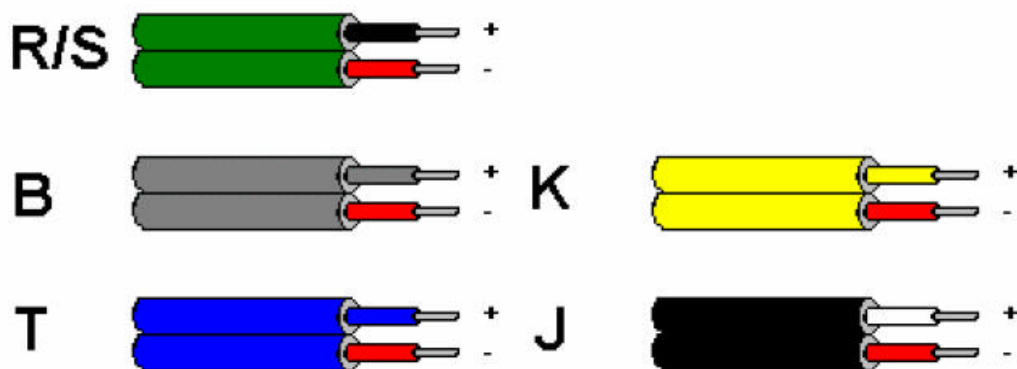
Tipo T: es un termopar adecuado para mediciones en el rango de -200 °C a 0 °C. El conductor positivo está hecho de cobre y el negativo, de constantán.

Los termopares con una baja sensibilidad, como en el caso de los tipos B, R y S, tienen además una resolución menor. La selección de termopares es importante para asegurarse que cubren el rango de temperaturas a determinar.

3.1.8.5 Códigos de colores de los termopares

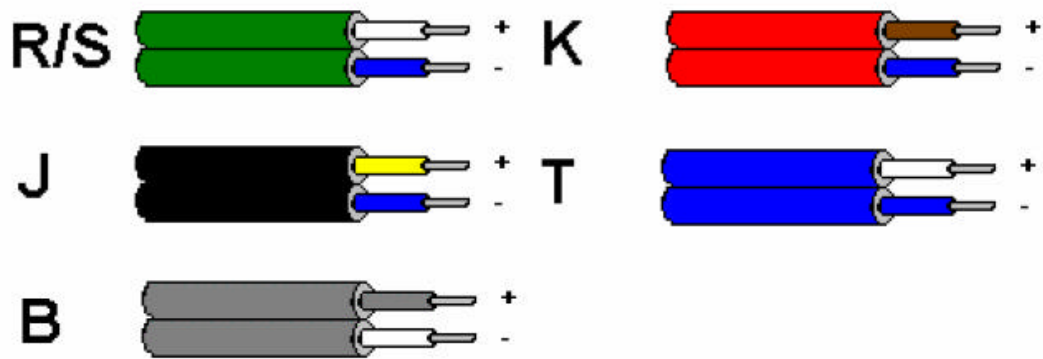
Los cables de los termopares están codificados dependiendo del tipo. Existen distintas normas. Las más comunes son:

Figura 8. Código de colores, según Norma ASTM de Estados Unidos



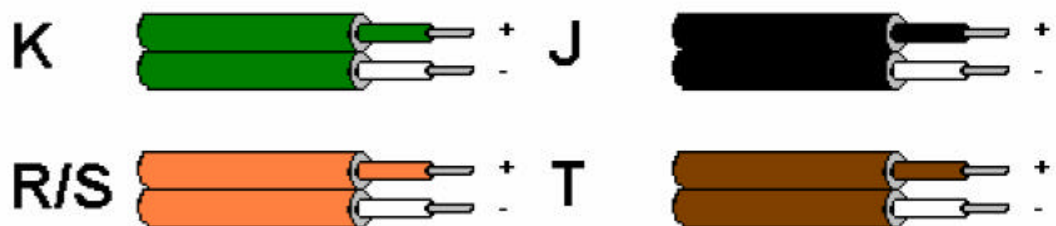
Fuente: <http://www.fi.uba.ar/laboratorios/lscm/SITIOCON.htm>

Figura 9. Código de colores, según Norma BS 1843: 1952 de Inglaterra



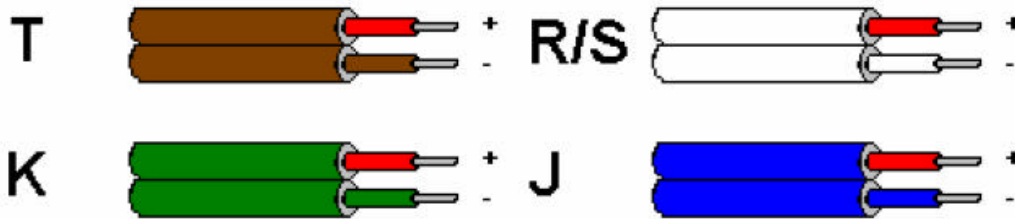
Fuente: <http://www.fi.uba.ar/laboratorios/lscm/SITIOCON.htm>

Figura 10. Código de colores, según Norma BS 4937: 1993 de Inglaterra



Fuente: <http://www.fi.uba.ar/laboratorios/lscm/SITIOCON.htm>

Figura 11. Código de colores, según Norma DIN de Alemania



Fuente: <http://www.fi.uba.ar/laboratorios/lscm/SITIOCON.htm>

3.1.9 Comparación y selección del tipo de sensor de temperatura adecuado para cada aplicación

Ningún transductor es el mejor en todas las situaciones de medida, por lo que tenemos que saber cuándo debe utilizarse cada uno de ellos. Como podemos ver, en la Tabla I se están comparando los cuatro tipos de transductores de temperatura más utilizados, y refleja los factores que deben tenerse en cuenta: las prestaciones, el alcance efectivo, el precio y la comodidad.

Tabla I. Comparación de sensores de temperatura

	R T D	Termistor	Sensor de IC	Termopar
Ventajas	Más estable. Más preciso. Más lineal que los Termopares.	Alto rendimiento Rápido Medida de dos hilos	El más lineal El de más alto rendimiento Económico	Autoalimentado Robusto Económico Amplia variedad de formas físicas Amplia gama de temperaturas
Desventajas	C a r o . Lento. Precisa fuente de alimentación. Pequeño cambio de resistencia. Medida de 4 hilos Autocalentable	No lineal . Rango de Temperaturas limitado. Frágil. Precisa fuente de alimentación. Autocalentable	Limitado a < 250 °C Precisa fuente de alimentación Lento Autocalentable Configuraciones limitadas	No lineal Baja tensión Precisa referencia El menos estable El menos sensible

Fuente: [www.monografias.com/transductores de temperatura](http://www.monografias.com/transductores-de-temperatura)

3.2 Medidas de caudal

3.2.1 Medidores volumétricos

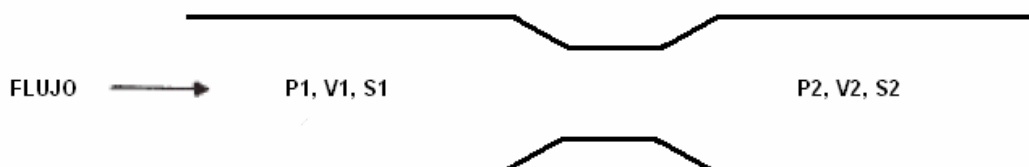
Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido, bien sea directamente (desplazamiento), o indirectamente por deducción (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

Hay que señalar que la medida del caudal volumétrico en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran la placa de orificio o diafragma, la tobera y el tubo Venturi.

3.2.2 Instrumentos de presión diferencial

El funcionamiento de los medidores de flujo por presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli (altura cinética + altura de presión + altura potencial = cte) a una tubería horizontal como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Principio de medición de flujo por presión diferencial



Si P_1 , P_2 y V_1 , V_2 son las presiones absolutas y velocidades en la zona anterior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contraída respectivamente, y S_1 , S_2 son las secciones correspondientes, resulta:

$$S_1V_1 = S_2V_2$$

siendo γ la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que no varía en toda la longitud estudiada de la vena.

Después de operar matemáticamente las expresiones anteriores para relacionarlas, se puede llegar a la siguiente fórmula:

$$Q_v = K\sqrt{H}$$

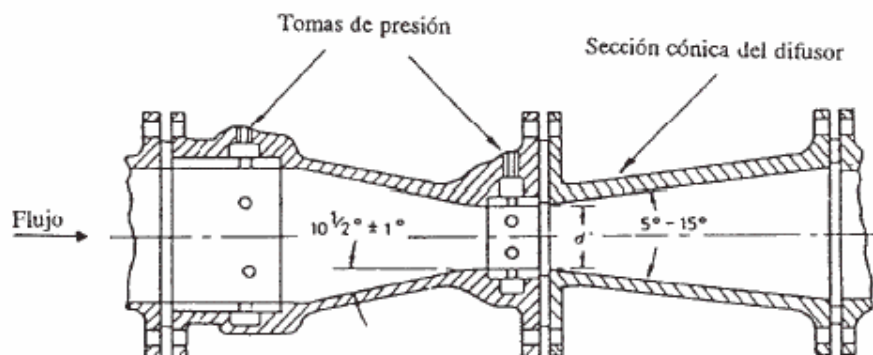
en la que H es la diferencia de alturas de presión del fluido, y K es una constante que involucra el diámetro de la tubería en metros, la altura h , P_1 y P_2 en pascal, y la densidad en Kg/m^3 . Estas expresiones están limitadas a fluidos ideales incompresibles, y son bastante aproximadas. En la práctica se consideran factores de corrección que tienen en cuenta el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, el estado del líquido, del gas, del vapor, etc.

El principio básico de estos medidores es que cuando una corriente de fluido se restringe, su presión disminuye por una cantidad que depende de la velocidad de flujo a través de la restricción, por lo tanto la diferencia de presión entre los puntos antes y después de la restricción puede utilizarse para indicar la velocidad del flujo. Los tipos más comunes de medidores de presión diferencial son el tubo Venturi, la placa orificio y el tubo de flujo.

3.2.2.1 Tubo de Venturi

El Tubo de Venturi es un dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido como se muestra en la figura 13. En esencia, éste es una tubería corta recta, o garganta, entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; así, al colocar un manómetro o instrumento registrador en la garganta se puede medir la caída de presión y calcular el caudal instantáneo.

Figura 13. Tubo Venturi



Fuente: Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, Universidad Nacional de la Pampa, pág. 3

Se destacan tres partes fundamentales:

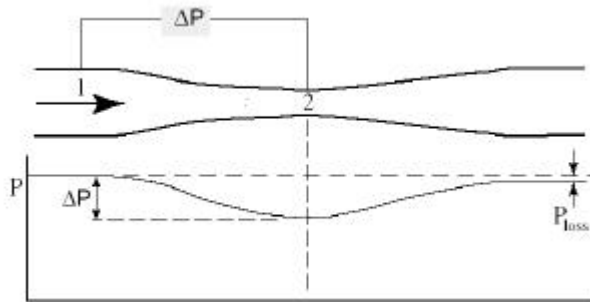
- Una sección aguas arriba de igual diámetro que la tubería y provista de una abertura que permita colocar algún implemento (por ejemplo sensor de presión) que mida la presión estática p_1 en esa sección;
- Una sección de entrada cónica convergente (la sección transversal disminuye, entonces la velocidad del fluido aumenta y la presión disminuye)
- Una sección cilíndrica en la que se sitúa la toma de baja presión p_2 , y donde la velocidad del fluido se mantiene prácticamente constante.
- Sección de salida cónica divergente en la que la sección transversal aumenta hasta alcanzar el diámetro original de la tubería, disminuyendo la velocidad y aumentando la presión. La incorporación de esta sección de salida permite una recuperación de la mayor parte de la presión diferencial producida y, por lo tanto, ahorro de energía.

Para que se obtengan resultados precisos, el tubo Venturi debe estar precedido por una longitud de al menos 10 veces el diámetro de la tubería.

La diferencia de presión ΔP es medida entre la condición sin perturbación aguas arriba (1) y la garganta (2). La relación típica de radios es $d_2/d_1=0.5$.

Por las pérdidas debido a fricción en la cañería se tiene una pérdida permanente, P_{loss} que es típicamente 10%-20% de ΔP .

Figura 14. Medición en un Venturi



Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 4

Las presiones en la sección aguas arriba y en la garganta son presiones reales, por lo tanto es necesario considerar las pérdidas en la ecuación de conservación de energía. Si aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 (sección aguas arriba) y 2 (garganta), teniendo en cuenta que la pérdida de energía debida a la diferencia de altura ($z_1 - z_2$) es despreciable tenemos:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - h = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

donde v_1 y v_2 son valores de velocidad media en las secciones 1 y 2 respectivamente y h es la pérdida de energía. Al aplicar la ecuación de continuidad tenemos:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

Puesto que $Q = A_2 v_2$, despreciando pérdidas h obtenemos en un primer paso la ecuación característica del medidor que está basada en la ecuación de Bernoulli para flujo incompresible ideal:

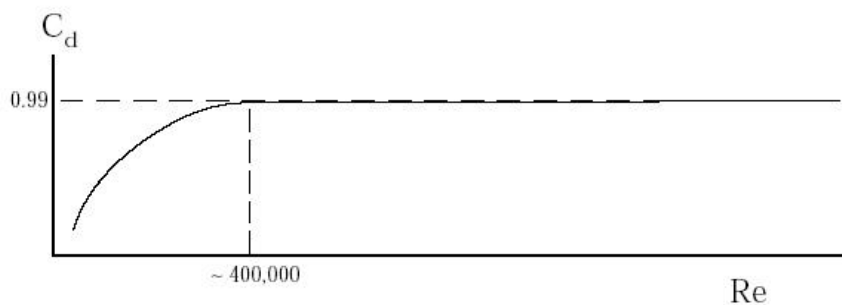
$$Q_{\text{ideal}} = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

donde A representa el área transversal y ρ es la densidad del fluido. En el caso real con pérdidas, lo cual implica flujo real, Q , se tiene:

$$Q_{\text{real}} = C_d \cdot Q_{\text{ideal}}$$

donde C_d es el coeficiente de descarga. C_d se obtiene por calibración. Una variación típica de C_d se muestra en la figura que sigue:

Figura 15. Curva del coeficiente de descarga C_d

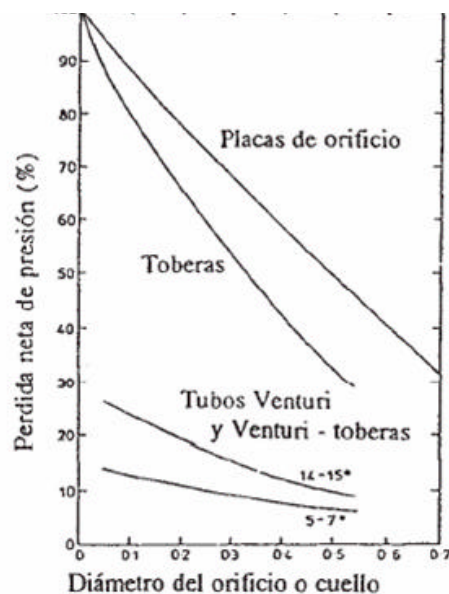


Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 5

Si el C_d es cercano a 1, indica que las pérdidas son pequeñas. C_d es aproximadamente constante cuando el número de Reynolds ($Re = U d_2 / \nu$) está por encima de un valor crítico. Ese es el rango de operación normal del medidor.

Por debajo de ese valor crítico de Re , donde los efectos viscosos comienzan a ser más importantes, C_d varía. El C_d es relativamente independiente de la relación de áreas o del tamaño del Venturi. En la figura que sigue se muestra una comparación entre varios elementos de presión diferencial con respecto a la recuperación de presión.

Figura 16. Comparación de diferentes dispositivos de presión diferencial



Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 6

Las principales limitaciones de los Venturi son su elevado costo y la longitud necesaria para su instalación, sobre todo para grandes tamaños de tubería. Sin embargo, debido a su baja pérdida de carga, son justificados en casos donde tienen que bombearse grandes cantidades de líquido en forma continua. Cuando la pérdida de carga no es importante, se sustituye por una placa orificio debido a su menor coste y su mayor facilidad de instalación y mantenimiento.

En general, las características deseables de un medidor de flujo son que tenga una calibración confiable y reproducible o introduzca una pérdida de energía pequeña en el sistema o de bajo costo o requiera un espacio mínimo.

El medidor Venturi cumple los dos primeros requisitos y el medidor de placa orificio cumple los dos últimos. Los tipos más baratos de medidor de flujo son los de placa orificio. También son fáciles de instalar, ya que la placa orificio simplemente se instala entre las bridas de la tubería.

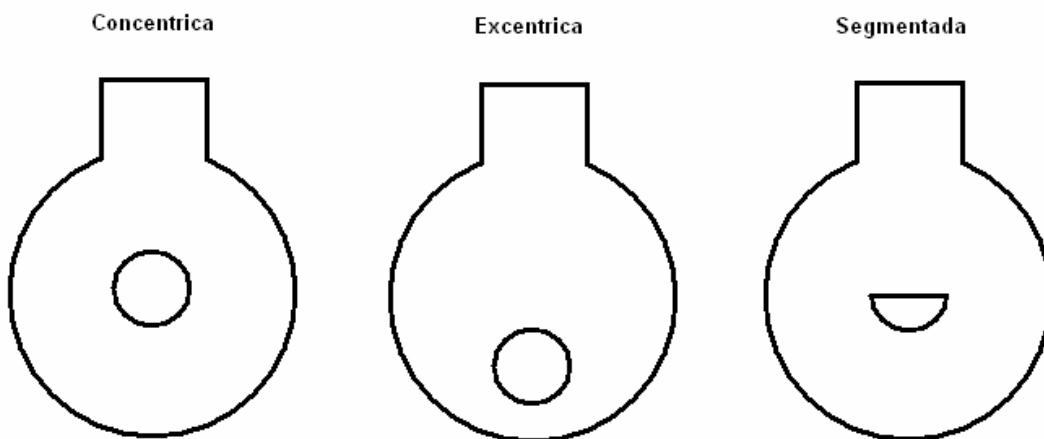
3.2.2.2 Placa de orificio

Cuando dicha placa se coloca en forma concéntrica dentro de una tubería, esta provoca que el flujo se contraiga de repente conforme se aproxima al orificio y después se expande de repente al diámetro total de la tubería. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta y la rápida velocidad del flujo resulta en una disminución de presión hacia abajo desde el orificio.

El valor real del coeficiente de descarga C depende de la ubicación de las ramificaciones de presión, igualmente es afectado por las variaciones en la geometría de la orilla del orificio. El valor de C es más bajo que el del tubo

venturi o la boquilla de flujo puesto que el fluido se fuerza a realizar una contracción repentina seguida de una expansión repentina. Algunos tipos de placas de orificio se muestran en la siguiente figura:

Figura 17. Distintos tipos de placas de orificio



Algunas de las características principales de las placas de orificio son:

Reproducibles, fáciles de instalar y desmontar y de que se consigue con ellas un alto grado de exactitud. Además que no retienen muchas partículas suspendidas en el fluido dentro del orificio.

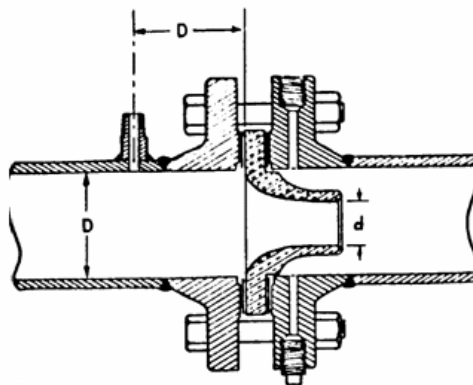
El uso de la placa de orificio es inadecuado en la medición de fluidos con sólidos en suspensión pues estas partículas se pueden acumular en la entrada de la placa., el comportamiento en su uso con fluidos viscosos es errático pues la placa se calcula para una temperatura y una viscosidad dada y produce las mayores pérdidas de presión en comparación con los otros elementos primarios.

Las mayores desventajas de este medidor son su capacidad limitada y la pérdida de carga ocasionada tanto por los residuos del fluido como por las pérdidas de energía que se producen cuando se forman vórtices a la salida del orificio y además la pérdida de vida útil debido a la desaparición del filo.

3.2.2.3 Boquilla o tobera de flujo

Es una contracción gradual de la corriente de flujo seguida de una sección cilíndrica recta y corta como se muestra en la figura 18. Debido a la contracción pareja y gradual, existe una pérdida muy pequeña. A grandes valores de Reynolds (106) C es superior a 0.99.

Figura 18. Boquilla o tobera de flujo



Fuente: www.monografias.com/Medidores de Flujo

La tobera de flujo es un instrumento de medición que permite medir diferencial de presiones cuando la relación de β , es demasiado alta para la placa de orificio, esto es, cuando la velocidad del flujo es mucho mayor y las pérdidas empiezan a hacerse notorias.

Luego, al instalar un medidor de este tipo se logran mediciones más exactas. Además este tipo de medidor es útil para fluidos con muchas partículas en suspensión o sedimentos, su forma hidrodinámica evita que sedimentos transportados por el fluido queden adheridos a la tobera.

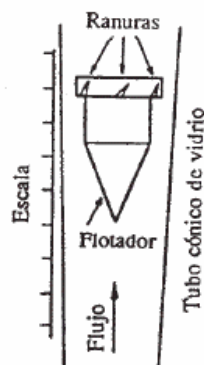
La instalación de este medidor requiere que la tubería donde se vaya a medir el caudal, este en línea recta sin importar la orientación que esta tenga.

Recuperación de la presión: La caída de presión es proporcional a la pérdida de energía. La cuidadosa alineación del tubo Venturi y la expansión gradual larga después de la garganta provoca un muy pequeño exceso de turbulencia en la corriente de flujo. Por lo tanto, la pérdida de energía es baja y la recuperación de presión es alta. La falta de una expansión gradual provoca que la boquilla tenga una recuperación de presión más baja, mientras que la correspondiente al orificio es aún más baja. La mejor recuperación de presión se obtiene en el tubo de flujo.

3.2.3 Medidores de área variable (rotámetros)

Funcionan sobre la base de mantener una presión diferencial constante, permitiendo aumentar el área eficaz de flujo con el caudal. El más utilizado es el que está formado por un tubo cónico de eje vertical y un flotador como se muestra en la figura 19. El fluido circula en sentido ascendente por el tubo desplazando un flotador que, habitualmente, lleva unas ranuras que dan lugar a que el flotador gire, proporcionándole estabilidad y el efecto de centrado necesario. Esta rotación es la que ha dado origen al nombre de rotámetro.

Figura 19. Rotámetro de tubo de vidrio cónico y flotador



Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 13

Cuando no hay flujo el flotador descansa en la parte baja del tubo, pero al pasar el fluido hace ascender el flotador de su posición de reposo, a fin de mantener la caída de presión a través del flotador en equilibrio con los efectos de empuje hidrostático y gravitatorio que actúan sobre el mismo. Puesto que el peso del flotador sumergido es una constante para un fluido dado, la caída de

presión también tiene que permanecer constante. Por consiguiente, cuando el caudal aumenta, el flotador ascenderá en el tubo con el fin de proporcionar una sección anular de paso mayor, para que el fluido pueda pasar a través de ella.

La altura que alcanza el flotador es así una indicación del caudal que está pasando y, en el caso de tratarse de un tubo transparente, puede graduarse directamente sobre el tubo en unidades de caudal. Cuando las condiciones de trabajo son más severas, el tubo se fabrica de metal.

La precisión que puede conseguirse con los medidores de área variable no suele ser mejor que $\pm 2\%$ de desviación a plena escala, por lo que nos son aconsejables cuando se requiere una elevada precisión.

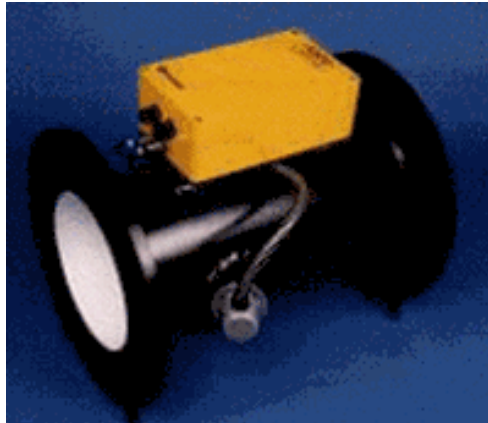
3.2.4 Medidores ultrasónicos

Constan de unas sondas, que trabajan por pares, como emisor y receptor. La placa piezo-cerámica de una de las sondas es excitada por un impulso de tensión, generándose un impulso ultrasónico que se propaga a través del medio líquido a medir, esta señal es recibida en el lado opuesto de la conducción por la segunda sonda que lo transforma en una señal eléctrica.

El convertidor de medida determina los tiempos de propagación del sonido en sentido y contrasentido del flujo en un medio líquido y calcula su velocidad de circulación a partir de ambos tiempos. Y a partir de la velocidad se determina el caudal que además necesita alimentación eléctrica.

En la siguiente figura se muestra un moderno medidor de flujo ultrasónico para montaje en tubería.

Figura 20. Medidor de flujo ultrasónico para montaje en tubería

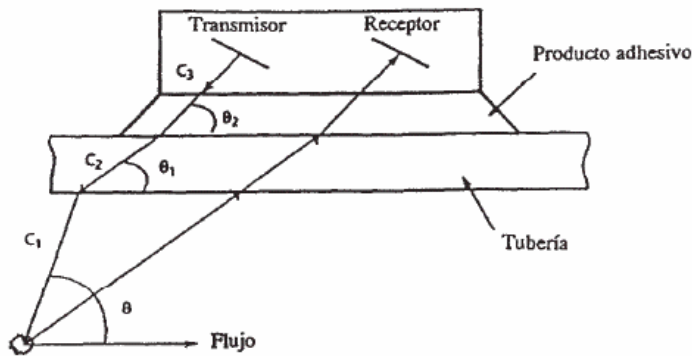


Fuente: www.omegaengineering.com

3.2.4.1 Medidores tipo Doppler

Miden los cambios de frecuencia causados por el flujo del líquido. Se colocan dos sensores cada uno a un lado del flujo a medir y se envía una señal de frecuencia conocida a través del líquido como se muestra en la figura 21. Sólidos, burbujas y discontinuidades en el líquido harán que el pulso enviado se refleje, pero como el líquido que causa la reflexión se está moviendo la frecuencia del pulso que retorna también cambia y ese cambio de frecuencia será proporcional a la velocidad del líquido.

Figura 21. Cabezal individual transmisor/receptor de un medidor tipo Doppler



Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 25

3.2.4.2 Medidores de tiempo de Tránsito

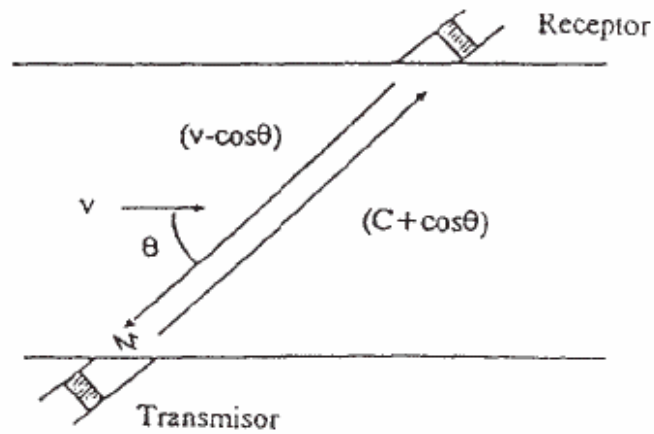
Tienen transductores colocados a ambos lados del flujo. Su configuración es tal que las ondas de sonido viajan entre los dispositivos con una inclinación de 45 grados respecto a la dirección de flujo del líquido.

La velocidad de la señal que viaja entre los transductores aumenta o disminuye con la dirección de transmisión y con la velocidad del líquido que está siendo medido se tendrán dos señales que viajan por el mismo elemento, una a favor de la corriente y otra en contra de manera que las señales no llegan al mismo tiempo a los dos receptores.

Se puede hallar una relación diferencial del flujo con el tiempo transmitiendo la señal alternativamente en ambas direcciones. La medida del

flujo se realiza determinando el tiempo que tardan las señales en viajar por el flujo como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Funcionamiento de medidor de flujo de tiempo de tránsito



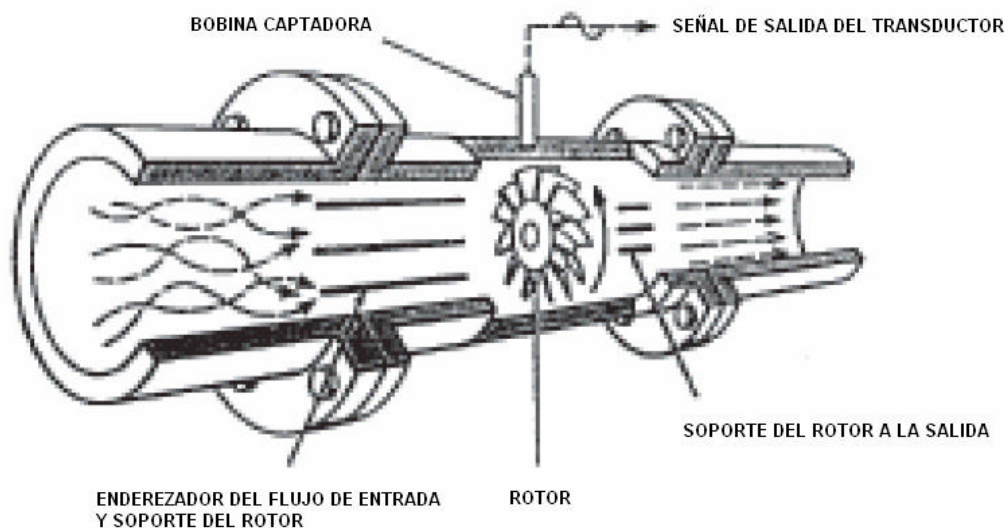
Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 24

3.2.5 Turbinas

Los medidores para gas y para líquido funcionan bajo el mismo principio. La figura 23 muestra la sección transversal de un medidor de turbina típico para líquidos. Consta de una longitud de tubería en el centro de la cual hay un rotor

de paletas múltiple, montado sobre cojinetes, para que pueda girar con facilidad, y soportada arriba y abajo por un dispositivo de centrado tipo cruceta que, habitualmente, incorpora un enderezador de la vena fluida. La energía cinética del fluido circulando hace girar el rotor con una velocidad angular que, en el margen lineal del medidor, es proporcional a la velocidad media axial del fluido, y por lo tanto, al caudal volumétrico.

Figura 23. Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos

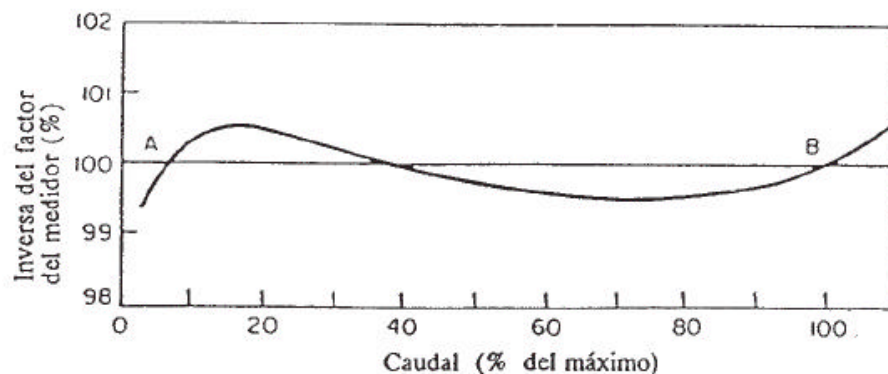


Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 21

Los medidores de turbina para gas o líquido difieren fundamentalmente en el diseño del rotor. Una salida mediante impulsos eléctricos se produce cuando se detecta el paso de cada paleta alrededor de uno o más sensores situados en el campo del medidor. El punto más débil en un medidor de turbina para líquidos son los cojinetes, ya que tienen que soportar el peso del rotor.

3.2.5.1 Características del comportamiento

Figura 24. Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos



Fuente: Universidad Nacional de la Pampa, Material de Laboratorio de Mecánica de los fluidos, pág. 22

Para predecir la característica de comportamiento de un medidor de turbina es necesario que sea calibrado, de modo que la relación entre el número de impulsos emitidos y el volumen de fluido que ha pasado pueda determinarse experimentalmente. Esto da como resultado una curva de calibración de la forma mostrada en la figura anterior.

Se puede estimar que en el margen entre los puntos A y B el medidor de turbina tiene una salida lineal y el volumen de líquido que pasa a través del medidor es casi proporcional al número de impulsos recibidos, dejando de ser preciso para caudales inferiores al punto A y superiores al B.

3.2.6 Medidores magnéticos

Los medidores de flujo magnético están diseñados para medir el flujo de líquidos eléctricamente conductivos (típicamente con una conductividad mayor a 20 $\mu\text{S/cm}$) en una tubería cerrada. Son comúnmente utilizados para mediciones volumétricas, y han estado disponibles desde mediados de los años 50 y están disponibles en dimensiones de 1/25 a 96 pulgadas.

3.2.6.1 Principio de operación

Los medidores de flujo magnético funcionan en base al principio de la ley de inducción electromagnética de Faraday la cual esta definida por:

$$E_s = \frac{1}{C} BVD$$

En donde:

E_s = Voltaje inducido en el electrodo

B = Densidad de campo magnético

V = Velocidad del líquido

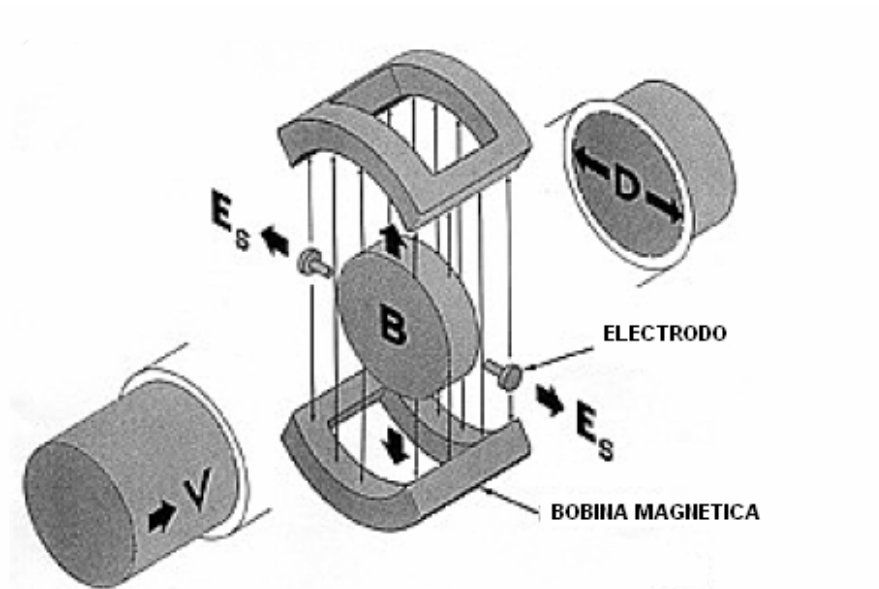
D = Diámetro de tubería del medidor de flujo magnético (longitud del conductor)

C = Constante adimensional

La ecuación definida anteriormente indica que, esencialmente, un voltaje es generado cuando se pasa un conductor por un campo magnético. Además indica que el voltaje generado es proporcional a la densidad del campo magnético, y a la longitud del conductor moviéndose a través del campo no hay nada en la ecuación que involucre temperatura, presión, densidad, o viscosidad porque el medidor de flujo genera su señal independientemente de estos parámetros.

En la construcción convencional de un medidor de flujo magnético, las bobinas están montadas en la parte de afuera de una sección de tubería no magnética. Las bobinas son típicamente alimentadas por una señal de pulsos de DC de 7.5 a 15 Hz. Mientras la corriente pasa a través de las bobinas, un campo magnético es generado en el interior de la tubería. Los líquidos que pasan a través de la sección de la tubería del medidor, son perpendiculares al plano del campo magnético, lo cual se ilustra en la figura 25.

Figura 25. Principio de medición de medidores de flujo electromagnéticos



Fuente: ABB Instrumentation, Technical Information 10D-14, pág. 1

Cuando un líquido conductor fluye a través del tubo del medidor un voltaje es generado, el cual es proporcional a la tasa de flujo. El voltaje es extraído a través de un par de electrodos que están instalados en lados opuestos de la tubería. Cuando la tubería esta construida de un material conductor como el acero inoxidable, esta forrada con un material no conductor para aislar la tubería de los electrodos, y de esa forma prevenir que el flujo de voltaje se pierda en la sección de tubería.

La densidad de flujo magnético es fija para cada tamaño de medidor de flujo magnético. La longitud del conductor es esencialmente la distancia entre los electrodos y también es fija para cada tamaño de medidor, por lo que la única variable que queda en la ecuación es la de la velocidad del fluido.

Consecuentemente se puede decir que los medidores de flujo magnético son dispositivos de medición de velocidad. Se debe notar que la longitud del conductor no es solamente la distancia en línea recta que separa los electrodos, sino la suma de un infinito número de conductores que forma el área seccional de la tubería en los electrodos.

3.2.7 Medidores de caudal másico

La Medición de flujo másico se puede realizar mediante una serie de elementos entre los cuales figuran:

- Medidores Térmicos.
- Medidores de Momento Angular.
- Medidores por Frecuencia Natural de Oscilación.

3.2.7.1 Medidores térmicos

Se basan en el principio que establece que un cuerpo se calienta al pasar cerca de otro cuerpo a mayor temperatura. El sistema consiste en un manta de

calentamiento aplicada en la parte exterior de la tubería que proporciona calor constante, y dos termopars conectadas aguas arriba y aguas abajo de dicha manta; cuando el caudal sea bajo, la transferencia de calor será más efectiva.

3.2.7.2 Medidores de momento angular

Se basan en el principio de conservación del momento de los fluidos; éstos constan generalmente de una turbina que se encuentra acoplada a un medidor del momento angular. En términos comunes se puede decir, que el momento así medido será directamente proporcional al caudal de masa del fluido.

3.2.7.3 Medidores por frecuencia natural de oscilación

Medidor de caudal de masa directo que trabaja mediante el efecto que tienen las oscilaciones de frecuencia natural de vibración con respecto al caudal de masa que pasa por un tramo de tubería que está construido con materiales de buena elasticidad y de una forma geométrica muy particular.

La medición directa de la masa de flujo evita la necesidad de utilizar cálculos complejos y como estándar fundamental de medición, la masa no deriva sus unidades de otra fuente ni se ve afectada por variaciones de temperatura o presión; tal constancia hace a la masa, la propiedad ideal para

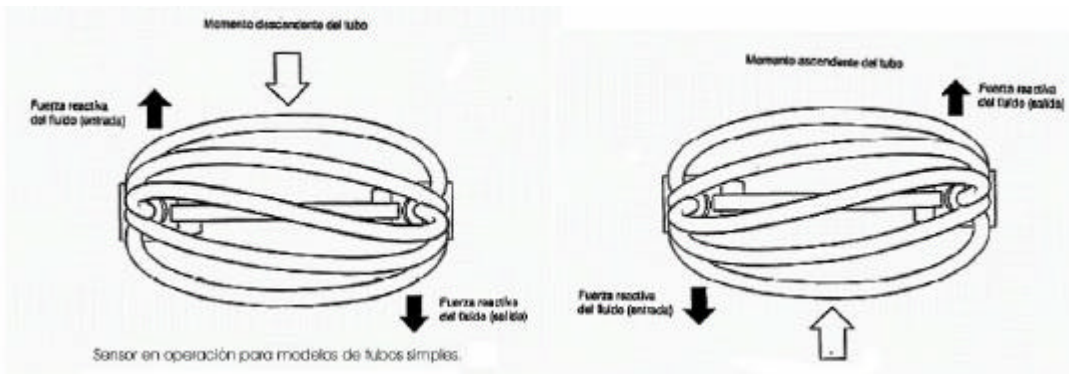
medir. El primer medidor de flujo másico (MFM) fue desarrollado por la compañía *Micro Motion*, y funciona según el principio Coriolis.

El medidor de Coriolis se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795- 1843) que observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal V a través de una superficie giratoria que gira con velocidad angular constante w , experimenta una velocidad tangencial (velocidad angular \times radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración, que es precisamente la aceleración de Coriolis. Este fenómeno es el causante de que el remolino que se forma en el fondo de un depósito al vaciarlo, gira a derechas en el hemisferio Norte y a izquierdas en el hemisferio Sur. Asimismo todos los vientos de la circulación general que soplan desde el Norte al Sur en el hemisferio Norte son desviados, debido a la rotación de la Tierra de Oeste a este, constituyendo los vientos predominantes de oeste. Por otro lado, el célebre péndulo de Foucault demuestra también el fenómeno.

3.2.7.4 Principios de operación

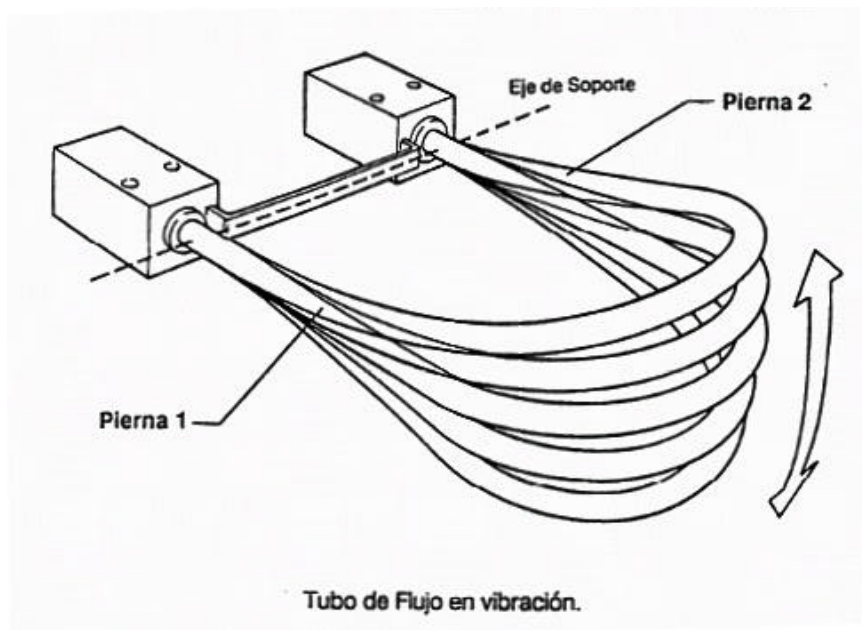
Todos los medidores de flujo másico trabajan bajo el mismo principio que consiste en la aplicación de la segunda ley de Newton: “fuerza es igual a masa por aceleración“ ($F= m.a$). Esta ley es utilizada para determinar la cantidad exacta de masa que fluye a través del medidor. Dentro de la Unidad Sensora, los tubos de flujo se han diseñado para vibrar a su frecuencia natural con respaldo de un sistema electromagnético como se muestra en las figuras 26 y 27. Esta vibración tiene una amplitud que es aproximadamente menor a 1 mm, y frecuencia entre 40 y 120 Hz dependiendo del tamaño del medidor.

Figura 26. Principios de operación de los medidores de flujo másico



Fuente: www.wikipedia.com/medidores de flujo masico

Figura 27. Tubo de flujo en vibración



Fuente: www.wikipedia.com/medidores de flujo masico

La masa correspondiente a cierto flujo, adquiere una velocidad lineal al fluir a través del tubo. Las vibraciones de éste sobre un eje (eje de soporte) resultan perpendiculares al flujo y hacen que el mismo acelere en el extremo de entrada y desacelere en el de salida, causando que el tubo se doble. Esto se puede analizar de manera más sencilla y detallada a continuación: En primer lugar, imaginemos al tubo de flujo como un par de piernas, pierna 1 por donde entra el flujo y pierna 2 por donde sale.

El flujo entra al tubo por la pierna con una velocidad horizontal paralela a éste, pero al momento y por efecto de la vibración que es máxima al final de la pierna un poco antes del doblez, se le induce una velocidad vertical y en consecuencia, una fuerza reactiva del flujo se opone a la acción del tubo creándose un desequilibrio de éste que a manera de compensarlo y por efecto del flujo saliente, causa que la segunda pierna se deforme con una fuerza igual en magnitud y en sentido opuesto a la pierna 1. Al momento de salida, esa velocidad vertical comienza a disminuir progresivamente debido a que la vibración se va haciendo nula justamente antes de abandonar la segunda pierna.

La fuerza de torsión inducida por el flujo crea un efecto llamado Coriolis que es proporcional a la rata de flujo másico. Este efecto constituye la fuerza utilizada para la detección de la masa de flujo.

3.2.8 Comparación de características de los medidores de caudal

En la tabla siguiente se muestra la comparación de las características de los medidores de flujo para una correcta selección de los mismos.

Tabla II. Comparación de distintos sensores de flujo

COMPARATIVA DE LOS DISTINTOS SENSORES DE FLUJO						
Sensor de flujo	Líquidos recomendados	Pérdida de presión	Exactitud típica en %	Medidas y diámetros	Efecto viscoso	Coste Relativo
Orificio	Líquidos sucios y limpios; algunos líquidos viscosos	Medio	± 2 a ± 4 of full scale	10 a 30	Alto	Bajo
Tubo Venturi	Líquidos viscosos, sucios y limpios	Bajo	± 1	5 a 20	Alto	Medio
Tubo Pitot	Líquidos limpios	Muy bajo	± 3 a ± 5	20 a 30	Bajo	Bajo
Turbina	Líquidos limpios y viscosos	Alto	± 0.25	5 a 10	Alto	Alto
Sensor de flujo	Líquidos recomendados	Pérdida de presión	Exactitud típica en %	Medidas y diámetros	Efecto viscoso	Coste Relativo
Electromagnet.	Líquidos sucios y limpios; líquidos viscosos y conductores	No	± 0.5	5	No	Alto
Ultrasonic. (Doppler)	Líquidos sucios y líquidos viscosos	No	± 5	5 a 30	No	Alto
Ultrasonic. (Time-of-travel)	Líquidos limpios y líquidos viscosos	No	± 1 a ± 5	5 a 30	No	Alto

3.3 Medición de nivel

3.3.1 Introducción

Dentro de los procesos industriales la medición y el control de nivel se hace necesario cuando se pretende tener una producción continua, cuando se desea mantener una presión hidrostática, cuando un proceso requiere de control y medición de volúmenes de líquidos ó; bien en el caso más simple, para evitar que un líquido se derrame, la medición de nivel de líquidos, dentro de un recipiente parece sencilla, pero puede convertirse en un problema más ó menos difícil, sobre todo cuando el material es corrosivo ó abrasivo, cuando se mantiene a altas presiones, cuando es radioactivo ó cuando se encuentra en un recipiente sellado en el que no conviene tener partes móviles ó cuando es prácticamente imposible mantenerlas, el control de nivel entre dos puntos, uno alto y otro bajo, es una de las aplicaciones más comunes de los instrumentos para controlar y medir el nivel, los niveles se pueden medir y mantener mediante dispositivos mecánicos de caída de presión, eléctricos y electrónicos.

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

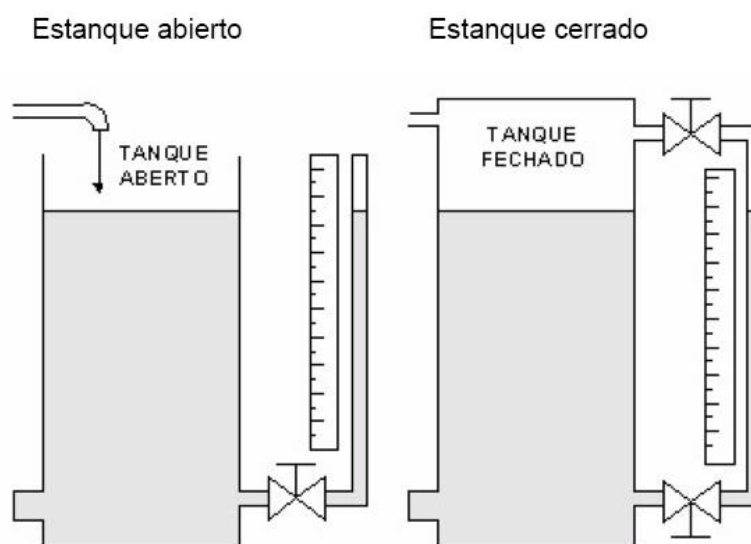
3.3.2 Instrumentos de medida directa

3.3.2.1 Medidor de sonda

Consiste en una varilla o regla graduada, de la longitud conveniente para introducirla dentro del depósito. La determinación del nivel se efectúa por la lectura directa de la longitud mojada por el líquido. En el momento de la lectura el estanque debe estar abierto a presión atmosférica.

Se utiliza generalmente en estanques de gasolina. Otro medidor consiste en una varilla graduada, con un gancho que se sumerge en el seno del líquido y se levanta después hasta que el gancho rompe la superficie del líquido. La distancia desde esta superficie hasta la parte superior del estanque representa indirectamente el nivel como se muestra en la figura 28. Se emplea en estanques de agua a presión atmosférica.

Figura 28. Medidor de sonda



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 4

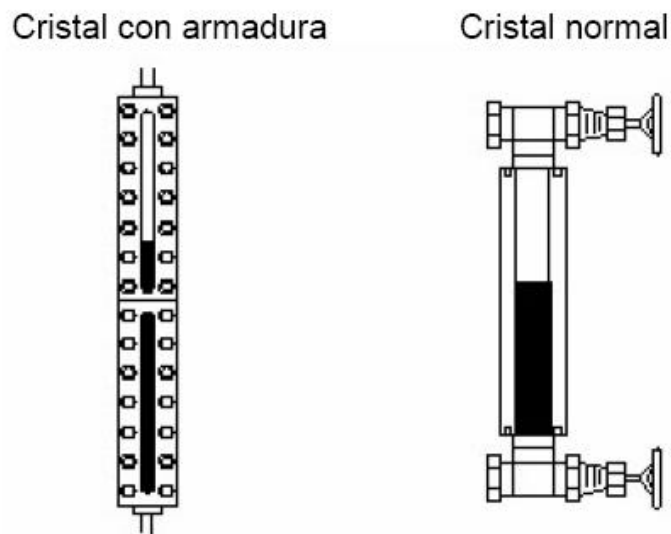
3.3.2.2 Medidor de cinta y plomada

Este sistema es parecido a los anteriores, consta de una cinta graduada y un plomo en la punta. Se emplea cuando es difícil que la regla tenga acceso al fondo del estanque.

3.3.2.3 Medidor de cristal

Consiste en un tubo de vidrio con sus extremos conectados a bloques metálicos y cerrados por prensaestopas que están unidos al estanque generalmente mediante tres válvulas, dos de cierre de seguridad en los extremos del tubo para impedir el escape del líquido en caso de rotura del cristal y una de purga como se muestra en la figura 29. El nivel de cristal normal se emplea para presiones hasta 7 bar. A presiones más elevadas el cristal es grueso, de sección rectangular y está protegido por una armadura metálica.

Figura 29. Medidores de nivel de cristal



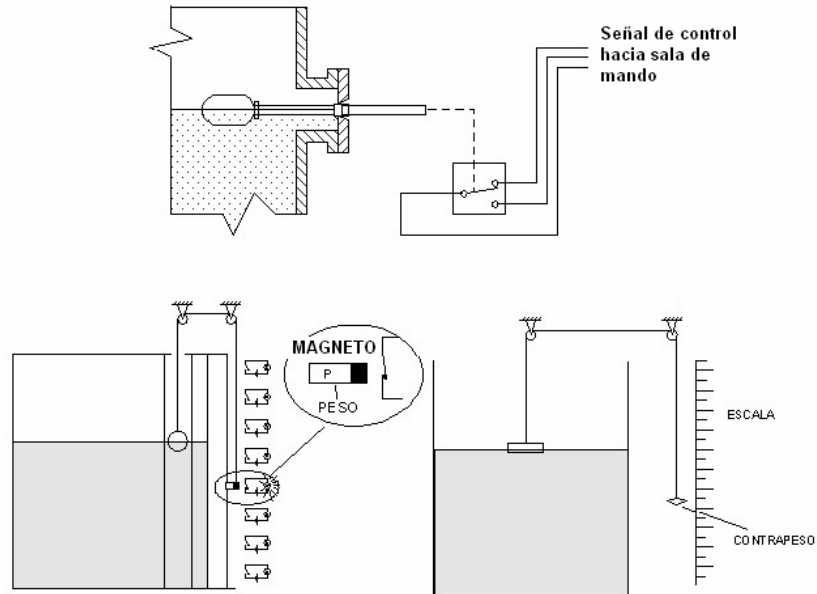
Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 4

3.3.2.4 Medidor de flotador

Consiste en un flotador ubicado en el seno del líquido y conectado al exterior del estanque indicando directamente el nivel sobre una escala graduada. Es el modelo más antiguo y el más utilizado en estanques de gran capacidad tales como los de petróleo y gasolina. Tiene el inconveniente de que las partes móviles están expuestas al fluido y pueden romperse, además el flotador debe mantenerse limpio. Hay que señalar que en estos instrumentos, el flotador puede tener formas muy variadas y estar formados por materiales muy diversos según sea el tipo de fluido.

Los instrumentos de flotador tienen una precisión de 0,5 %. Son adecuados en la medida de niveles en estanques abiertos y cerrados a presión o a vacío, y son independientes del peso específico del líquido. Por otro lado, el flotador puede agarrotarse en el tubo guía por un eventual depósito de los sólidos o cristales que el líquido pueda contener y además los tubos guía muy largos pueden dañarse ante olas bruscas en la superficie del líquido o ante la caída violenta del líquido en el estanque. En la figura siguiente se muestran varias aplicaciones para los instrumentos de flotador.

Figura 30. Diferentes aplicaciones para medidores de nivel por flotador



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 5

3.3.3 Instrumentos basados en la presión hidrostática

3.3.3.1 Medidor manométrico

Consiste en un manómetro conectado directamente a la parte inferior del estanque. El manómetro mide la presión debida a la altura de líquido h que existe entre el nivel del estanque y el eje del instrumento. Así pues, el rango de medida del instrumento corresponderá a:

$$0 - (h \cdot g \cdot \rho)$$

donde,

h = altura de líquido en m

γ = densidad del líquido en Kg/m³

g = 9,8 m/s²

Como las alturas son limitadas, el rango de medida es bastante pequeño, de modo que el manómetro utilizado tiene un elemento de medida del tipo fuelle. El instrumento sólo sirve para fluidos limpios ya que si el líquido es corrosivo, coagula o bien tiene sólidos en suspensión, el fuelle puede destruirse o bien bloquearse perdiendo su elasticidad; por otra parte, como el rango de medida es pequeño no es posible utilizar sellos de diafragma. La medida está limitada a estanques abiertos y el nivel viene influido por las variaciones de densidad del líquido.

3.3.3.2 Medidor de membrana

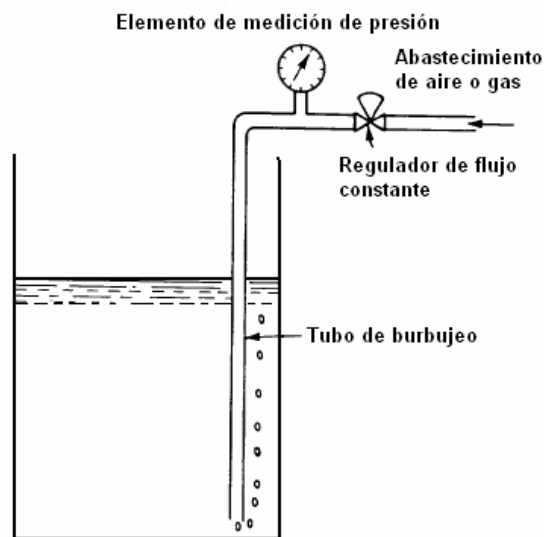
Utiliza una membrana conectada con un tubo estancado al instrumento receptor. La fuerza ejercida por la columna de líquido sobre el área de la membrana comprime el aire interno a una presión igual a la ejercida por la columna de líquido. El instrumento es delicado ya que cualquier pequeña fuga del aire contenido en el diafragma destruiría la calibración del instrumento.

3.3.3.3 Medidor de tipo burbujeo

Mediante un regulador de caudal se hace pasar por un tubo (sumergido en el depósito hasta el nivel mínimo), un pequeño caudal de aire o gas inerte hasta producir una corriente continua de burbujas como se muestra en la figura 31. La presión requerida para producir el flujo continuo de burbujas es una medida de

la columna de líquido. Este sistema es muy ventajoso en aplicaciones con líquidos corrosivos con materiales en suspensión (el fluido no penetra en el medidor, ni en la tubería de conexión).

Figura 31. Medidor de tipo burbujeo



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 6

3.3.3.4 Medidor de presión diferencial

Consiste en un diafragma en contacto con el líquido del estanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del estanque. En un estanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico, es decir: $P = h \gamma g$ en la que:

P = presión

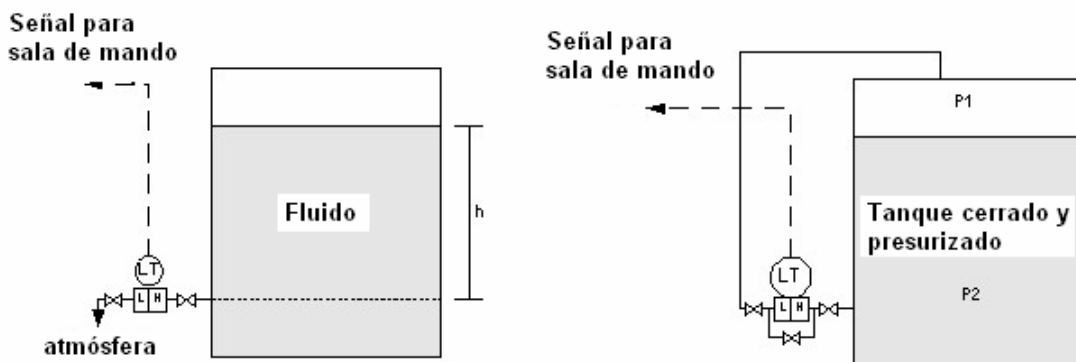
h = altura del líquido sobre el instrumento

γ = densidad del líquido

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico o digital de presión diferencial. En el tipo más utilizado, el diafragma está fijado en una brida que se monta rasante al estanque como se muestra en la figura 32 para permitir sin dificultades la medida de nivel de fluidos, tales como pasta de papel y líquidos con sólidos en suspensión, pudiendo incluso ser de montaje saliente para que el diafragma enrasc completamente con las paredes interiores del estanque tal como ocurre en el caso de líquidos extremadamente viscosos en que no puede admitirse ningún recodo.

Figura 32. Medidores de nivel por presión diferencial



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 7

La precisión de los instrumentos de presión diferencia es de $\pm 0,5\%$ en los neumáticos, $\pm 0,2\%$ a $\pm 0,3\%$ en los electrónicos, y de $\pm 0,15\%$ en los “inteligentes” con señales de salida de 4-20 mA c.c. Hay que señalar que el material del diafragma debe ser el adecuado para resistir la corrosión del fluido (existen materiales de acero inoxidable 316, monel, tantalio, hastelloy B, inoxidable, recubierto de teflón).

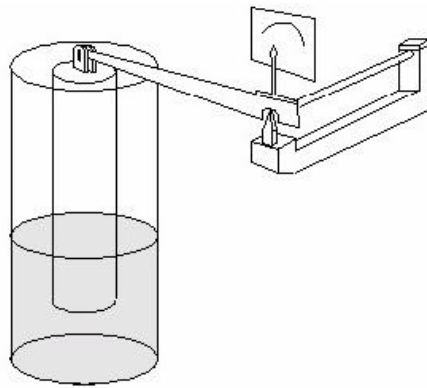
3.3.4 Instrumentos basados en el desplazamiento

3.3.4.1 Medidor de nivel de tipo desplazamiento

Consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al estanque. Dentro del tubo y unido a su extremo libre se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor exterior al estanque. El tubo de torsión se caracteriza fundamentalmente porque el ángulo de rotación de su extremo libre es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

Al aumentar el nivel, el líquido ejerce un empuje sobre el flotador igual al volumen de la parte sumergida multiplicada por la densidad del líquido como se muestra en la figura 33, tendiendo a neutralizar su peso propio, así que el esfuerzo medido por el tubo de torsión será muy pequeño. Por el contrario, al bajar el nivel, menor parte del flotador queda sumergida, y la fuerza de empuje hacia arriba disminuye, resultando una mayor torsión.

Figura 33. Medidor de nivel por desplazamiento



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 8

La precisión es del orden de $\pm 0,5\%$ a $\pm 1\%$ y el intervalo de medida puede variar de 0-300 a 0-2000 mm c. de a. El instrumento puede utilizarse en estanques abiertos y cerrados a presión o a vacío, tiene una buena sensibilidad pero presenta el inconveniente del riesgo de depósitos de sólidos o de crecimiento de cristales en el flotador que afectan a la precisión de la medida y es apto sólo para la medida de pequeñas diferencias de nivel (2000 mm máximo estándar).

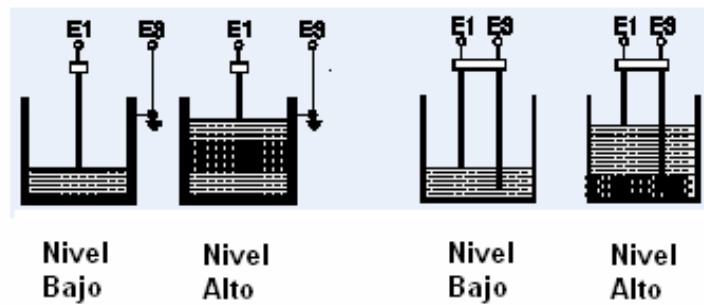
3.3.5 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido

3.3.5.1 El medidor de nivel conductivo o resistivo

Consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor, tal como ocurre, por ejemplo, en el nivel de agua de una caldera de vapor. La impedancia mínima es del orden de los 20 MO/cm, y la tensión de alimentación es alterna para evitar fenómenos de oxidación en las sondas por causa del fenómeno de la electrólisis. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura del orden de los 2 mA; el relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea o bien en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavados eléctricamente en el circuito.

El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad y relés electrónicos para líquidos con baja conductividad como se muestra en la figura 34. Montado en grupos verticales de 24 o más electrodos, puede complementar los típicos niveles de vidrio de las calderas, y se presta a la transmisión del nivel a la sala de control y a la adición de las alarmas correspondientes.

Figura 34. Funcionamiento de medidor de nivel conductivo o resistivo



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 9

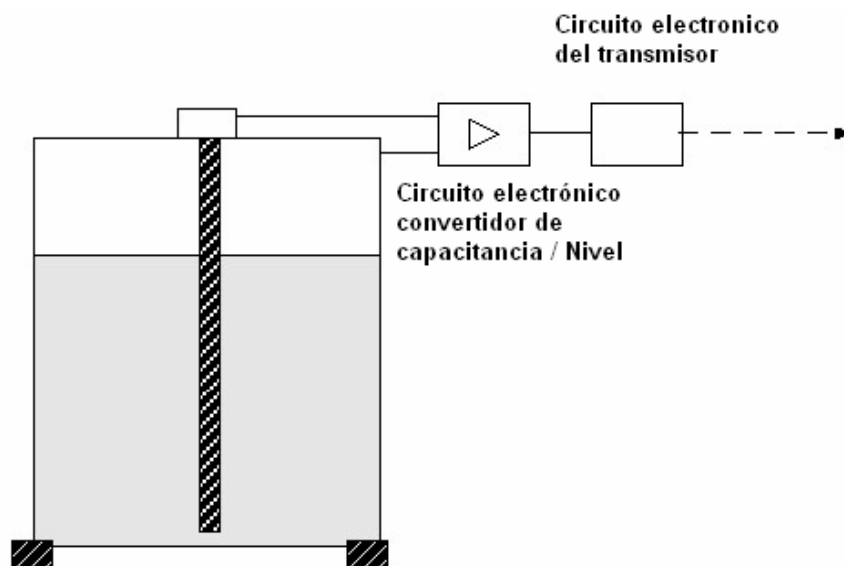
El instrumento es versátil, sin partes móviles, su campo de medida es grande con la limitación física de la longitud de los electrodos. El líquido contenido en el estanque debe tener un mínimo de conductividad y si su naturaleza lo exige, la corriente debe ser baja para evitar la deterioración del producto. Por otro lado, conviene que la sensibilidad del aparato sea ajustable para detectar la presencia de espuma en caso necesario.

3.3.5.2 Medidor de nivel capacitivo

Mide la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del estanque. La capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido.

En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores como se muestra en la figura 35. En fluidos conductores el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

Figura 35. Medidor de nivel capacitivo



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 9

La precisión de los transductores de capacidad es de $\pm 1\%$. Se caracterizan por no tener partes móviles, son ligeros, presentan una buena resistencia a la corrosión y son de fácil limpieza. Su campo de medida es prácticamente ilimitado. Tiene el inconveniente de que la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas (0,1% de aumento de la constante dieléctrica /°C) y de que los posibles contaminantes contenidos en el líquido puedan

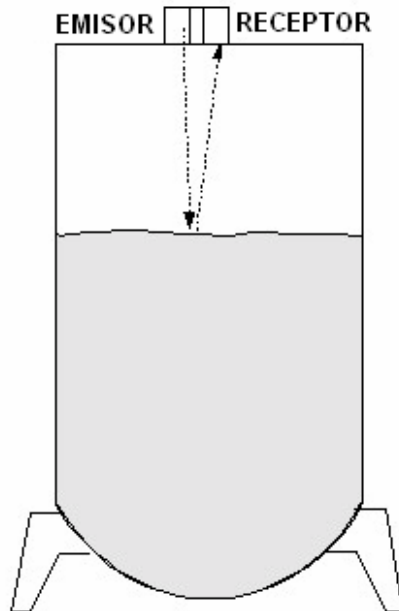
adherirse al electrodo variando su capacidad y falseando la lectura, en particular en el caso de líquidos conductores.

3.3.5.3 Medidor de nivel ultrasónico

Se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor como se muestra en la figura 36. El retardo en la captación del eco depende del nivel del estanque. Los sensores trabajan a una frecuencia de unos 20 KHz. Estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido.

La precisión de estos instrumentos es de ± 1 a 3%. Son adecuados para todos los tipos de estanques y de líquidos o fangos pudiendo construirse a prueba de explosión. Presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos y de dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida como es el caso de un líquido que forme espuma, ya que se producen falsos ecos de los ultrasonidos. La utilización de la computadora permite, a través de un programa, almacenar el perfil ultrasónico del nivel, y así tener en cuenta las características particulares de la superficie del líquido, tal como la espuma, con lo cual se mejora la precisión de la medida.

Figura 36. Medidor de nivel ultrasónico

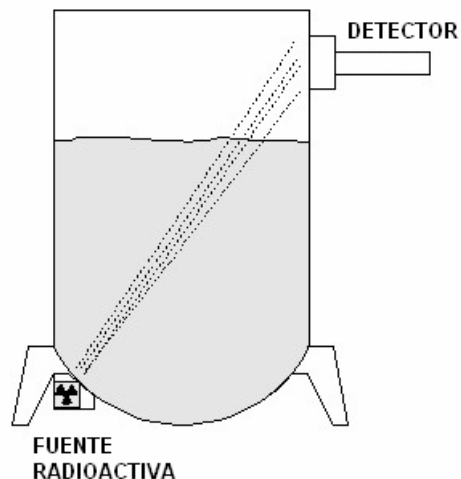


Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 10

3.3.5.4 Sistema de medición de nivel radiactivo

Consiste en un emisor de rayos gamma montado verticalmente en un lado del estanque y con un contador que transforma la radiación gamma recibida en una señal eléctrica de corriente continua. Como la transmisión de los rayos es inversamente proporcional a la masa del líquido en el estanque, la radiación captada por el receptor es inversamente proporcional al nivel del líquido ya que el material absorbe parte de la energía emitida como se muestra en la figura 37.

Figura 37. Sistema de medición de nivel por radiación



Fuente: Cristhian Beltrán Provoste, Medición de nivel, Pág. 11

Los rayos emitidos por la fuente son similares a los rayos X, pero de longitud de onda más corta. La fuente radiactiva pierde igualmente su radiactividad en función exponencial del tiempo. La vida media (es decir, el tiempo necesario para que el emisor pierda la mitad de su actividad) varía según la fuente empleada. En el cobalto 60 es de 5,5 años y en el cesio 137 es de 33 años y en el americio 241 es de 458 años. Las paredes del estanque absorben parte de la radiación y al detector llega sólo un pequeño porcentaje. Los detectores son, en general, detectores de cámara iónica y utilizan amplificadores de c.c. o de c.a. El instrumento dispone de compensación de temperatura, de linearización de la señal de salida, y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación. Como desventajas en su aplicación figuran el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación.

La precisión en la medida es de $\pm 0,5$ a $\pm 2\%$, y el instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos, ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura viene influida por el aire o los gases disueltos en el líquido. El sistema se emplea en caso de medida de nivel en estanques de acceso difícil o peligroso. Es ventajoso cuando existen presiones elevadas en el interior del estanque que impiden el empleo de otros sistemas de medición. Hay que señalar que el sistema es caro y que la instalación no debe ofrecer peligro alguno de contaminación radiactiva siendo necesario señalar debidamente las áreas donde están instalados los instrumentos y realizar inspecciones periódicas de seguridad.

3.4 Medición de variables químicas

3.4.1 Medición de la conductividad

La conductividad electrolítica es la habilidad que tiene un líquido de conducir una corriente eléctrica. Es utilizado en muchas industrias como forma de determinar la calidad del agua o la concentración de una solución química.

3.4.1.1 Principio de medición de la conductividad

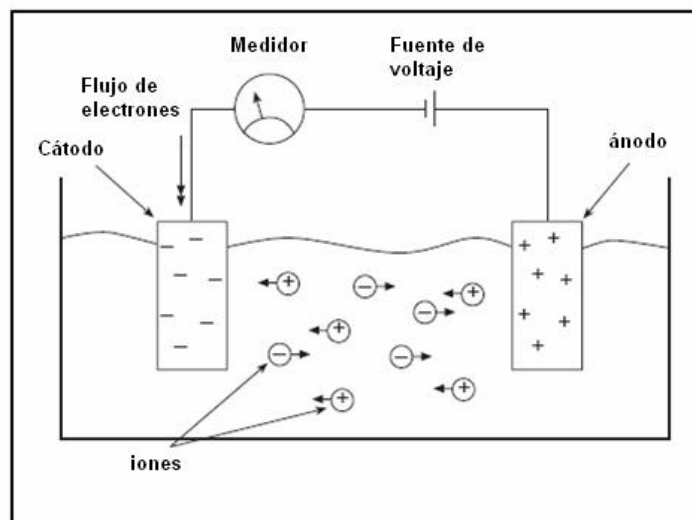
La medición de la conductividad tiene dos requerimientos básicos:

- Una forma de pasar, o inducir, una pequeña corriente alterna a través de un volumen preciso de líquido a ser medido; esta función es realizada por la celda de medición de la conductividad.

- Un instrumento capaz de suministrar alimentación a la celda de medición de la conductividad y medir pequeños cambios en la corriente eléctrica pasando a través de la solución, y con eso operar relés electromecánicos o proporcionando una forma de indicación, registro o transmisión de una corriente proporcional a la conductividad electrolítica.

Brevemente, considerando el mecanismo de conductividad en los líquidos como se muestra en la figura 38. La corriente es transportada por iones, en contraste al flujo de electrones en conductores metálicos. La corriente fluye en electrólitos, con una corriente directa aplicada, decrece rápidamente con el tiempo, parcialmente porque el gas envolviendo o en los electrodos, y con eso reduciendo el área de su superficie efectiva. Este efecto es llamado “polarización”, y debe de ser prevenido antes de que las mediciones de conductividad puedan ser de uso práctico.

Figura 38. Solución acuosa conduciendo

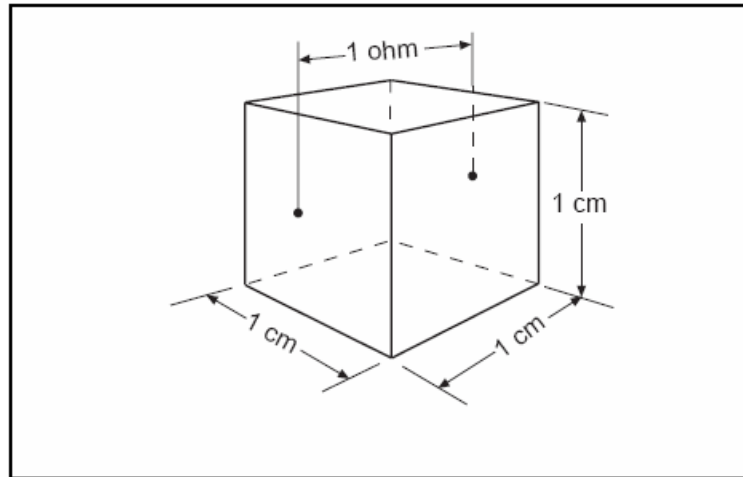


Fuente: ABB *Instrumentation, Electrolytic Conductivity Measurement Technical Note*, Pág. 1

El grado de polarización depende de la magnitud de la densidad de corriente por unidad y el tiempo en el que fluye. En la práctica, las mediciones de conductividad utilizan un potencial alterno muy pequeño (onda seno), dando un flujo de corriente de un minuto en cada dirección por un corto periodo insuficiente para causar un error significativo. Las áreas del electrodo también son mantenidas tan grandes como sea posible para reducir la densidad de corriente por unidad de área.

Para medir la conductividad es necesario, tener un medidor de conductividad y una celda de medición. La celda contiene a los electrodos y proporciona una geometría fija entre los electrodos y la muestra. En vista de la amplia variedad de muestras aplicables para la medición y control por su conductividad, y el amplio rango de conductividades que se pueden medir, muchos tipos de celdas están disponibles con diferentes geometrías, tamaños de electrodo y materiales de las celdas. Como se a mencionado previamente, la conductividad de una solución de muestra es una medida de la concentración de los varios iones cargados en ella; y así mientras los iones se incrementan, también en general la conductividad se incrementa. Esto hace a la conductividad un parámetro más útil para utilizar que su recíproco resistividad. La unidad de medición esta basada en una celda de 1 cm. x 1 cm. x 1 cm. y tiene una resistencia de 1 ohm; y tiene la conductividad equivalente a 1 Siemens como se muestra en la figura 39.

Figura 39. Unidad de medición de conductividad



Fuente: *ABB Instrumentation, Electrolytic Conductivity Measurement Technical Note*, Pág. 1

Por definición, la conductividad de una porción de muestra de una solución entre electrodos esta dada por:

$$G = l/Ra$$

donde **G** es la conductividad en Siemens/cm. (anteriormente llamada Mho)

l es la longitu de de la muestra en cm

a es el área de la sección transversal en cm²

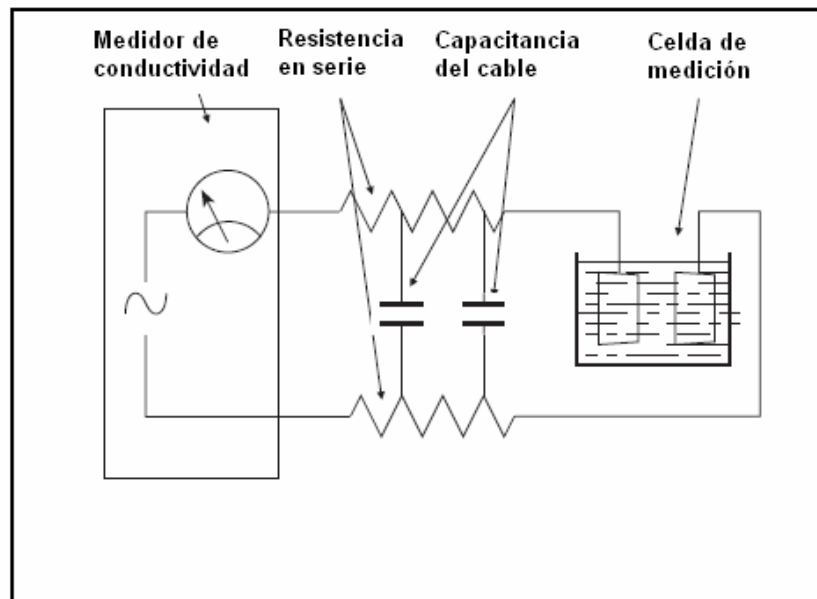
R es la resistencia de la muestra en ohms.

Ya que un Siemens es una medida muy grande de conductividad, es más frecuentemente expresada en micro Siemens/cm. ($\mu\text{S}/\text{cm}$ or $\mu\text{S cm}^{-1}$), aunque milli Siemens/cm (mS/cm or mS cm^{-1}) puede ser usada. La medición también puede estar expresada en metros.

3.4.1.2 Constante de la celda

La medición de la conductividad electrolítica es afectada por dos factores provocados por el cable de conexión entre el medidor de conductividad y la celda de medición (Fig. 40):

Figura 40. Restricción en la resistencia debida al cable de conexión de la celda



Fuente: ABB *Instrumentation, Electrolytic Conductivity Measurement Technical Note*, Pág. 2

a) Resistencia en serie: El efecto es minimizado limitando la medición a un mínimo de 10 ohmios.

b) El uso de voltaje a.c. para realizar la medición de conductividad. Como se menciono previamente, esto es usado para evitar los efectos de la polarización.

La frecuencia de a.c. normalmente utilizada es 70 Hz en instrumentos de rango bajo y 1 kHz en los instrumentos de rango alto. La capacitancia del cable actúa como una impedancia en paralelo a través de la celda. Para minimizar los efectos, la resistencia es limitada a un máximo de 1 M Ω . Esto da un rango de trabajo de 10 Ω a 1 M Ω que corresponde a un rango de conductividad de 100,000 a 1 $\mu\text{S cm}^{-1}$ respectivamente. Desafortunadamente, en general, el rango de conductividad de la mediciones extiende desde 0.05 a 1,000,000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Sin embargo, esto puede ser acomodado ajustando la geometría de la celda, por ejemplo cambiando la longitud del recorrido y el área de sección transversal, pero aún manteniendo la medición basada en 1 cm. Esto da lugar a lo que es conocido como la constante de la celda (K) que esta determinada por la fórmula:

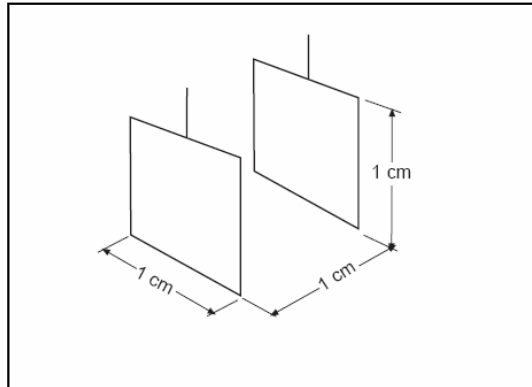
$$K = l/a ,$$

entonces

$$K = 1 \text{ cm} / (1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}) = 1 \text{ cm}^{-1}$$

Dando una constante de celda unitaria, por ejemplo $K = 1.0$, como se muestra en la figura 41.

Figura 41. Representación de una celda de conductividad con una constante (K) de 1.0



Fuente: ABB *Instrumentation, Electrolytic Conductivity Measurement Technical Note*, Pág. 2

Existiendo un rango determinado de constantes de celda, el rango total puede ser acomodado como se muestra en la tabla III.

Tabla III. Constante de las celdas y conductividad

K \ Conductivity*	0.05	0.1	1.0	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
0.05	1MΩ	500kΩ	50kΩ	5kΩ	500Ω	50Ω	5Ω		
0.1	2MΩ	1MΩ	100kΩ	10kΩ	1kΩ	100Ω	10Ω	1Ω	
1.0	20MΩ	10MΩ	1MΩ	100kΩ	10kΩ	1kΩ	100Ω	10Ω	1Ω
10			10MΩ	1MΩ	100kΩ	10kΩ	1kΩ	100Ω	10Ω

* Conductividad (G) expresada en micro Siemens / cm

Fuente: ABB *Instrumentation, Electrolytic Conductivity Measurement Technical Note*, Pág. 2

Tomando la constante de la celda en consideración, la conductividad es calculada por medio de la siguiente fórmula:

$$G = (K \times 10E6) / R$$

si el espacio es reducido por un factor de 10, por ejemplo $l = 0.1$ cm, entonces la constante de la celda se convierte en 0.1 y la resistencia equivalente para una conductividad de $0.1 \mu\text{S cm}^{-1}$ se convierte en $1 \text{ M}\Omega$ que cae dentro del rango de resistencia requerida. Reduciendo el espacio por un factor de 50, por ejemplo $l = 0.05$ cm, entonces la constante de la celda se convierte en 0.05 y la resistencia equivalente para una conductividad de $0.05 \mu\text{S cm}^{-1}$ se convierte en $1 \text{ M}\Omega$ que esta dentro del rango de resistencia requerido. De la misma forma, si el espacio es incrementado por un factor de 10, por ejemplo $l = 10$ cm, entonces la constante de la celda se convierte en 10 y la resistencia equivalente para una conductividad de $1 \mu\text{S cm}^{-1}$ se convierte en $10 \text{ M}\Omega$ que de nuevo cae dentro del rango de resistencia requerido. Se puede ver que cambiando la constante de la celda es posible medir el rango de total de conductividad requerido.

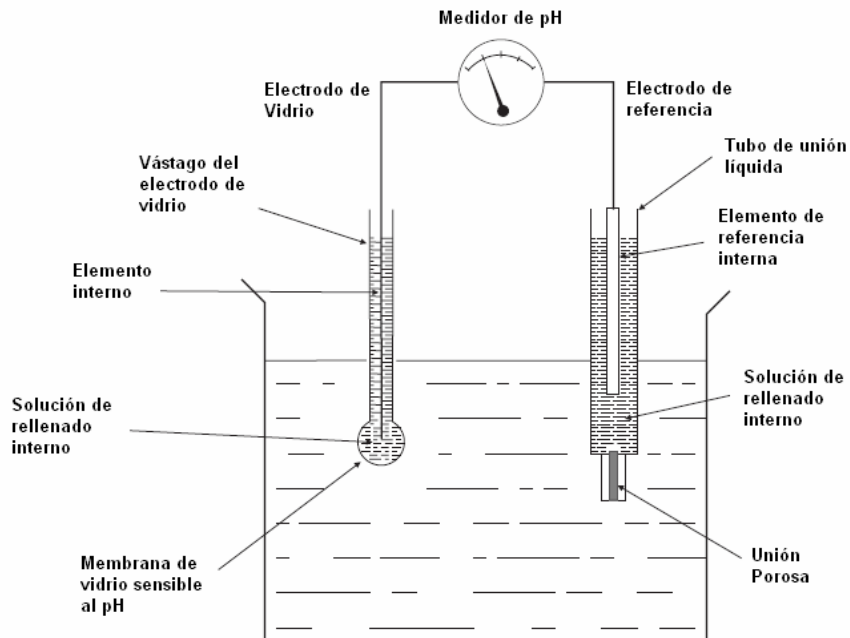
3.4.2 Medición del pH

La medición del pH proporciona una indicación del grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. La razón de iones positivamente cargados de hidrógeno a los iones negativamente cargados de hidróxido decide el pH de una solución en una escala de 0 a 14 pH. Si la concentración de cada ión es igual, entonces se dice que el pH es neutral (con un valor de pH de 7), es decir ni ácido ni alcalino. Mientras más iones positivos hay presentes, la solución se vuelve más ácida (con valores de pH menores a 7), y,

análogamente, mientras más iones de hidrógeno hay presentes, más alcalina se vuelve la solución (con valores de pH mayores a 7). El pH se ha vuelto un parámetro de medición extremadamente común en la industria, tanto en pruebas de laboratorio como en línea. Muchas industrias de manufactura y químicas utilizan agua en alguna parte del proceso, o a veces tienen impacto en las aguas de superficie o subterráneas y en el ambiente. Básicamente, donde el agua es usada, es frecuentemente esencial que el pH sea determinado en algún punto del proceso.

Una indicación a grandes rasgos del pH puede ser obtenida utilizando papeles de pH o indicadores líquidos, que cambian su color mientras el pH varía. Estos indicadores tienen una precisión limitada: la discriminación es difícil de interpretar en muestras coloreadas. Son también inaplicables para cualquier tipo de monitoreo en línea del pH o control. Una aproximación electroquímica que se ha establecido durante los últimos cincuenta años, está basada en un sensor conocido como electrodo de pH de vidrio. Este electrodo es usado en conjunto con un segundo dispositivo conocido como electrodo de referencia para completar el circuito eléctrico. El arreglo del electrodo básico para medición del pH es mostrado en la figura 42.

Figura 42. Sistema básico de medición del pH



Fuente: ABB Instrumentation, *pH Measurement Technical Note*, Pág. 1

3.4.2.1 El electrodo de vidrio

El electrodo de vidrio básico está compuesto de un vástago de vidrio inerte, acoplado a un bulbo de vidrio o membrana fabricada de una formulación de vidrio especial sensible a los iones de hidrógeno, por ejemplo el pH. Una reacción química toma lugar entre una solución de muestra y la superficie de la membrana, generando un potencial eléctrico dependiente del pH en la solución. La reacción que toma lugar es complicada, pero es suficiente decir que un proceso de intercambio de iones toma lugar entre los iones de hidrógeno en la solución y los iones en la superficie de la membrana de vidrio. Esto desarrolla una carga en la superficie de la membrana con respecto a la solución. Esta carga es transferida a través de la membrana donde es levantada por la

superficie interna. La cámara del electrodo es llenada con una solución acuosa interna de un pH conocido y conteniendo iones de cloruro. Un alambre de plata recubierto con cloruro de plata, llamado elemento interno, es sumergido en la solución de relleno interna. El propósito de la solución mencionada es proporcionar continuidad eléctrica entre la superficie interna de la membrana de vidrio y el elemento interno proporcionando una conexión eléctrica al medidor de pH.

3.4.2.2 El electrodo de referencia

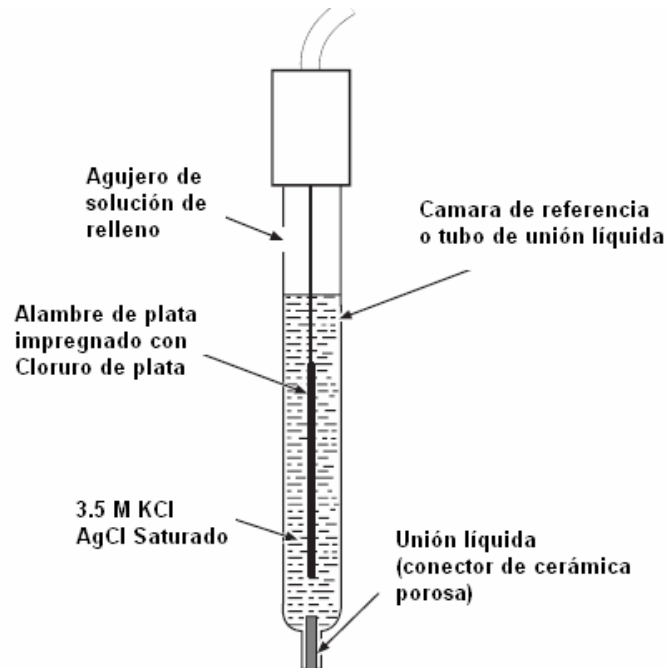
Para completar el circuito eléctrico, el electrodo de referencia es usado para proporcionar un camino de retorno para la solución de muestra. Sin embargo, ya que este contacto debe ser proporcionado por medios electroquímicos, por ejemplo un metal sumergido en una solución química, es imposible evitar generar un potencial eléctrico en serie con el potencial desarrollado por el electrodo de vidrio. Es esencial que el potencial del electrodo de referencia sea estable y no sea afectado por cambios químicos en la solución. Los electrodos de referencia de cloruro de plata son el tipo de electrodos más comúnmente utilizados para la medición del pH hoy en día.

3.4.2.3 Electrodo de cloruro de plata

El electrodo de referencia de cloruro de plata contiene un alambre de plata cloratado inmerso en una solución de cloruro de potasio (KCl) saturada con cloruro de plata (AgCl) como se muestra en la figura 43. Esta solución de relleno interno lentamente se filtra afuera del electrodo a través de una unión cerámica y actúa como una conexión eléctrica entre el elemento de referencia y la muestra. El cloruro de potasio es usado porque no es caro y normalmente no interfiere con la medición. La solución también incluye cloruro de plata para

prevenir la disolución del recubrimiento en el elemento de referencia. Por eso es necesario mantener el nivel de solución en el electrodo.

Figura 43. Electrodo de referencia de cloruro de plata



Fuente: ABB Instrumentation, *pH Measurement Technical Note*, Pág. 2

3.4.2.4 Salida de señal del electrodo

La salida del electrodo de pH es gobernada por una relación entre la temperatura y el pH conocida como la Ecuación de Nernst. Una versión simplificada es como a continuación:

$$\text{mV} = 0.1985 \times (\text{°C} + 273) \times \text{pH}$$

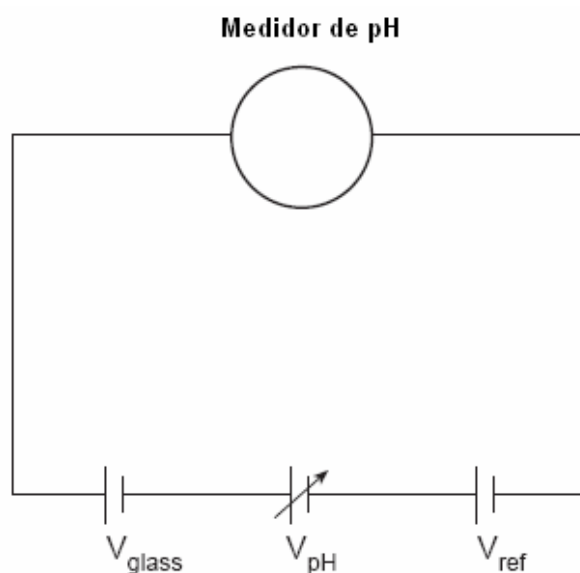
esto equivale a la siguiente salida del electrodo para un cambio de 1 pH en la muestra a varias temperaturas:

°C	0	25	50	75	100
mV	54.20	59.15	64.12	69.08	74.04

dado que la escala de pH cubre un rango de 0 a 14 pH, a 25°C el span completo de mV es $14 \times 59.15 = 818.1\text{mV}$.

En adición al potencial desarrollado por el pH de la muestra (V_{pH}), Hay otros potenciales internos fijos generados por el vidrio (V_{glass}) y por el electrodo de referencia (V_{ref}) en si mismos, en serie con el circuito. Estos están representados en el circuito mostrado en la figura 44.

Figura 44. Potenciales generados en el electrodo de pH



Fuente: *ABB Instrumentation, pH Measurement Technical Note, Pág. 3*

Las tres principales fuentes de estos potenciales son:

- 1) Entre el elemento del electrodo de vidrio y la solución interna.
- 2) En el interior de la superficie de la membrana de vidrio del electrodo debido a la solución interna del pH.
- 3) Entre el elemento de referencia y la solución de relleno interna.

Estos potenciales son “manipulados” ajustando la composición de la solución de relleno interno del electrodo de vidrio para que la salida del electrodo sea alrededor de 0 mV a 7 pH. Por lo tanto, en la práctica, la salida de mV a 25 °C es como a continuación:

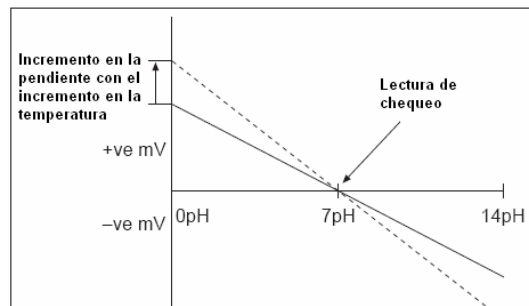
0pH	7pH	14pH
+414.05mV	0mV	-414.05mV

El punto en el cual la salida del electrodo se va a cero es conocido como lectura de chequeo. Este parámetro del electrodo es determinado durante la calibración del *software* del instrumento. Rastrear este valor proporciona una indicación útil de cualquier desviación del cero, implicando cambios en el potencial de referencia interno (V_{ref}). Como la cámara interna del electrodo de vidrio es sellada, es muy improbable que el valor del voltaje del vidrio cambie.

3.4.2.5 Compensación de temperatura

Como se ha indicado, la salida del electrodo es afectada por la temperatura de la solución de muestra. Básicamente, mientras la temperatura se incrementa, la pendiente de la salida, por ejemplo los mV/pH, también se incrementa como se muestra en la figura 45.

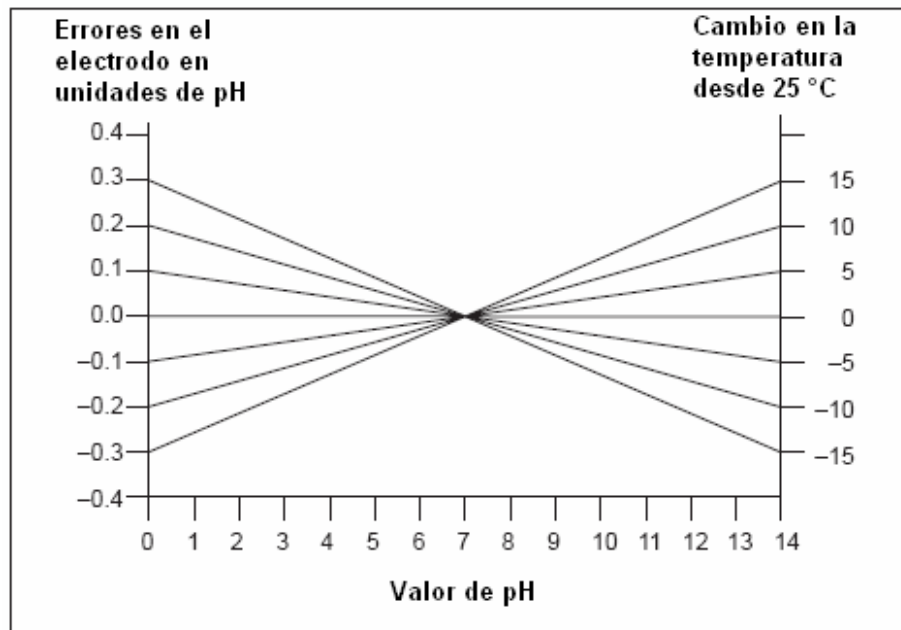
Figura 45. Efectos de la temperatura en la pendiente del electrodo de vidrio



Fuente: ABB Instrumentation, *pH Measurement Technical Note*, Pág. 4

Si las variaciones en la temperatura son grandes, se producen errores inaceptables en el *display* del instrumento en el orden indicado en la figura 46.

Figura 46. Errores causados por cambios en la temperatura



Fuente: ABB Instrumentation, *pH Measurement Technical Note*, Pág. 4

Para superar estos errores, los medidores de pH tienen *software* diseñado para aplicar compensación de temperatura automática, utilizando un electrodo compensador insertado en la muestra.

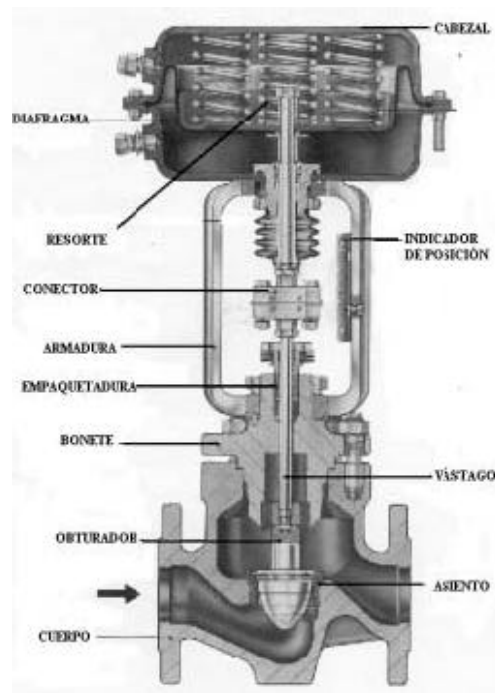
3.5 Elementos finales de control

3.5.1 Válvulas de control

La válvula de control es básicamente un orificio variable por efecto de un actuador. Constituye el elemento final de control en más del 90 % de las aplicaciones industriales. En la figura siguiente se ve una válvula de globo con

un actuador neumático de diafragma en donde se indican las diversas piezas que la constituyen

Figura 47. Corte de una válvula de control con sus partes



Fuente: Control de procesos IIQ – FACET, APENDICE B, Trabajo práctico No. 3, pág. 1

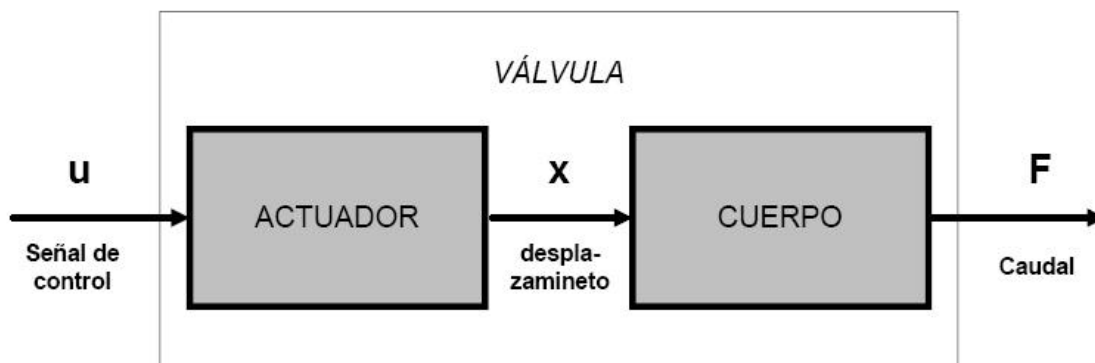
Esta válvula utiliza una señal externa que puede ser neumática o eléctrica y posteriormente transformada en una de tipo neumática que incide el cabezal.

Estos elementos se pueden considerar constituidos por dos partes:

- **Actuador:** recibe la señal de controlador y la transforma en un desplazamiento (lineal o rotacional) merced a un cambio en la presión ejercida sobre el diafragma.

- **Cuerpo:** el diafragma está ligado a un vástago o eje que hace que la sección de pasaje del fluido cambie y con ésta el caudal. Con un diagrama en bloques se puede representar a la válvula como un sistema en serie como se muestra en la figura 48.

Figura 48. Diagrama de bloques de representación de válvula de control



Fuente: Control de procesos IIQ – FACET, APENDICE B, Trabajo práctico No. 3, pág. 2

Desde el punto de vista estático el actuador es moderadamente lineal y la dinámica más significativa es la de llenado del cabezal con una constante de tiempo del orden de los segundos. El cuerpo carece de retardo y la ganancia viene determinada por la característica de flujo como se verá.

3.5.1.1 Especificación de válvulas




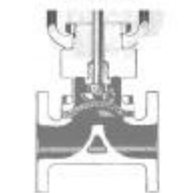
Especificar una válvula de control implica determinar las características siguientes:

- **Cuerpo e internos:** indicando el tipo, material y serie que se fija de acuerdo al servicio que debe prestar. También hay que indicar el diámetro que está relacionado con la capacidad y a esto se lo denomina dimensionamiento. Por último, algunos tipos de válvula permiten elegir la Característica de Flujo.
- **Actuador:** una vez conocidos los detalles del cuerpo se debe elegir el tipo de motor (neumático de cabezal o pistón, eléctrico, etc.), la acción ante falla y el tamaño.
- **Accesorios:** corresponde a elementos adicionales como transductores I/P o V/P, volante para accionamiento manual, posicionador, etc.

3.5.1.2 Tipos de válvulas de control

Existen diversos tipos de cuerpos, que se adaptan a la aplicación. Los que más se emplean en la práctica industrial se muestran en la tabla siguiente. Teóricamente el tipo debe adoptarse en función de las necesidades del proceso, aunque a veces hay razones, económicas por ejemplo, que obligan a usar un tipo aunque éste no sea el más adecuado.

Tabla IV. Características de los principales tipos de válvulas de control

<i>TIPO</i>	<i>CARACTERÍSTICA</i>
<p><i>Globo</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo en relación al Cv • Aplicación limitada para fluidos con partículas en suspensión • Diámetros hasta 24 pulgadas • Disponible en diversos modelos (simple y doble asiento, guiado en caja, etc.) • Existen tipos especiales para aplicaciones criogénicas, para vaporización, etc. • Rangeabilidad 35:1 a 50:1 • Amplia disponibilidad de características de flujo
<p><i>Mariposa</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Buena disponibilidad para grandes diámetros • Bajo costo en la versión estándar • Bajo costo en relación a Cv • Característica igual porcentaje salvo diseños especiales del plato • Susceptibles a cavitación y ruido • Baja pérdida de carga • Diámetros hasta 150 pulgadas • El cierre hermético requiere de recubrimientos especiales
<p><i>Esférica (ball)</i></p>  <p><i>Tapón (plug)</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Característica igual porcentaje salvo que el obturador tenga una sección especial • Apta para el manejo de suspensiones muy viscosas o con fibras y sólidos • Requiere motores de gran tamaño • Precisan posicionadores • Deben ser extraídas de la línea para mantenimiento • Rangeabilidad típica de 50:1
<p><i>Sanders</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliamente usadas para el manejo de fluidos corrosivos o erosivos • Construcción simple • Cierre hermético y las partes móviles no tienen contacto con el fluido • Limitado rango para presiones y temperaturas de trabajo • Rangeabilidad entre 3:1 a 15:1

Fuente: Control de procesos IIQ – FACET, APENDICE B, Trabajo práctico No. 3, pág. 3

3.5.2 Bombas dosificadoras

Las bombas dosificadoras se utilizan en muchos de los procesos industriales para aplicar una cantidad determinada de alguna solución en proporción a la magnitud de la señal de entrada (señal de control), y se dividen en dos tipos principales que son:

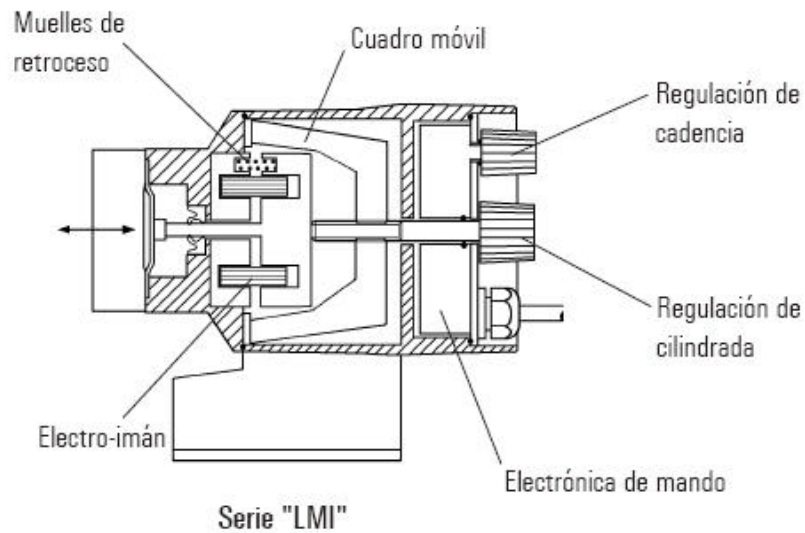
- Electromagnéticas
- Electromecánicas

3.5.2.1 Bomba dosificadora electromagnética

El conjunto mecánico de una bomba dosificadora electromagnética está constituido del electro-imán, por su electrónica de mando y por los dispositivos de regulación: dispositivo mecánico de regulación de la cilindrada, aunque también, en varios modelos, dispositivo electrónico de regulación de la cadencia de funcionamiento.

En el esquema de principio de la figura más abajo, se ve que el electro-imán genera directamente el movimiento lineal, en un sentido, del cuadro móvil. El retorno se efectúa por medio de los muelles de retroceso. La regulación de la cilindrada se obtiene por un tope mecánico regulable del enganche móvil en su fase de vuelta. La regulación de la cadencia se hace por medio de la electrónica de mando.

Figura 49. Componentes de bomba dosificadora electromagnética



Fuente: Milton Roy Europa, Documento técnico sobre el conjunto mecánico de una bomba dosificadora, pág. 1

3.5.2.2 Bomba dosificadora electromecánica

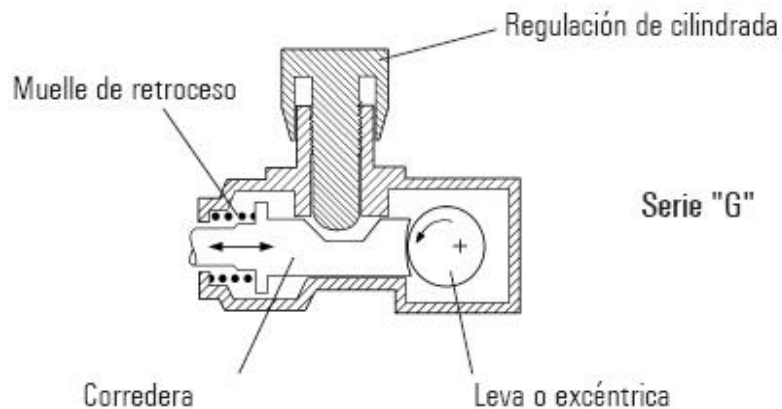
El conjunto mecánico de una bomba dosificadora electromecánica comprende:

- El reductor de engranaje (a menudo de tipo rueda y tornillo sinfín).
- El mecanismo de transformación de movimiento rotativo del sistema de arrastre en movimiento alternativo de la corredera.
- El dispositivo de regulación de la cilindrada.

Existen varios principios de funcionamiento:

La figura más abajo esquematiza el principio de un mecanismo de leva excéntrica y retroceso por muelle.

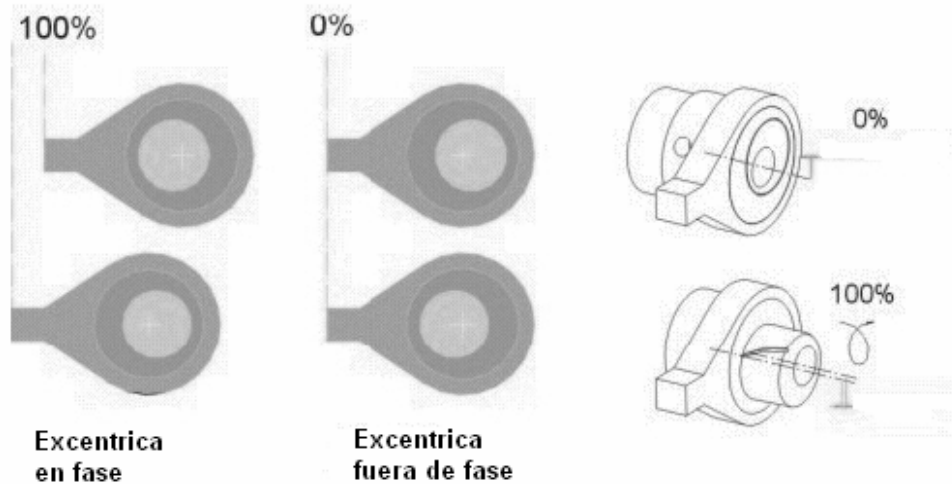
Figura 50. Componentes de bomba dosificadora electromecánica



Fuente: Milton Roy Europa, Documento técnico sobre el conjunto mecánico de una bomba dosificadora, pág. 1

La regulación de la cilindrada de la bomba se obtiene por reglaje del tope mecánico de la corredera en su fase de retorno. Este principio de diseño está muy generalizado y es realmente muy sencillo. Este generalmente reservado por las bombas de potencia reducida, debido a los choques mecánicos e hidráulicos que se producen. La figura 51 ilustra el principio de una versión del principio de excéntrica variable, que concretamente es una versión con doble excéntrica. La variación de la cilindrada se obtiene por variación de la amplitud del movimiento sinusoidal del pistón; la bomba no genera choques hidráulicos ni mecánicos.

Figura 51. Principio de funcionamiento de la excéntrica de una bomba dosificadora



Fuente: Milton Roy Europa, Documento técnico sobre el conjunto mecánico de una bomba dosificadora, pág. 2

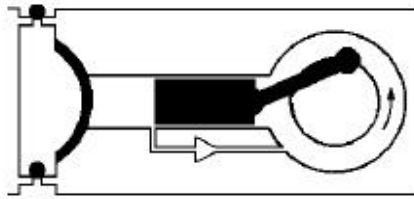
Aunque el principio descrito anteriormente es valedero sólo en los casos de dosificadores de membrana hidráulica, es posible efectuar una regulación de cilindrada por by-pass o división de caudal en el circuito de aceite de mando. Las figuras más abajo ilustran este principio basado en el desacoplamiento hidráulico entre pistón y membrana, cuando el by-pass (o circuito de retroceso) está abierto y, a la inversa, acoplamiento hidráulico entre pistón y membrana cuando el by-pass está cerrado.

By – Pass división de caudal:

El circuito está cerrado durante la fracción del ciclo igual a la fracción deseada del caudal máximo. Ejemplo de una bomba regulada al 66%:

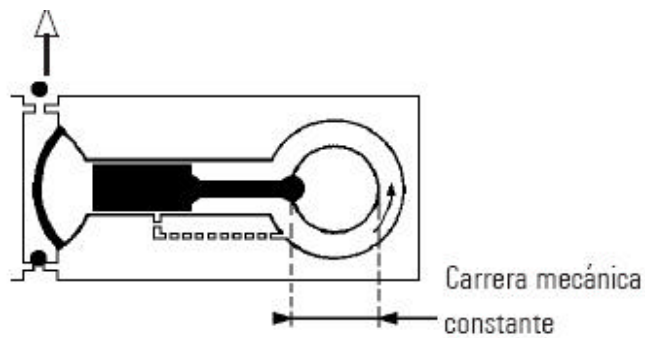
1 - Impulsión 1er tercio:

Circuito de retroceso abierto; no hay bombeo



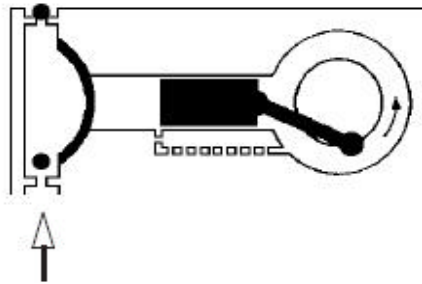
2 - Impulsión 2º y 3er tercio:

Circuito de retroceso cerrado; impulsión 2/3 de la cilindrada



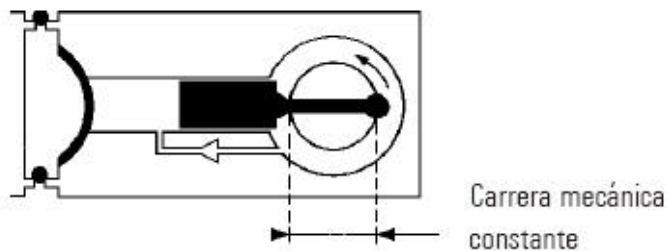
3 - Aspiración 3er tercio:

Circuito abierto; no hay bombeo



4 - Aspiración 3er tercio:

Circuito abierto: no hay bombeo



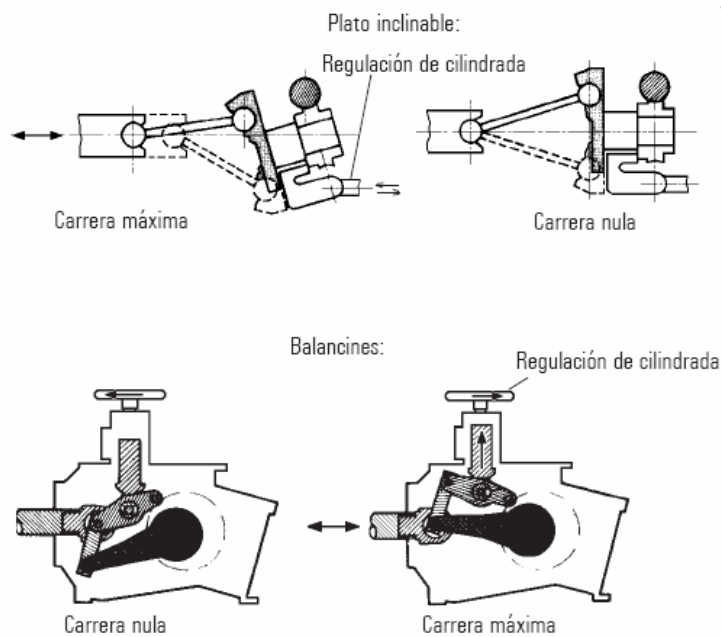
En la regulación 0%, el circuito de regulación está abierto permanentemente. Toda la cilindrada generada por el pistón vuelve al *carter*. En la regulación 100%, toda la cilindrada engendrada por el pistón es transmitida por la membrana al líquido bombeado. En este caso el circuito de retroceso al *carter* está cerrado permanentemente.

3.5.2.3 Bombas dosificadoras de gran potencia

Para las mayores potencias, se utilizan mecanismos de regulación de la carrera que modifican la cinemática como muestra la siguiente figura:

- Sistemas de plato inclinable
- Sistemas de balancines

Figura 52. Funcionamiento de bombas dosificadoras de gran capacidad



Fuente: Milton Roy Europa, Documento técnico sobre el conjunto mecánico de una bomba dosificadora, pág. 2

4. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO Y CONTROLADORES DE LAZOS MÚLTIPLES

4.1 Sistemas de control electrónico y digital

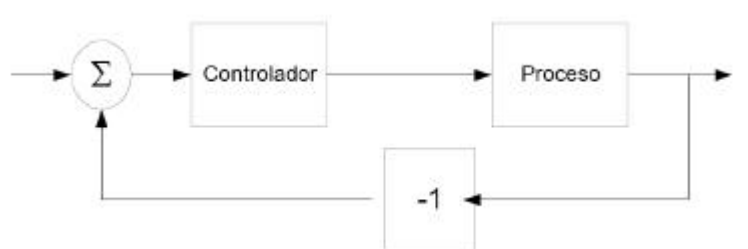
4.1.1 Introducción

En los inicios de la era industrial, el control de procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y el conocimiento adquirido con la experiencia. Un caso típico fue el control de la temperatura de cocción de un producto en un tanque. El operador del sistema, era realmente el “instrumento de control” que juzgaba las condiciones del proceso por medio de su vista al observar un termómetro, el tiempo de cocción transcurrido, el aspecto del producto y otros factores, y decidía el momento adecuado para retirar el producto del tanque; en esta decisión influían muchos factores como la suerte, de tal forma que la cocción del producto no siempre era la más adecuada. Más adelante, la industria requirió mayor calidad del producto terminado, lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que se derivaron estudios analíticos que a su vez permitieron realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos, mejorando por ende, la calidad del producto terminado.

4.1.1.1 El principio de realimentación

La idea de la realimentación es bastante simple y muy poderosa. A lo largo de su historia ha tenido una fuerte influencia en la evolución de la tecnología. Las aplicaciones del principio de realimentación han tenido éxito en los campos del control, comunicaciones e instrumentación. Para entender el concepto, asuma que el proceso es tal que cuando el valor de la variable manipulada se incrementa, entonces se incrementan los valores de las variables del proceso. Bajo este concepto simple, el principio de realimentación puede ser expresado como sigue: Incrementar la variable manipulada cuando la variable del proceso sea más pequeña que la referencia y disminuirla cuando ésta sea más grande. Este tipo de realimentación se llama "realimentación negativa" debido a que la variable manipulada se mueve en la dirección opuesta a la variable del proceso. El principio puede ser ilustrado por el diagrama de bloques que se muestra en la Fig. 53. En este diagrama el proceso y el controlador están representados por cajas negras y las flechas denotan las entradas y salidas a cada bloque. Note que existe un símbolo especial que denota una suma de señales. El diagrama de bloques muestra que el proceso y el controlador están conectados en un lazo realimentado. La presencia del signo en el bloque de retorno indica que la realimentación es negativa.

Figura 53. Diagrama de bloques del sistema de control de un proceso



Fuente: Ing. Mauricio Améstegui, Apuntes de control PID, pág. 1

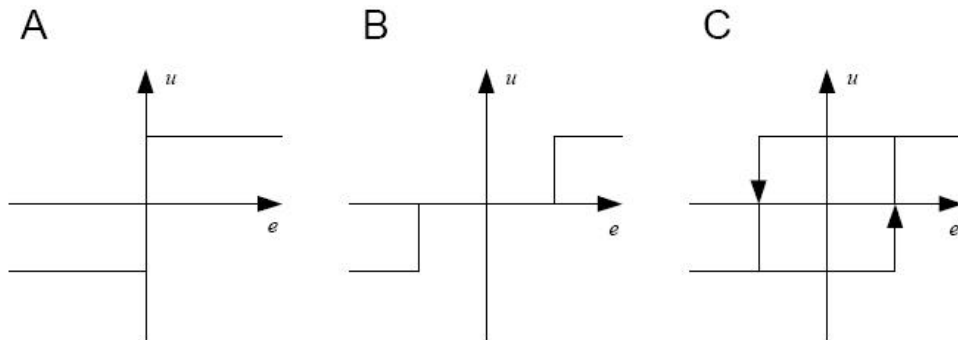
4.1.2 Control todo o nada (ON - OFF)

El mecanismo de realimentación más simple se puede describir matemáticamente como sigue:

$$u = \begin{cases} u_{\max} & e > 0 \\ u_{\min} & e < 0 \end{cases}$$

donde $e = y - y_{sp}$ (diferencia entre la referencia especificada por el operador y la salida medida del proceso) es el denominado “*error de control*”. Esta ley de control implica que siempre se usa la acción correctiva máxima. De esta manera, la variable manipulada tiene su valor más grande cuando el error es positivo y su valor más pequeño cuando el error es negativo. La realimentación de este tipo se llama “*control on-off*”. Es simple y no tiene parámetros que configurar, aparte de las acciones mínima y máxima que se ejecutan en el cálculo de la señal de control. El control *on-off* muchas veces es apropiado para mantener la variable controlada del proceso cerca del valor de la referencia que fue especificada, pero típicamente resulta en un sistema donde las variables oscilan. Note en la ecuación anterior que la variable de control no está definida cuando el error es cero. Es común tener algunas modificaciones ya sea introduciendo histéresis o una zona muerta como se muestra en la figura 54.

Figura 54. (A) Característica de un controlador ON – OFF ideal y modificaciones con (B) zona muerta y (C) histéresis



Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos del control automático industrial

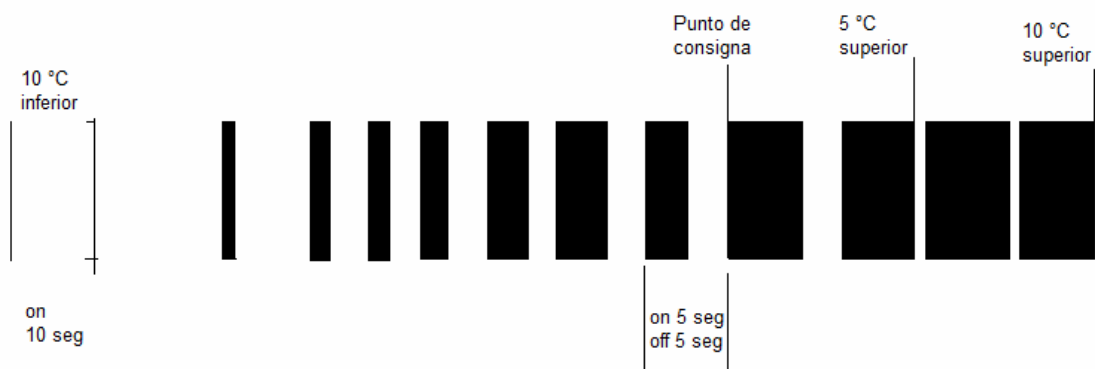
4.1.3 Control proporcional de tiempo variable

En este sistema de regulación existe una relación predeterminada entre el valor de la variable controlada y la posición media en tiempo del elemento final de control de dos posiciones. Es decir, la relación del tiempo de conexión al de desconexión final es proporcional al valor de la variable controlada. La longitud de un ciclo completo (conexión + desconexión) es constante pero la relación entre los tiempos de conexión a desconexión dentro de cada ciclo varía al desviarse la variable controlada del punto de consigna.

En la figura 55 puede verse un ejemplo de este tipo de control que tiene un ciclo completo de 10 segundos y una banda proporcional de 20 °C. En el punto de consigna el controlador conecta el elemento final durante 5 segundos y lo desconecta durante 5 segundos y así sucesivamente. Si la temperatura disminuye 10 °C el elemento final está siempre conectado. A 5 °C por encima

del punto de consigna el elemento final está conectado sólo 2.5 segundos, desconecta durante 7.5 segundos, y así sucesivamente.

Figura 55. Control proporcional de tiempo variable



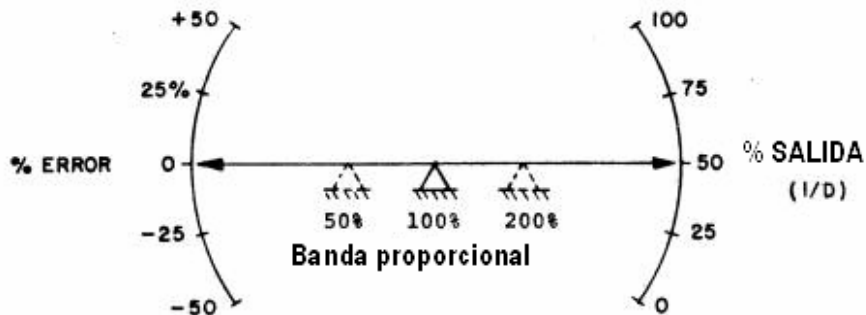
Este tipo de control se emplea sólo en controladores eléctricos. Un caso típico de aplicación lo constituye la regulación de temperatura de un horno eléctrico en que el elemento final es una resistencia o un conjunto de resistencias de calefacción

4.1.4 Control proporcional

El control proporcional es la base de los tres modos de control, si los otros dos acción integral (*reset*) y acción derivativa están presentes, éstos son sumados a la respuesta proporcional. “Proporcional” significa que el cambio presente en la salida del controlador es algún múltiplo del porcentaje de cambio en la medición.

Este múltiplo es llamado “ganancia” del controlador. Para algunos controladores, la acción proporcional es ajustada por medio de tal ajuste de ganancia, mientras que para otros se usa una “banda proporcional”. Ambos tienen los mismos propósitos y efectos.

Figura 56. Control proporcional

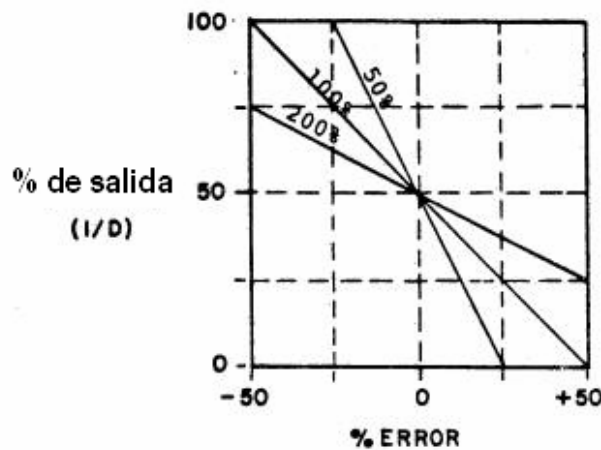


Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos del control automático industrial

La figura 56 ilustra la respuesta de un controlador proporcional por medio de un indicador de entrada/salida pivotando en una de estas posiciones. Con el pivó en el centro entre la entrada y la salida dentro del gráfico, un cambio del 100% en la medición es requerido para obtener un 100% de cambio en la salida, o un desplazamiento completo de la válvula. Un controlador ajustado para responder de ésta manera se dice que tiene una banda proporcional del 100%. Cuando el pivó es hacia la mano derecha, la medición de la entrada debería tener un cambio del 200% para poder obtener un cambio de salida completo desde el 0% al 100%, esto es una banda proporcional del 200%. Finalmente, si el pivó estuviera en la posición de la mano izquierda y si la

medición se moviera sólo cerca del 50% de la escala, la salida cambiaría 100% en la escala. Esto es un valor de banda proporcional del 50%. Por lo tanto, cuanto mas chica sea la banda proporcional, menor será la cantidad que la medición debe cambiar para el mismo tamaño de cambio en la medición. O, en otras palabras, menor banda proporcional implica mayor cambio de salida para el mismo tamaño de medición. Esta misma relación está representada por la figura 57.

Figura 57. Acción proporcional



Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos del control automático industrial

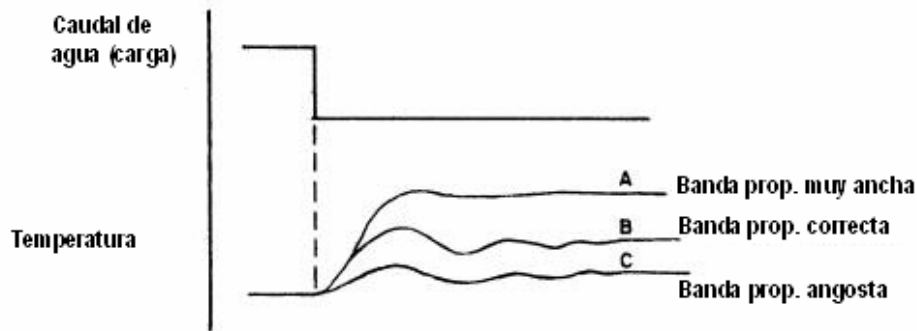
El gráfico anterior muestra cómo la salida del controlador responderá a medida que la medición se desvíe del valor de consigna. Cada línea sobre el gráfico representa un ajuste particular de la banda proporcional. Dos propiedades básicas del control proporcional pueden ser observadas a partir de éste gráfico:

Por cada valor de la banda proporcional toda vez que la medición se iguala al valor de consigna, la salida es del 50%.

Cada valor de la banda proporcional define una relación única entre la medición y la salida. Por cada valor de medición existe un valor específico de salida. Por ejemplo, usando una línea de banda proporcional del 100, cuando la medición está 25% por encima del valor de consigna, la salida del controlador deberá ser del 25%. La salida del controlador puede ser del 25% sólo si la medición está 25% por encima del valor de consigna. De la misma manera, cuando la salida del controlador es del 25%, la medición será del 25% por encima del valor de consigna. En otras palabras, existe un valor específico de salida por cada valor de medición.

Para cualquier lazo de control de proceso sólo un valor de la banda proporcional es el mejor. A medida que la banda proporcional es reducida, la respuesta del controlador a cualquier cambio en la medición se hace mayor y mayor. En algún punto dependiendo de la característica de cada proceso particular, la respuesta en el controlador será lo suficientemente grande como para controlar que la variable medida retorne nuevamente en dirección opuesta a tal punto de causar un ciclo constante de la medición. Este valor de banda proporcional, conocido como la última banda proporcional, es un límite en el ajuste del controlador para dicho lazo. Por otro lado, si se usa una banda proporcional muy ancha, la respuesta del controlador a cualquier cambio en la medición será muy pequeña y la medición no será controlada en la forma suficientemente ajustada. La determinación del valor correcto de banda proporcional para cualquier aplicación es parte del procedimiento de ajuste (*tuning procedure*) para dicho lazo. El ajuste correcto de la banda proporcional puede ser observado en la respuesta de la medición a una alteración.

Figura 58. Respuesta de lazo cerrado



Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos del control automático industrial

La figura anterior muestra varios ejemplos de bandas proporcionales variadas para un intercambiador de calor.

Idealmente, la banda proporcional correcta producirá una amortiguación de amplitud de cuarto de ciclo en cada ciclo, en el cual cada medio ciclo es $\frac{1}{2}$ de la amplitud de del medio ciclo previo. La banda proporcional que causará una amortiguación de onda de un cuarto de ciclo será menor, y por lo tanto alcanzará un control mas ajustado sobre la variable medida, a medida que el tiempo muerto en el proceso decrece y la capacidad se incrementa .

Una consecuencia de la aplicación del control proporcional al lazo básico de control es el *offset*. *Offset* significa que el controlador mantendrá la medida a un valor diferente del valor de consigna. La aceptabilidad de los controles sólo-proporcionales dependen de si este valor de *offset* será o no tolerado, ya que el

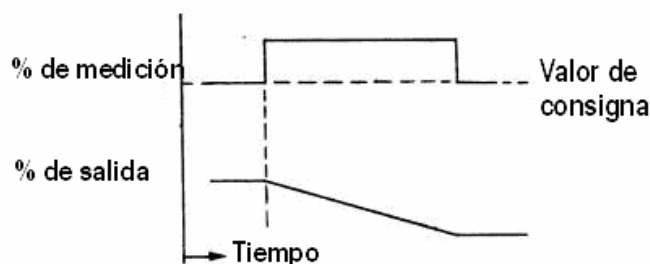
error necesario para producir cualquier salida disminuye con la banda proporcional, cuanto menor sea la banda proporcional, menor será el *offset*.

Para grandes capacidades, aplicaciones de tiempo muerto pequeñas que acepten una banda proporcional muy estrecha, el control sólo-proporcional será probablemente satisfactorio dado que la medición se mantendrá a una banda de un pequeño porcentaje alrededor del valor de consigna. Si es esencial que no haya una diferencia de estado estable entre la medición y el valor de consigna bajo todas las condiciones de carga, una función adicional deberá ser agregada al controlador.

4.1.5 Control Integral

Esta función es llamada acción integral o *reset*. La respuesta del lazo abierto del modo *reset* es mostrada en la figura 59, que indica un escalón de cambio en algún instante en el tiempo. En tanto que la medición estuviera en su valor de consigna, no existiría ningún cambio en la salida debido al modo de *reset* en el controlador

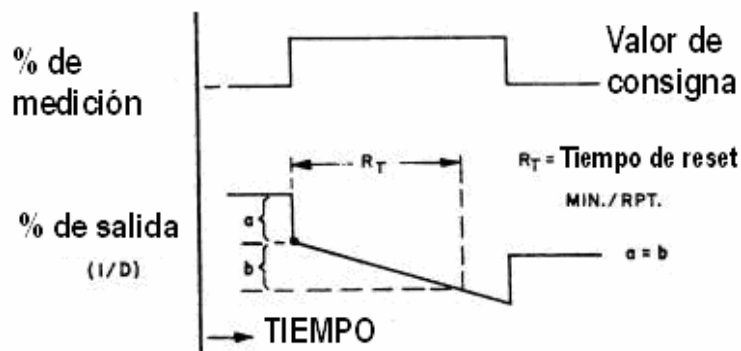
Figura 59. Acción Integral



Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos del control automático industrial

Sin embargo, cuando cualquier error exista entre la medición y el valor de consigna, la acción de *reset* hace que la salida comience a cambiar y continúe cambiando en tanto el error exista. Esta función, entonces, actúa sobre la salida para que cambie hasta un valor correcto necesario para mantener la medición en el valor de consigna a varias cargas sea alcanzado. Esta respuesta es agregada a la banda proporcional del controlador según se muestra en la figura número 60.

Figura 60. Acción proporcional más integral



Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos del control automático industrial

El escalón de cambio en la medición primero produce una respuesta proporcional, y luego una respuesta de *reset* es agregada a la proporcional. Cuanta más acción de *reset* o integral exista en el controlador, mas rápido cambia la salida en función del tiempo. Entre las varias marcas de controladores, la salida de acción integral es medida de una o dos maneras, tanto en minutos por repetición, o en número de repeticiones por minuto. Para aquellos controladores que miden en minutos por repetición, el tiempo de *reset* es la cantidad de tiempo necesaria para que dicho modo repita la respuesta del

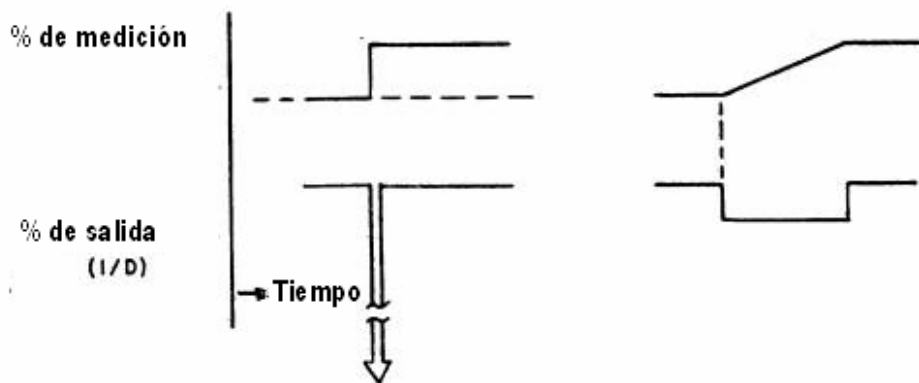
lazo abierto causada por el modo proporcional para un paso de cambio de error. Así, para estos controladores, cuanto menor sea el número de *reset*, mayor será la acción del modo *reset*. En aquellos controladores que miden la acción de *reset* en repeticiones por minuto, el ajuste indica cuantas repeticiones de la acción proporcional son generados por el modo de *reset* en un minuto. Así, para dichos controladores cuanto mayor sea el número *reset*, mayor será la acción integral.

La correcta cantidad de acción *reset* depende de que tan rápido la medición pueda responder al recorrido adicional de válvula que la misma causa. El controlador no debe comandar la válvula mas rápido que el tiempo muerto en el proceso, permitiendo que la medición responda, o de otra manera la válvula ira a sus límites antes de que la medición pueda ser retornada nuevamente al valor de consigna. La válvula se mantendrá entonces en su posición extrema hasta que la medición cruce el valor de consigna en la dirección opuesta. El resultado será un ciclo de *reset* en el cual la válvula se desplaza de un extremo al otro a medida que la medición oscila alrededor del valor de consigna. Cuando el *reset* es aplicado en los controladores en procesos en serie en que la medición está alejada del valor de consigna por largos períodos entre series, el *reset* puede llevar la salida a un máximo resultando en una oscilación de *reset*. Cuando la próxima serie se inicie, la salida no alcanzará su máximo hasta que la medición cruce el valor de consigna produciendo grandes desviaciones. El problema puede ser prevenido mediante la inclusión de una “llave de serie” en el controlador.

4.1.6 Control derivativo

La tercera respuesta encontrada en controladores es la acción derivativa. Así como la respuesta proporcional responde al tamaño del error y el reset responde al tamaño y duración del error, el modo derivativo responde a cuán rápido cambia el error. En la figura 61, dos respuestas derivativas son mostradas.

Figura 61. Acción derivativa



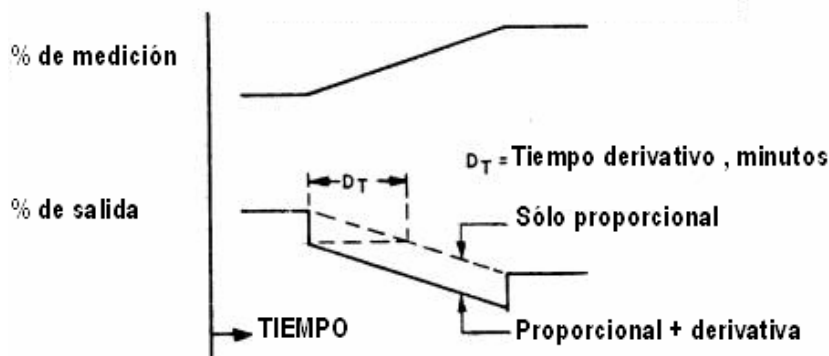
Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos del control automático industrial

La primera es una respuesta a un corte en la medición alejada del valor de consigna. Para un escalón, la medición cambia en forma infinitamente rápida, y el modo derivativo del controlador produce un cambio muy grande y repentino en la salida, que muere inmediatamente debido a que la medición ha dejado de cambiar luego del escalón. La segunda respuesta muestra la respuesta del modo derivativo a una medición que está cambiando a un régimen constante.

La salida derivativa es proporcional al régimen de cambio de éste error.

Cuanto mayor sea el cambio, mayor será la salida debido a la acción derivativa . La acción derivativa mantiene ésta salida mientras la medición esté cambiando . Tan pronto como la medición deja de cambiar, esté o no en el valor de consigna, la respuesta debido a la acción derivativa cesará . Entre todas las marcas de controladores, la respuesta derivativa es comúnmente medida en minutos como se indica en la figura 62.

Figura 62. Acción proporcional más derivativa



Fuente: www.wikipedia.com/Fundamentos-del-control-automático-industrial

El tiempo derivativo en minutos es el tiempo que la respuesta proporcional del lazo abierto mas la respuesta derivativa está delante de la respuesta resultante del valor proporcional solamente. Así, cuanto mas grande sea el número derivativo mayor será la respuesta derivativa . Los cambios en el error son un resultado de los cambios, tanto en el valor de consigna como en la medición o en ambos. Para evitar un gran pico causado por los escalones de cambio en el valor de consigna, la mayoría de los controladores modernos aplican la acción derivativa sólo a cambios en la medición. La acción derivativa

en los controladores ayuda a controlar procesos con constantes de tiempo especialmente grandes y tiempo muerto significativo, la acción derivativa es innecesaria en aquellos procesos que responden rápidamente al movimiento de la válvula de control, y no puede ser usado en absoluto en procesos con ruido en la señal de medición, tales como caudal, ya que la acción derivativa en el controlador responderá a los cambios bruscos en la medición que el mismo observa en el ruido. Esto causará variaciones rápidas y grandes en la salida del controlador, lo que hará que la válvula esté constantemente moviéndose hacia arriba o hacia abajo, produciendo un desgaste innecesario en la misma.

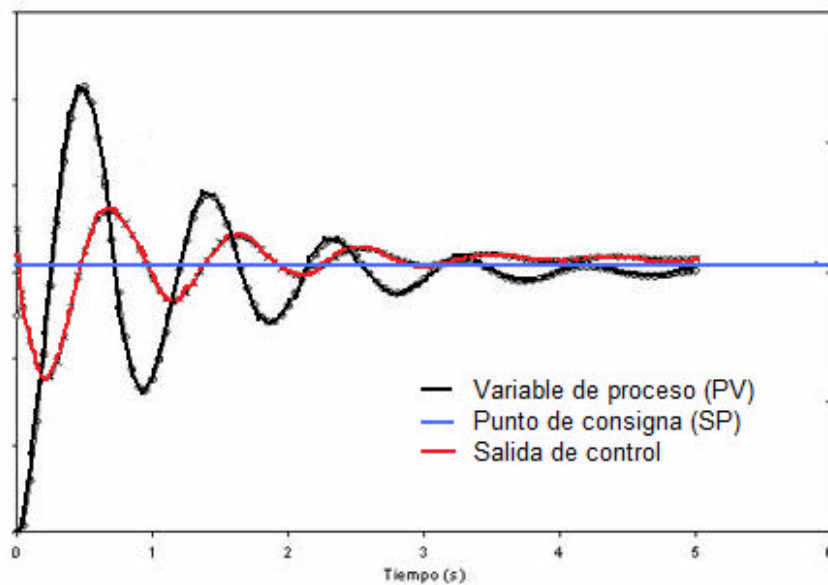
4.1.7 Control PID

En muchos casos el control PD es suficiente para regular de forma precisa el comportamiento de un proceso. Si embargo, en algunos procesos, a lo largo del tiempo se produce un progresivo y lento alejamiento de la variable de proceso respecto al punto de consigna (*set point*) que el control proporcional-derivativo no es capaz de corregir sin provocar oscilaciones indeseadas. En tales casos, es necesario medir el valor de desplazamiento (error producido) y actuar en función del mismo. Si se considera que gráficamente el error producido en un intervalo de tiempo es el área comprendida por la función del valor de proceso respecto al punto de consigna en dicho intervalo, bastará con medir dicha área y actuar en función de la misma. Al igual que en el control derivativo, se recurre al cálculo diferencial para la medición del error. En este caso con la función integral (I), que en combinación con el control PD antes visto nos dará el control PID.

4.1.7.1 Ajuste de los parámetros PID

Normalmente los equipos existentes en el mercado que incorporan PID, permiten ajustar sus valores de diferentes formas. Siendo las más extendidas la del ajuste de factor proporcional como el porcentaje de la diferencia entre PV y SV respecto al rango total y los factores D e I como tiempos de muestreo entre los cuales se realizan los cálculos. En cualquier caso, se aconseja el ajuste por etapas, ajustando en primer lugar el factor P de manera que la variable de proceso sobrepase inicialmente el punto de consigna y posteriormente el ajuste del factor D e I por ese orden hasta conseguir un comportamiento estable del proceso.

Figura 63. Respuesta de un control PID



4.1 Tipos de controladores y selección del sistema de control

4.2.1 Controladores digitales

4.2.1.1 Introducción

El control automático no se habría podido desarrollar sin un paso previo dado por los controladores con la aparición de los computadores digitales los que abrieron un campo muy amplio de avance. K. Åström hace una reseña de hitos históricos en el llamado control digital que hablan de esta evolución. Hasta el surgimiento de los sistemas digitales el único elemento de cálculo con que contaba la Ingeniería de Control eran los computadores analógicos electrónicos. Lo mismo ocurría con la implementación de los reguladores. Estos se construían con elementos analógicos mecánicos, neumáticos o electrónicos. Pero el desarrollo de la electrónica y de los computadores digitales llevó a cambiar rápidamente la concepción. Los primeros computadores digitales fueron usados en sistemas de control de procesos extremadamente complejos, pero con la reducción constante de los precios y tamaño, hoy se implementan reguladores digitales individuales por lazo de control.

4.2.1.2 Características del Control Digital

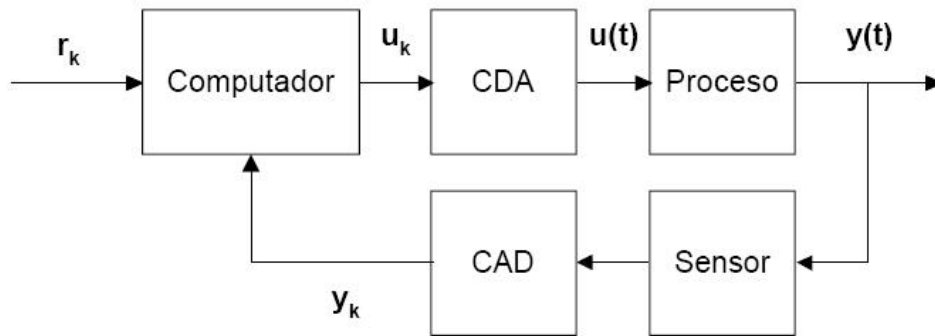
Como características básicas del control digital se pueden mencionar las siguientes:

- No existe límite en la complejidad del algoritmo. Cosa que sí sucedía anteriormente con los sistemas analógicos.

- Facilidad de ajuste y cambio. Por el mismo motivo anterior un cambio en un control analógico implica, en el mejor de los casos, un cambio de componentes si no un cambio del controlador completo.
- Exactitud y estabilidad en el cálculo debido a que no existen derivas u otras fuentes de error.
- Uso del computador con otros fines (alarmas, archivo de datos, administración, etc.)
- Costo vs. número de lazos. No siempre se justifica un control digital ya que existe un costo mínimo que lo hace inaplicable para un número reducido de variables.
- Tendencia al control distribuido o jerárquico. Se ha pasado de la idea de usar un único controlador o computador para toda una planta a la de distribuir los dispositivos inteligentes por variable o grupos de estas e ir formando estructuras jerárquicas.

En cuanto a la arquitectura de un lazo de control es de la forma en que lo muestra la figura 64. El proceso en la mayoría de los casos es continuo, es decir se lo debe excitar con una señal continua y genera una salida continua. Esta señal, como en cualquier lazo de control es sensada por algún dispositivo que a su vez entrega una señal continua proporcional a la magnitud medida. Por otra parte está el computador que solo trabaja con valores discretos. Para compatibilizar ambos existen dos elementos: el CDA y el CAD que realizan la conversión de magnitudes.

Figura 64. Lazo típico de control digital



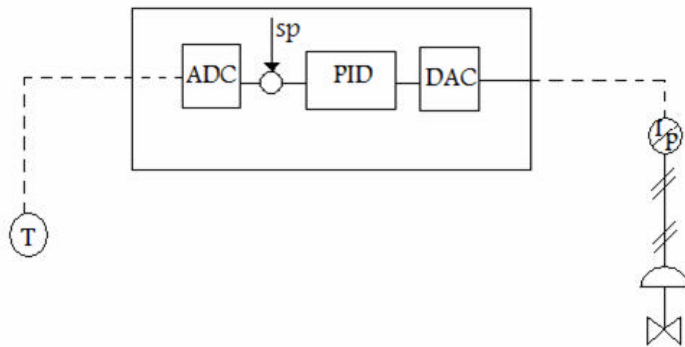
Fuente: Aracil Santonja, *Sistemas Discretos de Control*, pág. 5

4.2.2 Controladores de lazos múltiples

4.2.2.1 Elementos de *hardware*

La arquitectura de un controlador PID digital multilazo no difiere básicamente de la de cualquier computador, la figura 65 muestra tal esquema.

Figura 65. Arquitectura de controlador multilazo PID



Fuente: Ing. Alfredo Ernesto Puglesi, Unidad 6 Control Industrial y Automático, pág. 1

Las entradas de los controladores multilazo serán señales de corriente, voltaje, temperatura, digitales, etc. que llegan desde transmisores de campo o sensores, y las salidas que generalmente son de 4 –20 mA, irán a convertidores de corriente a presión (I/P) si el elemento final de control es una válvula o directamente en corriente si son variadores de frecuencia.

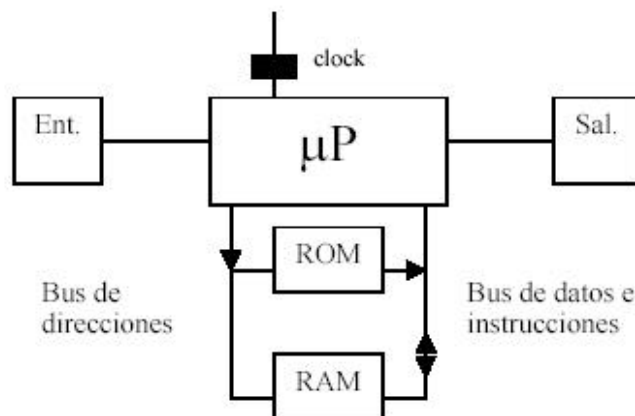
En un controlador digital, la señal de entrada continua es convertida a un valor numérico digitalizado mediante un ADC (convertidor analógico-digital), normalmente de 12 bits de resolución, que se suma algebraicamente con el valor deseado o *setpoint* que también ha sido ingresado por el operador y digitalizado.

En el programa principal se usa una subrutina llamada ADC, y como resultado de ello se obtiene el error digitalizado. Así mismo, la salida digitalizada del programa principal o bloque PID es entregada a una subrutina DAC que utilizando un conversor digital - analógico entrega una salida que en combinación con un “*holder*” o mantenedor de señal, colocan una señal

continúa en 4-20 mA para ir a un convertidor I/P o a la entrada de un variador de frecuencia, como ya se menciono.

La Figura 66 amplía el detalle del *hardware*, aquí es importante destacar que la memoria ROM, además del *firmware* de arranque y del algoritmo PID, contiene una biblioteca de funciones , por ejemplo, para linealizado de termopars, según el tipo que se trate (J, K, R, S...), totalizado de caudales, álgebra para cálculos sencillos, etc.

Figura 66. Estructura detallada de un controlador PID



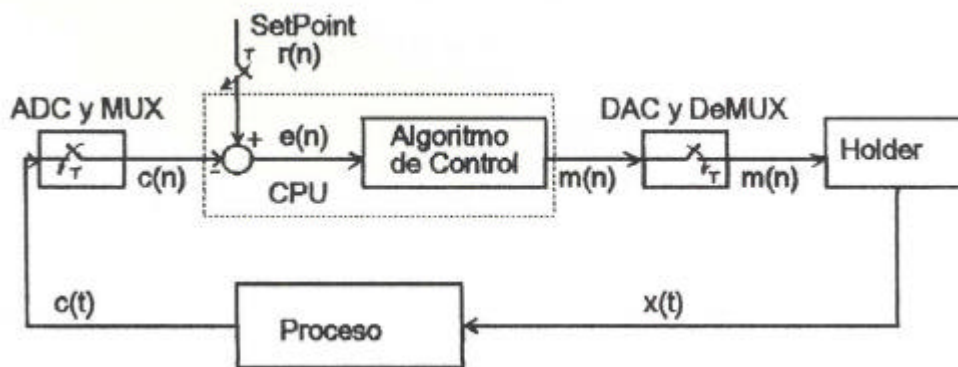
Fuente: Ing. Alfredo Ernesto Puglesi, Unidad 6 Control Industrial y Automático, pág. 2

Dichas funciones le dan características particulares a cada controlador, por lo que varían notablemente entre uno y otro, lo que hace necesario, ante una aplicación determinada, tener en claro los requerimientos del mismo.

Este esquema puede completarse con otras prestaciones tales como salida de comunicaciones digitales RS-422 o RS-485 (que mediante una interface a RS - 232C posibilita el dialogo con PC's), salidas USB, panel frontal

de operación, etc. Dependiendo de la velocidad y capacidad del multiplexor, junto con el *hardware* asociado, pueden constituirse controladores unilazo o multilazo, esto es que más de un controlador PID puede implementarse con un solo multiplexor. La figura 67 un detalle simplificado del multiplexado de entradas y desmultiplexado de salidas.

Figura 67. Multiplexado de entradas y desmultiplexado de salidas en un controlador PID



Fuente: Ing. Alfredo Ernesto Puglesi, Unidad 6 Control Industrial y Automático, pág. 3

Dependiendo del fabricante y modelo los controladores multilazo van desde 2 hasta 128 controladores PID con un misma CPU, los PLC's también pueden resolver controladores PID multilazo con su CPU, al tiempo que también procesan esquemas de control de contactos (álgebra de Boole), para ello en general se deben adquirir los módulos de entradas y salidas analógicas.

4.2.2.2 Elementos de software:

A los efectos de analizar el *software* es conveniente recordar algunos métodos numéricos, a partir del mismo algoritmo PID en el dominio del tiempo, representado a continuación en orden de la función derivativa, proporcional e integral respectivamente:

$$m(t) = K_c \cdot T_d \cdot \frac{d e(t)}{dt} + K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{T_i} \cdot \int e(t) dt$$

Para digitalizar tales formas, se sabe que la derivada de una función en un instante k está dada por la expresión siguiente:

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_k = \frac{f_k - f_{k-1}}{\Delta t}$$

Donde el Δt es el tiempo entre muestreo y muestreo. A su vez la función integral está representada por la próxima expresión:

$$\left. \int f(t) dt \right|_k = \sum_{k=0}^n f_k \cdot \Delta t$$

Si ahora se considera un instante n ésimo en el que tiene lugar una salida m_n del controlador PID, a la vez que se le llama e_n al error actual y e_{n-1} o e_{old} por ser anterior al e_n , se tiene que la expresión temporal anterior pasa a ser la siguiente digitalizada:

$$m_n = K_c \cdot \left[T_d \cdot \frac{(e_n - e_{n-1})}{\Delta t} + e_n + \frac{1}{T_i} \cdot \sum_{k=0}^n e_k \cdot \Delta t \right]$$

Si se asume que Δt es igual al T_s y que la variable s es igual a la sumatoria S de los errores de la función integral. Finalmente se hace:

$$\begin{aligned} K_p &= K_c \\ K_i &= K_c \cdot T_s / T_i \\ K_d &= K_c \cdot T_d / T_s \end{aligned}$$

donde,

$$\begin{aligned} T_s &= \Delta T \\ S_n &= S_{n-1} + e_n \end{aligned}$$

Se tiene que:

$$m_n = K_p \cdot e_n + K_i \cdot s_n + K_d \cdot (e_n - e_{n-1})$$

Siendo esta última expresión la digitalizada del algoritmo PID y que se analiza mediante un diagrama de flujo, al que después se le agregaran subrutinas a fin de comprender las prestaciones más comunes de un controlador digital.

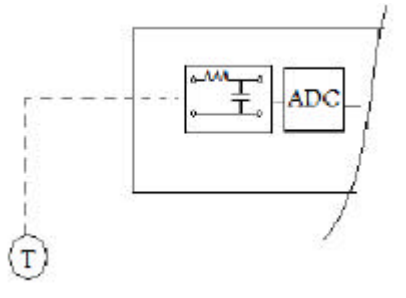
Los controladores digitales se configuran a través de un menú de opciones, si por ejemplo el usuario decide usar sólo acción proporcional, inmediatamente aparece el bias $b(t)$ o polarización y solicita se ingrese un valor para el mismo, usualmente el 50%. Por el contrario, si escoge acción P + I, desaparece el bias. Por lo explicado la salida para un controlador sólo proporcional será:

$$m_n = K_p \cdot e_n + b_n$$

Además y por razones que tienen que ver con la naturaleza de los procesos, es conveniente adelantar en este punto que la acción derivativa rara vez se emplea, tanto es así que hay autores que la consideran una acción de excepción, esto es así dado que la mencionada acción se aplica sólo a procesos capacitivos de forma tal, que ante un cambio de valor deseado $r(t)$, por ejemplo en escalón, se adelante la respuesta de la variable controlada $c(t)$; en general se aplica a lazos de temperatura donde es alta la inercia térmica y en niveles de gran capacitancia, su uso en otras variables, con alta velocidad de variación, como caudales, presión, etc. conduce a un mal desempeño del lazo ya que deriva frentes abruptos de $c(t)$ que desencadenan impulsos en la salida $m(t)$, llevando al elemento de acción final de un extremo a otro, haciendo cuando menos, inútil la acción de control o perjudicial la mayor parte de las veces.

Con el fin de que la acción derivativa sea lo más eficiente posible, dentro del menú de opciones de los controladores digitales, está la posibilidad implementar un filtro pasa bajos por *software* y a veces, en otros, su realización es por *hardware* (filtro RC) como lo muestra la Figura 68, y en ambos casos su misión es la de eliminar ruidos de alta frecuencia entrantes junto con la señal a procesar, normalmente la constante de tiempo del filtro mencionado es la mitad del tiempo de muestreo T_s .

Figura 68. Estructura de filtro RC en un controlador PID

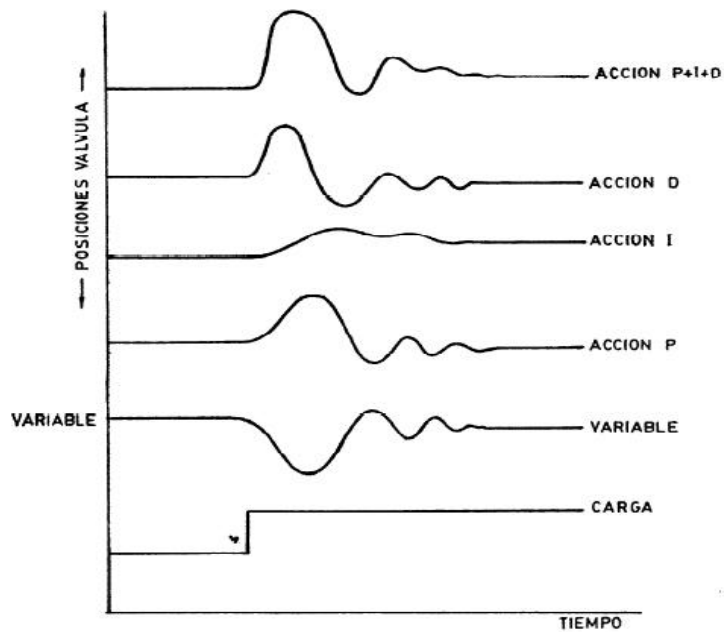


Fuente: Ing. Alfredo Ernesto Puglesi, Unidad 6 Control Industrial y Automático, pág. 7

4.2.3 Selección del sistema de control adecuado para el proceso

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control den la forma señalada en la figura 69.

Figura 69. Acciones PID



Sus características esenciales se pueden resumir de la siguiente forma:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el coste del sistema de control. Es decir debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir el controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso. No obstante, los instrumentos actuales de tipo modular admiten fácilmente la adición de una o más acciones. Los controladores digitales incorporan las tres acciones, de modo que la elección de las mismas es técnica, para que el proceso esté bien controlado, y no económica.

En la tabla siguiente se indica una guía general para seleccionar un sistema de control, si bien hay que señalar que sólo sirve de orientación general ya que solamente se debe de considerar como guía de consulta para buscar una aproximación al control adecuado.

Tabla V . Guía de selección de un sistema de control

Control	Proceso		Cambios de carga	Aplicaciones
	Capacitancia	Resistencia		
Todo-nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad
Flotante	Media	xxx	xxx	Procesos con pequeños tiempos de retardo
Proporcional	Pequeña a media	Pequeña	Moderados	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es un inconveniente
Proporcional + Integral	Cualquiera	xxx	Cualquiera	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal
Proporcional + derivada	Media	xxx	xxx	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
Proporcional + Integral + derivada	Cualquiera	Grande	Rápido	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperaturas en intercambiador de calor)

4.2.4 Criterios de estabilidad en el control

La estabilidad del control es la característica del sistema que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación. Los criterios deseables para la estabilidad son los siguientes:

Criterio de razón de amortiguamiento: La amortiguación de la respuesta es tal que la relación de amplitudes entre las crestas de los dos primeros ciclos sucesivos es 0.25, es decir, que cada onda equivale a una cuarta parte de la anterior. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a un valor estable: una relación mayor que $\frac{1}{4}$ dará mayor estabilidad pero prolongará el tiempo de normalización de la variable, mientras que una relación menor que $\frac{1}{4}$ devolverá la variable más rápidamente al punto de consigna o a un valor estable, pero perjudicará la estabilidad del sistema. Este criterio es el más importante y se aplica especialmente en los procesos donde la duración de la desviación es tan importante como el valor de la misma.

Criterio de área mínima: Este criterio indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima, para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo más corto. Es decir, la expresión $\int e dt$, en la que e es el valor absoluto de la desviación, debe tener el valor mínimo. Se denomina también criterio de la integral mínima del valor absoluto del error (IAE) y es un criterio intermedio entre ISE e IAE.

Criterio de la mínima integral del cuadrado del error (ISE): donde debe ser mínima la expresión $\int [e(t)]^2 dt$ que penaliza los grandes errores ($e(t)$ está elevado al cuadrado) con lo cual las respuestas son poco amortiguadas.

Criterio de mínima integral en el tiempo del valor absoluto del error (ITAE):

donde debe ser mínima la expresión $\int |e(t)| t \cdot dt$ y que penaliza los pequeños errores que se presentan al final de la curva de recuperación, con lo cual, las respuestas son altamente amortiguadas. En general estos criterios están restringidos a tiempos de retardo pequeños y medios que cumplen la condición:

$$0 < (\text{tiempo de retardo del proceso} / \text{constante de tiempo del proceso}) = 1$$

Criterio de mínima perturbación: Este requiere una curva de recuperaciones no cíclicas, y se aplica cuando por ejemplo, las correcciones rápidas o cíclicas de una válvula de control de vapor pueden perturbar seriamente las presiones de vapor de alimentación e influir en otros procesos alimentados por la misma fuente. Otro caso puede ser el control en cascada en que la señal de salida de un controlador varíe cíclicamente, y se aplique como punto de consigna en un segundo controlador creándole serias variaciones de carga.

Criterio de amplitud mínima: De acuerdo con este criterio, la amplitud de la desviación debe ser mínima, lo cual se aplica especialmente a procesos en que el producto o el equipo puede ser dañado por desviaciones momentáneas excesivas, y en este caso la magnitud de la desviación es más importante que su duración. Por ejemplo, en el caso de fusión de algunas aleaciones metálicas, el sobrepasar temporalmente una determinada temperatura puede destruir el metal. Se aplica también este criterio en el caso de procesos exotérmicos con el punto de consigna próximo a la temperatura de disparo de la reacción incontrolable.

Cuando se pone en marcha una planta tiene lugar normalmente un primer ajuste de los controladores, es decir, la fijación de los valores de las acciones PID. Dado que en la puesta en marcha el tiempo es limitado, los instrumentistas

según su experiencia, prefijan dichos valores y más adelante los ajustan definitivamente.

4.2.5 Métodos de ajuste de controladores

4.2.5.1 Métodos clásicos de ajuste de Ziegler and Nichols

En esta sección se tratarán dos métodos de ajuste de las ganancias de un controlador PID, el Método de Oscilación o Método de Respuesta en Frecuencia y el Método Basado en la Curva de Reacción o Método de Respuesta al Escalón. El primero se basa en un lazo de control sólo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al periodo de esas oscilaciones, podemos establecer las ganancias del controlador PID. El otro método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos se establecen las ganancias del controlador PID. Estos métodos fueron propuestos por Ziegler y Nichols (Z-N) en 1942, quienes se basaron en la práctica para desarrollarlos.

4.2.5.2 Método de Oscilación

Este procedimiento es válido solo para plantas estables a lazo abierto y se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Utilizando solo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Se requieren oscilaciones lineales y que deben ser observadas en la salida del controlador.

- Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el período de oscilación de la salida del controlador, P_c . (en el diagrama de Nyquist, corresponde a que $K_c G(j\omega)$ cruza el punto $(-1, 0)$ cuando $K_p = K_c$).
- Ajustar los parámetros del controlador según la Tabla VI.

Tabla VI. Parámetros de ajuste (método de oscilación)

	K_p	T_i	T_d
P	$0.50K_c$		
PI	$0.45K_c$	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$\frac{P_c}{8}$

Fuente: Virginia Mazzone, Controladores PID, pág. 4

Dicha tabla fue obtenida por Ziegler y Nichols quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para plantas que puedan describirse satisfactoriamente por un modelo de la forma:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{v_0 s + 1}, \quad \text{donde } v_0 > 0$$

4.2.5.3 Método basado en la curva de reacción

Muchas plantas pueden ser descritas satisfactoriamente por el modelo:

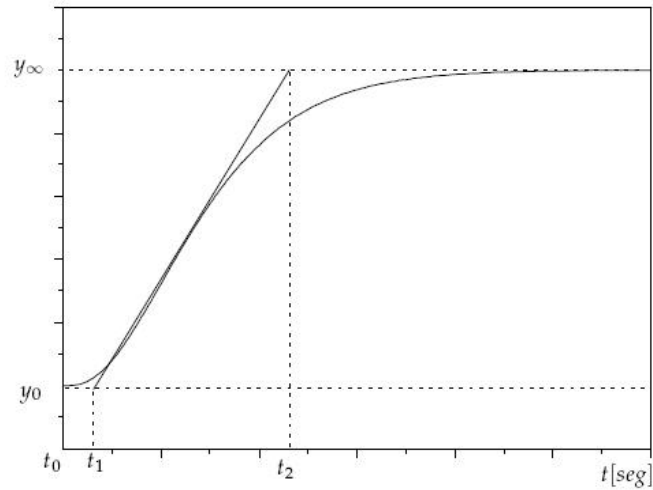
$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{\nu_0 s + 1} \quad \text{donde} \quad \nu_0 > 0$$

Una versión cuantitativa lineal de este modelo puede ser obtenida mediante un experimento a lazo abierto, utilizando el siguiente procedimiento:

- Con la planta a lazo abierto, se lleva a la planta a un punto de operación normal. Se asume que la salida de la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para una entrada constante $u(t) = u_0$.
- En el instante inicial t_0 , se aplica un cambio en la entrada escalón, desde u_0 a u_1 (esto debería ser en un rango de 10 al 20% de rango completo).
- Se registra la salida hasta que se estabiliza en el nuevo punto de operación. Se supone que la curva que se obtiene es la que se muestra en la Figura 70. Esta curva se llama curva de reacción del proceso. Se calculan los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_0}; \quad \tau_0 = t_1 - t_0; \quad \nu_0 = t_2 - t_1$$

Figura 70. Respuesta al escalón de la planta



Fuente: Virginia Mazzone, Controladores PID, pág. 6

El modelo obtenido puede ser utilizado para varios métodos de ajuste de controladores PID. Uno de estos también fue propuesto por Ziegler y Nichols. El objetivo de diseño es alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo pico de la respuesta a una referencia escalón. Los parámetros sugeridos por Z-N son los que se muestran en la Tabla VII.

Tabla VII. Parámetros de ajuste (método de curva de reacción)

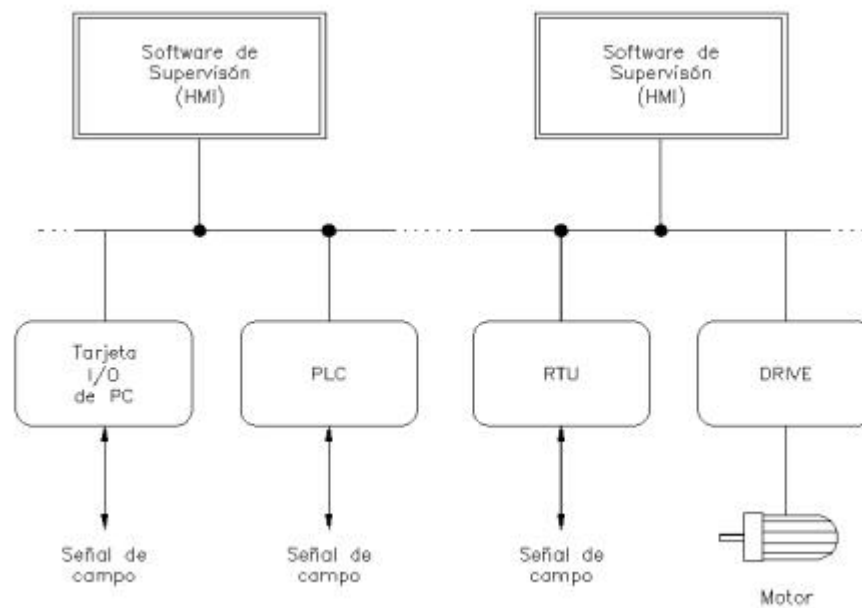
	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\nu_0}{K_0\tau_0}$		
PI	$\frac{0.9\nu_0}{K_0\tau_0}$	$3\tau_0$	
PID	$\frac{1.2\nu_0}{K_0\tau_0}$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$

Fuente: Virginia Mazzone, Controladores PID, pág. 6

4.2.6 Interfaces humano máquina (HMI)

Las siglas HMI es la abreviación en ingles de Interfaz Humano Máquina. Los sistemas HMI se pueden pensar como una “ventana” de un proceso. Esta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en una computadora. Los sistemas HMI en computadoras se los conoce también como *software* HMI (en adelante HMI) o de monitoreo y control de supervisión. Las señales del proceso son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada/salida en la computadora, PLC's (Controladores lógicos programables), RTU (Unidades remotas de I/O) o DRIVE's (Variadores de velocidad de motores). Todos estos dispositivos deben tener una comunicación que entienda el HMI. En la figura que se muestra a continuación se puede apreciar la arquitectura de una HMI.

Figura 71. Arquitectura de las HMI



4.2.6.1 Tipos de HMI

- Desarrollos a medida. Se desarrollan en un entorno de programación gráfica como VC++, Visual Basic, Delphi, etc.
- Paquetes enlatados HMI. Son paquetes de *software* que contemplan la mayoría de las funciones estándares de los sistemas SCADA. Ejemplos son FIX, WinCC, Wonderware, etc.

4.2.6.2 Funciones de un *Software* HMI

- **Monitoreo.** Es la habilidad de obtener y mostrar datos de la planta en tiempo real. Estos datos se pueden mostrar como números, texto o gráficos que permitan una lectura más fácil de interpretar.
- **Supervisión.** Esta función permite junto con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente desde la computadora.
- **Alarmas.** Es la capacidad de reconocer eventos excepcionales dentro del proceso y reportar estos eventos. Las alarmas son reportadas basadas en límites de control preestablecidos.
- **Control.** Es la capacidad de aplicar algoritmos que ajustan los valores del proceso y así mantener estos valores dentro de ciertos límites. El control va mas haya del control de supervisión removiendo la necesidad de la interacción humana. Sin embargo la aplicación de esta función desde un *software* corriendo en una PC puede quedar limitada por la confiabilidad que quiera obtenerse del sistema.
- **Históricos.** Es la capacidad de muestrear y almacenar en archivos, datos del proceso a una determinada frecuencia. Este almacenamiento de datos es una poderosa herramienta para la optimización y corrección de procesos.

4.2.6.3 Tareas de un *software* de supervisión y control

- Permitir una comunicación con dispositivos de campo.
- Actualizar una base de datos “dinámica” con las variables del proceso.
- Visualizar las variables mediante pantallas con objetos animados (mímicos).
- Permitir que el operador pueda enviar señales al proceso, mediante botones, controles ON/OFF, ajustes continuos con el *mouse* o teclado.
- Supervisar niveles de alarma y alertar/actuar en caso de que las variables excedan los límites normales.
- Almacenar los valores de las variables para análisis estadístico y/o control.
- Controlar en forma limitada ciertas variables de proceso.

4.2.6.4 Tipos de *software* de supervisión y control para PC

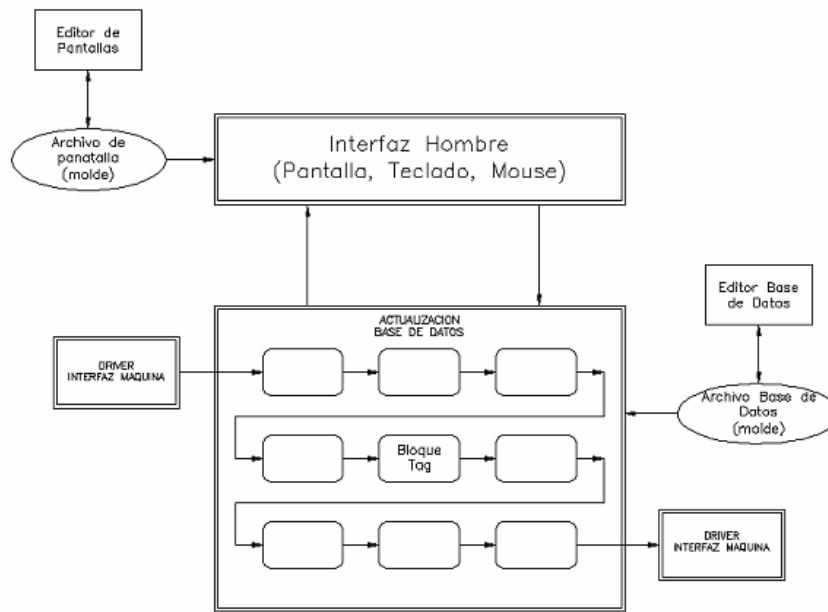
- lenguajes de programación visual como Visual C++ o Visual Basic. Se utilizan para desarrollar *software* HMI a medida del usuario. Una vez generado el *software* el usuario no tiene posibilidad de re-programarlo.

- Paquetes de desarrollo que están orientados a tareas HMI. Pueden ser utilizados para desarrollar un HMI a medida del usuario y/o para ejecutar un HMI desarrollado para el usuario. El usuario podrá re-programarlo si tiene la llave (*software*) como para hacerlo. Ejemplos son FIX Dynamics, Wonderware, PCIM, Factory Link, WinCC

4.2.6.5 Como facilitan las tareas de diseño los paquetes orientados HMI/SCADA

- Incorporan protocolos para comunicarse con los dispositivos de campo más conocidos. Drivers, OPC
- Tienen herramientas para crear bases de datos dinámicas
- Permiten crear y animar pantallas en forma sencilla,
- Incluyen gran cantidad de librerías de objetos para representar dispositivos de uso en la industria como: motores, tanques, indicadores, interruptores, etc.

Figura 72. Estructura general del software HMI



Los *software* HMI están compuestos por un conjunto de programas y archivos. Hay programas para diseño y configuración del sistema y otros que son el motor mismo del sistema. En la Fig. 72. se muestra como funcionan algunos de los programas y archivos más importantes. Los rectángulos de la figura representan programas y las elipses representan archivos. Los programas que están con recuadro simple representan programas de diseño o configuración del sistema; los que tienen doble recuadro representan programas que son el motor del HMI.

Con los programas de diseño, como el “editor de pantallas” se crean moldes de pantallas para visualización de datos del proceso. Estos moldes son guardados en archivos “Archivo de pantalla” y almacenan la forma como serán visualizados los datos en las pantallas.

Interfaz Hombre: Es un programa que se encarga de refrescar las variables de la base de datos en la pantalla, y actualizarla, si corresponde, por entradas del teclado o el *mouse*. Este programa realiza la interfaz entre la base de datos y el hombre. El diseño de esta interfaz esta establecido en el archivo molde “Archivo de pantalla” que debe estar previamente creado.

Base de datos: Es un lugar de la memoria de la computadora donde se almacenan los datos requeridos del proceso. Estos datos varían en el tiempo según cambien los datos del proceso, por esta razón se denomina “base de datos dinámica”. La base de datos esta formada por bloques que pueden estar interconectados. La creación de la base de datos, sus bloques y la relación entre ellos se realiza a través de “editor de base de datos”.

Driver: La conexión entre los bloques de la base de datos y las señales del proceso se realiza por medio de *drivers*. Estos *drivers* manejan los protocolos de comunicación entre el HMI y los distintos dispositivos de campo. Los *drivers* son entonces la interfaz hacia la máquina.

Bloques (*tags*): Como ya se menciona, la base de datos esta compuesta por bloques. Para agregar o modificar las características de cada bloque se utiliza el editor de la base de datos. Los bloques pueden recibir información de los *drivers* u otros bloques y enviar información hacia los *drivers* u otros bloques.

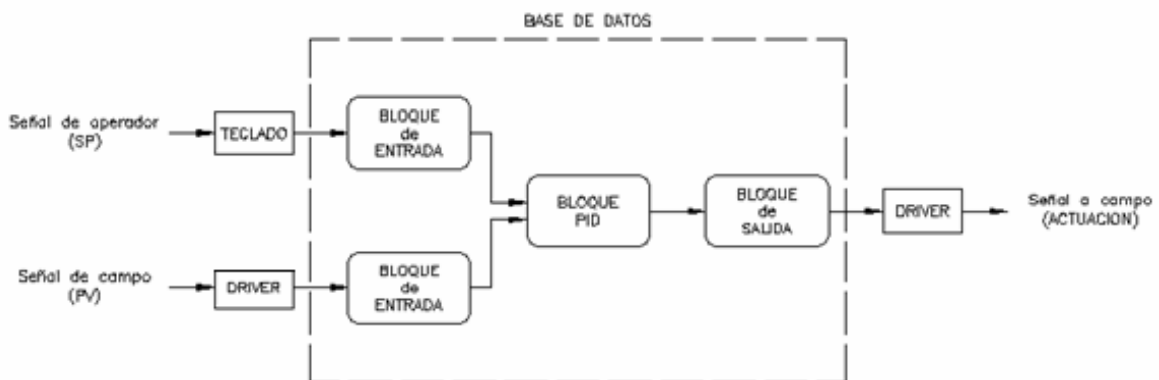
Las funciones principales de los bloques son:

- Recibir datos de otros bloques o al *driver*.
- Enviar datos a otros bloques o al *driver*.
- Establecer enlaces (links) a la pantalla (visualización, teclado o *mouse*)
- Realizar cálculos de acuerdo a instrucciones del bloque.

- Comparar los valores con umbrales de alarmas
- Escalar los datos del *driver* a unidades de ingeniería.

Los bloques pueden estructurarse en cadenas para procesar una señal como se muestra en la Fig.73.

Figura 73. Bloques en estructura de cadenas para procesar una señal



5. PROPUESTA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UN CLARIFICADOR DE JUGO DE CAÑA

5.1 Descripción de la propuesta para la automatización del proceso de clarificación de jugo de caña

El proceso de clarificación de jugo de caña en el que se basa la propuesta consiste en los siguientes pasos:

1. Aumento de la temperatura del jugo de caña, bajo la condición de flujo constante y suficiente jugo de caña en el tanque pulmón.
2. Liberación de impurezas para la dosificación de ácido fosfórico.
3. Nivelación del pH mediante dosificación de cal en solución.
4. Precipitación y flotación de impurezas mediante dosificación de floculante o aniónico.

5.2 Lazos de control

Conforme al proceso descrito arriba se derivan los siguientes lazos de control.

5.2.1 Lazo de control del flujo de jugo de caña

Este lazo de control depende del suficiente suministro de jugo de caña a la siguiente etapa del proceso. Por lo tanto, el flujo puede ser fijado en base al

nivel del tanque pulmón (de alimentación) o a un valor fijo determinado por el operador del sistema.

Para tal efecto se utilizan los siguientes elementos de campo o señales .

- Medidor de flujo de jugo de caña de tipo magnético de diámetro igual al de la tubería de descarga que típicamente es de 4 pulgadas con un rango de medición de 0 a 100 metros cúbicos por hora , con *display* local para referencia de los operadores en el punto de medición, con una salida de control de 4 a 20 mA. y que se describirá como FT100
- Válvula para control de flujo de jugo de caña del tipo globo segmentado de 4 pulgadas con sellos de teflón, con diafragma de 3 a 15 psig y conexión al proceso bridada de 4 pulgadas clase 150 que se describirá como FCV100
- Convertidor I/P para control de la válvula de control de jugo de caña con entrada de 4 a 20 mA y salida de 3 a 15 psig que se describirá como IP100
- Sensor de nivel para tanque pulmón de jugo de caña consistente en un medidor de presión diferencial con conexión al proceso del lado de alta por medio de una brida ANSI clase 150 con diafragma extendido de 3" de acero inoxidable para evitar taponamientos o incrustaciones y con la conexión del lado de baja abierta hacia el ambiente ya que es un tanque abierto. El sensor se identificará como LT100

5.2.2 Lazo de control de calentamiento de jugo de caña.

Este lazo de control opera a un valor fijo, pero por seguridad debe de limitarse su operación cuando no exista flujo de jugo de caña para evitar daños en las paredes del clarificador producidos por el vapor de entrada.

Para tal efecto se utilizan los siguientes elementos de campo o señales.

- Sensor de temperatura tipo RTD de 3 hilos de 6 o 7 pulgadas de longitud con termopozo de acero inoxidable y conexión al proceso de 3/4" NPT para fácil desconexión del proceso que se identificará como TW102
- Válvula de control de flujo de jugo de caña del tipo globo segmentado de 3 pulgadas para la alimentación del vapor de entrada con sellos de metal, diafragma de 3 a 15 psig y conexión al proceso flangeada de 3 pulgadas Clase 150 que se identificará como FCV102
- Convertidor I/P para control de la válvula de vapor con entrada de 4 a 20 mA y salida de 3 a 15 psig que se describirá como IP102
- Sensor, señal o comunicación del flujo de jugo de caña proveniente de la estrategia de control del flujo que se describirá como FT102

5.2.3 Lazo de control para dosificación de ácido fosfórico.

Este lazo de control dosifica el químico proporcionalmente a la medición de flujo de jugo de caña y a la cantidad de partes por millón que se desean obtener. También para evitar un disparo por sobrecarga de los motores de las

bombas dosificadoras se debe de tener un mínimo de flujo de jugo de caña diferente de cero.

Para tal efecto se utilizan los siguientes elementos de campo o señales .

- Sensor, señal o comunicación del flujo de jugo de caña proveniente de la estrategia de control del flujo que se describirá como FT104
- Válvula de control del tipo globo segmentado para control del flujo de ácido que se describirá como FCV104
- Medidor de flujo de ácido fosfórico para convertirlo en lazo de control que se designará con FE 104-A
- Relé de paro y arranque del motor
- Tabla de datos de señal de salida requerida versus flujo de bomba para lograr la dosificación requerida por el proceso

5.2.4 Lazo de control de pH.

Este lazo opera en un valor fijo. De la misma manera ya que este es dosificado por medio de una bomba, debe de cumplirse con un mínimo de flujo de jugo de caña para proteger al sistema contra sobrecargas del motor de la bomba.

Para tal efecto , se utilizan los siguientes elementos de campo o señales.

- Sensor de pH que se designará con NT108

- Válvula del tipo de globo segmentado para control de cal en lechada que se designará con NCV108
- Sensor, señal o comunicación del flujo de jugo de caña proveniente de la estrategia de control del flujo que se designará con FE-108
- Relé de paro y arranque del motor de la bomba.

5.2.5 Lazo de control para dosificación del floculante (aniónico).

Este lazo de control sirve para dosificar el químico proporcionalmente a la medición de flujo de jugo de caña y a la cantidad de partes por millón que se deseen obtener en el jugo. También para evitar el disparo por sobrecarga de los motores de las bombas dosificadoras se debe de tener un mínimo de flujo de jugo de caña diferente de cero.

Para tal efecto se utilizan los siguientes elementos de campo o señales.

- Sensor, señal o comunicación del flujo de jugo de caña que se designará con FE-106-B
- Válvula de control del tipo globo segmentado para control del flujo de floculante que se describirá como FCV106
- Medidor de flujo de ácido fosfórico para convertirlo en lazo de control que se designará como FE106-A

- Relé de paro y arranque del motor de la bomba.
- Tabla de datos de señal de salida requerida versus flujo de bomba para lograr la dosificación requerida por el proceso

5.2.6 Función para cambio en la dosificación en función de las ppm requeridas por el proceso

Esta función sirve para seleccionar las partes por millón que se requieren en el proceso, debido a que la dosificación necesaria para lograr una clarificación exitosa se ve influenciada por el tipo jugo de caña, las condiciones ambientales, la temporada de la zafra, las condiciones de cultivo, etc. por lo que es necesario que en función de las condiciones de la caña de azúcar y por ende del jugo de caña crudo, se seleccione la cantidad de partes por millón requeridas en la clarificación que a su vez afectarán la proporción que se debe dosificar automáticamente. La selección de partes por millón requeridas en el sistema se realizará por medio de una interface humano máquina o directamente en los controladores y quedará a cargo del operador en base a lo indicado por las pruebas de laboratorio sobre las características de la caña de azúcar.

Para efectuar los lazos de control descritos anteriormente se utilizarán dos controladores multilazo MOD30ML marca MICROMOD con las señales distribuidas como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla VIII. Distribución de señales en controladores multilazo MOD30ML

Equipo / Contenido	Señal	Rango
MOD30 ML 1		
<u>Lazo de Control de Flujo de Meladura</u>		
Flujo de Meladura	4 a 20 mA, Entrada	0 a 100 m ³ /h
Señal de Control de Válvula de Flujo	4 a 20 mA, Salida	0 a 100 %
Señal de Nivel de Tanque Pulmón	4 a 20 mA + Fuente externa de 24 VDC, entrada	0 a 100%
<u>Lazo de Control de Temperatura</u>		
Temperatura de la Meladura calentada	4 a 20 mA, Entrada	0 a 100 °C
Señal de Control de Válvula de Vapor	4 a 20 mA, Salida	0 a 100 %
MOD30 ML 2		
Funciones de Ácido Fosfórico y Floculante		
Señal retransmitida de Flujo de Meladura	4 a 20 mA, Entrada	0 a 100 m ³ /h
Señal de Control Manual de Ácido Fosfórico	0 a 1000 ohm, Entrada	simula de 0 a 100 m ³ /h
Señal de Control Manual de Floculante	0 a 1000 ohm, Entrada	simula de 0 a 100 m ³ /h
Salida de Control de Flujo de Ácido Fosfórico	4 a 20 mA, Salida	0 a 640 ml/m
Salida de Control de Flujo de Floculante	4 a 20 mA, Salida	0 a 38 l/m
Paro Arranque de Bomba de Ácido Fosfórico	Relé de estado sólido	Abierto o Cerrado
Paro Arranque de Bomba de Floculante	Relé de estado sólido	Abierto o Cerrado
<u>Lazo de Control de pH</u>		
Señal de pH	4 a 20 mA, Entrada	0 a 14 pH
Señal de control de Cal	4 a 20 mA, Salida	0 a 100 %
Manipulación del Control de Cal	0 a 1000 ohm, Entrada	0 a 100 %

5.3 Equipo de control y visualización propuesto

Para lograr el control del proceso de clarificación del jugo de caña se propone utilizar controladores multilazo MOD30ML marca MICROMOD como el que se muestra en la figura 74, pero se debe hacer la salvedad de que cualquier controlador multilazo puede ser utilizado para este propósito siendo los principios de funcionamiento y de filosofía de creación de los lazos igual, y existiendo diferencias únicamente en la forma de programación y funciones disponibles.

Figura 74. Controlador multilazo MOD30ML



Fuente: MicroMod Automation, MOD30ML multiloop controller specification sheet, pág. 1

5.3.1 Controlador MOD30ML

5.3.1.1 Descripción

El controlador MOD 30ML es un controlador multilazo y multifunciones con entradas y salidas flexibles, algoritmos de control poderosos y una interface de operador configurable. El controlador MOD 30ML combina el poder del control continuo de un DCS (Sistema de control distribuido) con un manejo de señales de entradas y salidas discretas y fácil configuración de secuencia, similar a la de los PLC (controlador lógico programable), en un paquete compacto. El *display* brillante fluorescente al vacío, proporciona una fácil operación de hasta los procesos más complejos. Además el controlador proporciona una red de comunicación dual para una fácil integración en virtualmente cualquier sistema de monitoreo de una planta.

5.3.1.2 Funcionalidad

Los controladores MOD 30ML pueden realizar hasta seis lazos PID sencillos o cuatro estrategias de control tipo cascada, así como funciones matemáticas y lógicas, caracterización y acondicionamiento de señales, control secuencial, control continuo y discreto. Los siguientes bloques de control están disponibles en una librería estándar. En la mayoría de los casos, hay muchas más instancias de bloques disponibles que podrían ser utilizados en la estrategia de control más avanzada.

5.3.1.3 Bloques de control disponibles

Los bloques de control disponibles en los controladores MOD30ML son los siguientes:

Control PID

- Control con múltiples combinaciones de P, I y D
- Ganancia, Integral y control derivativo
- Control anticipativo
- Retroalimentación externa
- Ganancia adaptativa e integral
- Compensación de tiempo muerto
- Punto de consigna local / remoto con control de relación y / o bias
- Control manual y automático
- Control integral,
- Rastreo de punto de consigna y de salida

- Selección de punto de consigna
- Limitación de punto de consigna y salida
- Valores de restablecimiento de alimentación configurables

Matemática y lógica

Expresiones matemáticas y lógicas creadas por el usuario con operaciones condicionales y aritméticas incluyendo:

- Aritméticas: sumas, restas, multiplicaciones, divisiones,
- Comparadores: menor que, menor o igual que, igual que, no igual que
- Lógicas: Y, O, NO Y, NO O, NO
- Exponenciales, absolutas, logaritmo natural, logaritmo base 10, enteros, elevados a la potencia
- Raíz cuadrada, operador momentáneo

Secuencial

Control *batch*, lógico y de otros tipos de control secuencial basado en argumentos lógicos *if – then – else* que le permiten al usuario saltar pasos, especificar varios pasos para varias salidas, y regresar a pasos previos. Cada bloque soporta:

- 128 entradas
- 64 salidas
- 512 pasos

Los bloques de secuencia pueden ser encadenados juntos para incrementar la capacidad de entradas y salidas

Caracterización (Tabla *piecewise*)

Soporta 60 pares de coordenadas X, Y de punto flotante coordinada para realizar linearizaciones definidas o datos de recetas. Los bloques pueden ser conectados en cascada para lograr pares adicionales.

Función de entradas analógicas y digitales

Proporciona filtrado, normalización, linearización, acción y escalado de las entradas que llegan al controlador

Temporizador

Utilizado para realizar funciones de temporizado como retardar un arranque o paro, la duración de pulsos, medir el tiempo de un intervalo, o periódicamente auto resetear el temporizado. Un temporizador puede ser configurado hacia arriba o hacia abajo para una duración máxima de 1193 horas, 2 minutos y 47.295 segundos. Las funciones de control incluyen:

- Dirección (arriba / abajo)
- Resetear el valor del tiempo
- Cargar un valor de reseteo definido por el usuario
- Deshabilitar y mantener el valor actual
- Limitar

Totalizador

Cuenta una señal de entrada analógica. Entre las características incluye: Límites de fronteras, selección de dirección hacia arriba o hacia abajo, factor de escala, 2 conteos predeterminados y estado del límite.

Linearización

Produce un valor linearizado de la señal de entrada de forma:

- Lineal
- Cuadrado y cuadrado modificado
- Raíz cuadrada y raíz cuadrada modificada
- *Piecewise*
- *Piecewise* inversa
- Termopar (Tipos, B, E, J, K, N, R, S, T)
- Tipos de RTD (Platino 0.00385, 0.0003923, 0.003902, 0.003911, y Níquel 0.00672)

Alarma de proceso

Produce una señal discreta para advertir de una condición de proceso irregular basada en: MENOR, MENOR / IGUAL, MAYOR, MAYOR / IGUAL, IGUAL, NO IGUAL, DESVIACION

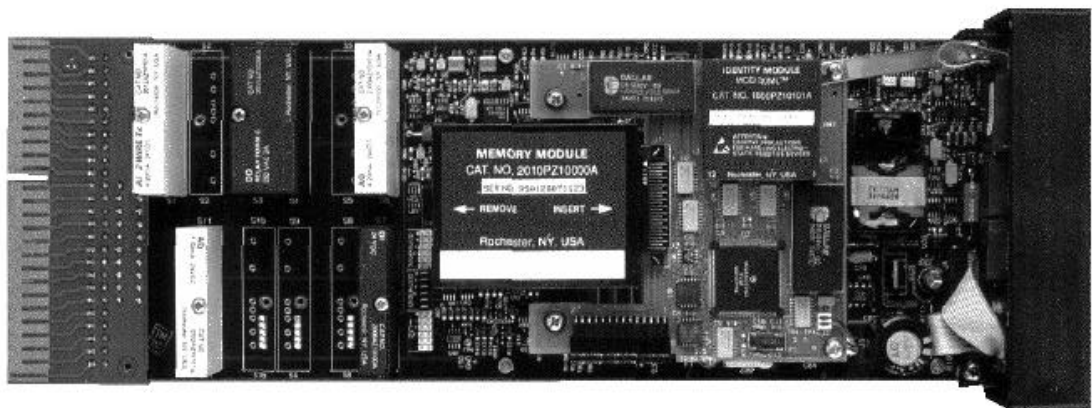
Punto de consigna de rampa y sostenido

Hasta 100 segmentos de rampa o sostenido individualmente garantizados con perfiles de repetición función de rastreo, cuatro estados de eventos de segmentos, comandos de reseteo, detención, arranque, detenimiento y escape.

5.3.1.4 Plataforma de *hardware*

La plataforma de *hardware* básica incluye a la tarjeta del *carrier*, la CPU, *display* fluorescente al vacío, y terminaciones. El instrumento usa una memoria RAM no volátil para almacenar la base de datos del usuario y todos los parámetros actuales y de operación como se muestra en la figura 75.

Figura 75. Plataforma de *hardware* de controlador multilazo MOD30ML



Fuente: MicroMod Automation, MOD30ML multiloop controller specification sheet, pág. 3

La arquitectura del controlador multilazo MOD30ML incluye un bloque de terminales de dos piezas de 50 posiciones en total para conexión directa del alambrado de campo en la parte trasera del instrumento. El bloque de terminales puede ser temporalmente desconectado del controlador para facilitar el cableado.

5.3.1.5 Entradas y salidas de proceso

Entradas y salidas universales integradas

El controlador multilazo MOD 30ML incluye como característica estándar:

- Dos entradas analógicas, independientemente configurables como corriente (0 - 20mA ó 4-20mA), voltios (rango 0 – 10V), millivoltios, RTD de 2 ó 3 hilos, o termopares tipo B, E, J, K, N, R, S, T.
- Dos fuentes de alimentación de 24 VDC para transmisor independientemente aisladas
- Dos salidas de corriente (rangeadas por el usuario, 0-20mA)

Módulos de entradas y salidas opcionales

El controlador multilazo MOD30ML viene listo para expandirse al aceptar hasta once módulos, de simple punto analógicos o digitales. Todos los módulos de entradas y salidas digitales están completamente aislados de canal a canal y de canal a tierra.

Los módulos adicionales disponibles son:

- Entrada de corriente, con o sin fuente de alimentación para transmisor
- Entrada de RTD de 3 hilos, 100 ohmios, o 2 hilos, 1000 ohmios con detección de quemado con escala hacia arriba.
- Entrada de termopar con detección de quemado con escala hacia arriba (soporta todos los tipos de termopar estándar; con compensación de junta fría proporcionada)
- Entrada de voltios y milivoltios
- Entradas digitales aisladas (2.5-28Vdc, 4-16Vdc, 10-32Vdc, 12-32Vac)
- Entradas digitales no aisladas (sensibles al contacto)
- Salida digital aislada (5-60Vdc, 5-200Vdc, 12-140Vac, 24-280Vac)
- Salidas digitales no aisladas
- Salida de relé mecánico (dos forma A, dos forma B o una forma C)

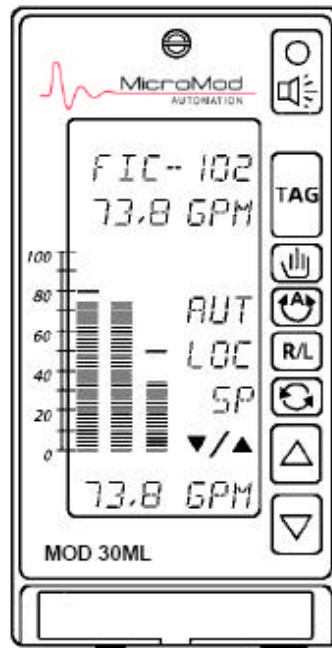
5.1.3.6 *Display del operador*

El frente de la pantalla fluorescente al vacío, brillante y de alta visibilidad proporciona un alto nivel de información para facilidad de operación. En el modo de operación normal cada pantalla muestra tres gráficas de barra representando al proceso, el punto de consigna, y la salida. Tres líneas alfanuméricas de ocho caracteres indicando la etiqueta del lazo, el valor numérico del proceso; y el valor numérico de la variable indicada por el indicador de estado (típicamente la salida y el punto de consigna). Los indicadores de estado de tres caracteres muestran el modo del controlador (Manual / Automático), Estado del *setpoint* (Local / Remoto), y la variable cuyo valor esta siendo mostrado en la línea del fondo de la pantalla. Las teclas de arriba / abajo son utilizadas para cambiar este valor (por ejemplo, el *setpoint*, la salida, el bias). El método estándar del controlador permite al operador

seleccionar el valor deseado sin ningún sobresalto del proceso. Sin embargo, las teclas de rampa pueden ser configuradas para varios modos como la rampa basada en el tiempo para proporcionar familiaridad y reducir el reentrenamiento del operador. Las alarmas de proceso y diagnóstico son indicadas por medio de un LED rojo parpadeante en el teclado, y / o un *display* parpadeante así como una alarma audible. La información completa de la alarma incluye el valor, el tipo de alarma (alta, baja, desviación, etc.) y una etiqueta configurada por el usuario que puede ser vista presionando la tecla de alarma. Una tecla de retorno permite al operador el cambiar directamente desde el *display* de alarma hacia el *display* de la variable de proceso que esta en condición de alarma. Cualquier número de alarmas puede ser configurado para una señal analógica o digital, y no hay límite en el número total de alarmas por controlador. Los lazos de control son sintonizados desde *displays* de ajuste, accesados al utilizar contraseñas especificadas por el usuario. Parámetros de sintonización estándar, valores de receta, y coordenadas de tablas X/Y pueden ser ingresadas a través del panel frontal, sin la necesidad de un *handheld* o de una computadora. En adición a los *display* estándar, pantallas de aplicaciones específicas pueden ser configuradas para operaciones de secuencia y *batch*, operación de dispositivos discretos, selección de recetas, e indicación de múltiples variables. A las teclas se les puede asignar diferentes funciones por medio de un lenguaje de programación. El número de pantallas por controlador esta limitado solamente por la preferencia del operador y la filosofía de la planta. También es posible configurar pantallas ocultas accesadas a través de contraseñas definidas por el usuario.

El controlador MOD 30ML también muestra valores de entrada sin procesar para propósitos de comisionado y puesta en marcha, así como también información de diagnósticos detallada antes y durante la operación normal. Un registro de eventos de hasta 1024 entradas es mantenido por el instrumento, y puede ser vista desde la pantalla frontal del controlador.

Figura 76. Pantalla frontal del controlador



Fuente: MicroMod Automation, MOD30ML multiloop controller specification sheet, pág. 4

Para la propuesta de la automatización del proceso de clarificación de jugo de caña se distribuiría el control dentro de dos MOD30ML de la siguiente forma:

5.1.3.7 Comunicaciones

La capacidad de comunicación serial es una característica estándar del controlador multilazo MOD30ML. El instrumento base incluye un puerto integrado, seleccionable por medio de un *jumper* para comunicación ICN (protocolo propietario de la compañía ABB), o para comunicación Modbus RTU sobre RS-485 ó RS-232.

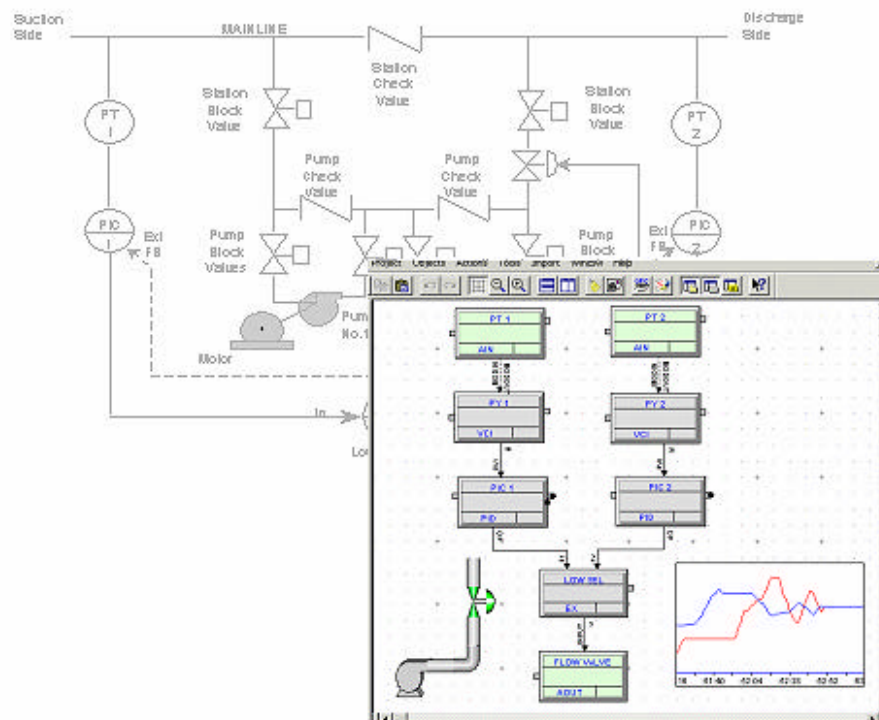
Cuando es seleccionado como RS-232, el instrumento se puede comunicar con una computadora por medio de un cable desde el panel frontal o en un controlador estándar. En una red Modbus el controlador MOD30ML puede actuar como esclavo donde una computadora u otro controlador actúa como maestro, o como maestro para otros dispositivos como registradores, posicionadores de válvula, o PLC's.

5.1.3.8 Configuración

El controlador multilazo MOD30ML incluye toda la funcionalidad de control como estándar. El usuario simplemente selecciona que estrategias o bloques son requeridos para la aplicación durante la configuración. Los lazos sencillos de PID (hasta seis) y estrategias de control de cascada (hasta cuatro) con alarmas de proceso estándar pueden ser configuradas a través del panel frontal del instrumento utilizando las teclas. Recetas integradas permiten el ingreso de los parámetros de configuración con la ayuda de menús. Para estrategias más avanzadas que requieren de cálculos lógicos, selección de señales, secuencias o, *displays* configurados por el usuario, el *software Visual application designer* proporciona un ambiente basado en Windows para crear, editar, descargar, documentar y depurar bases de datos del controlador MOD30ML como se muestra en la figura 77. El ambiente de configuración

gráfico por medio de bloques de funciones facilita la relación del flujo de proceso con la configuración. Proporciona documentación automática en la pantalla de la configuración, incluyendo la fuente de la señal y su destino, y conexiones “inteligentes” que automáticamente se acoplan a las entradas de bloque correctas.

Figura 77. Software de configuración ViZapp para controladores multilazo MOD30ML

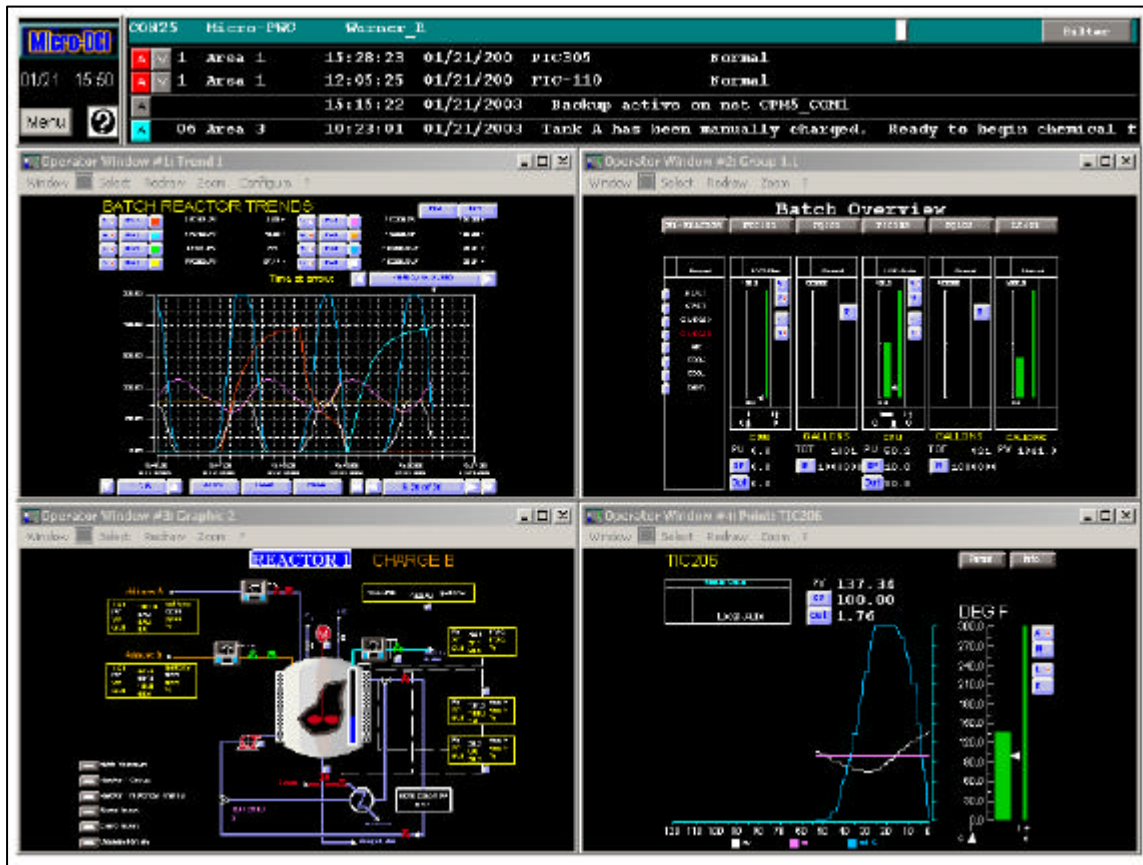


Fuente: MicroMod Automation, *Visual application designer Specification Sheet*, pág. 2

5.3.2 Diseño del sistema de visualización e interacción del sistema

Para la visualización de las variables del proceso de clarificación de jugo de caña y la interacción de los operadores con el mismo, se propone como HMI (interface humano máquina) el *software* Micro PWC Personal Work Center PW6000 de la compañía Micromod como se muestra en la figura 78.

Figura 78. *Software* HMI Micro PWC Personal Work Center PW6000



Fuente: MicroMod Automation, *Micro Personal Work Center Specification Sheet*, pág. 4

5.3.2.1 Software Micro PWC

El *software* Micro-PWC (*Personal Work Center*) PW6000 es una interface basada en computadoras personales diseñada para el monitoreo del proceso y control dentro de la arquitectura de red de automatización propietaria de MicroMod. El PW6000 es un paquete de aplicación complete de *software* con módulos de funcionalidad estándar integrados y características opcionales adicionales. Los operadores del proceso pueden monitorear y controlar todos los lazos analógicos y dispositivos discretos enlazados a la red del proceso. El ingeniero del proceso puede configurar *displays*, cambiar estrategias de control del proceso, crear formatos de reportes, y asignar niveles de acceso de seguridad para otros usuarios. El personal de mantenimiento puede monitorear el estado de operación de cualquier componente del sistema en la red y diagnosticar fallas en los componentes. El PW6000 incluye una librería de *displays* dinámicos preconfigurados específicamente diseñados para el monitoreo analógico y discreto de entradas y salidas, control regulatorio, manejo de alarmas, y tendencias. Una jerarquía de *displays* estándar está incluida para simplificar la asignación de etiquetas a los *display* de sumario, de grupo y de punto individual.

Cada paquete incluye una librería ISA de objetos dinámicos orientados. Los usuarios pueden modificar cualquiera de las plantillas y símbolos estándar para aplicaciones específicas. También incluye la capacidad integrada de configurar *displays*, gráficas, e instrumentación del proceso. Un manejo comprensivo de las alarmas permite a los usuarios fácilmente clasificar, reconocer, y tomar acciones correctivas para condiciones anormales del proceso. Este *software* incluye funcionalidad de cliente OPC, y capacidad DDE para fácil intercambio de datos entre su base de datos global y otras aplicaciones de Windows corriendo en la misma plataforma o a través de la red.

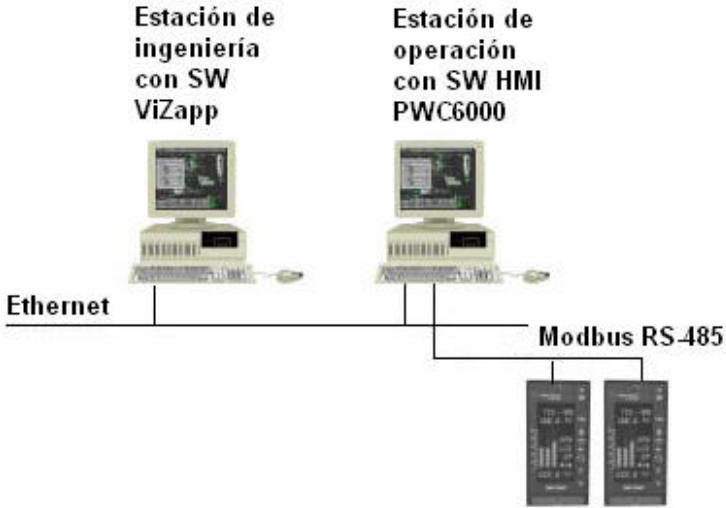
Reportes personalizados pueden ser creados utilizando hojas de cálculo de EXCEL y encadenadas a la base de datos global del *software* Micro – PWC.

5.3.2.2 Arquitectura de la aplicación

El sistema de MicroMod está compuesto de una arquitectura de aplicación multi nivel escalable, que permite una aproximación de construcción de bloques. El *software* HMI Micro PWC ofrece soluciones al nivel de la unidad de operaciones, el nivel de manejo del proceso, hasta el nivel de manejo de toda la planta o corporación. La aplicación corre dentro de un nodo de estación de trabajo de Windows 2000 o XP. Cada estación de trabajo PW6000 se comunica con los controladores multilazo MOD30ML por medio de una o más redes de comunicación serial. Los controladores MOD30ML proporcionan la interface de entradas y salidas y las funciones de control requeridas al nivel de unidad de operaciones incluyendo adquisición de datos, lazos de control regulatorio, secuencial y control de las alarmas.

Para el sistema propuesto se utilizarían dos controladores multilazo MOD30ML, los cuales se conectarían por medio del protocolo de comunicación MODBUS RS-485 y se llevaría la información a una estación de proceso con el *software* HMI Micro PWC *Personal Work Center* PWC6000 por medio de un convertidor de RS-485 a RS-232 para conexión en el puerto serial de una computadora de escritorio con el sistema Windows XP SP2 instalado como se muestra en la siguiente figura.

Figura 79. Arquitectura de conexionado de HMI con controladores MOD30ML



Fuente: MicroMod Automation, *Micro Personal Work Center Specification Sheet*, pág. 2

6. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS Y ALGORITMOS DE CONTROL NECESARIOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL CLARIFICADOR DE JUGO DE CAÑA

6.1 Funcionamiento de las estrategias

La programación de las estrategias de control se realiza por medio del software *Visual application designer* (ViZapp), y se divide en dos programas los cuales contienen al control del flujo y temperatura en uno, y a los controles de dosificación en el otro como se describe en las figuras 80 y 81 respectivamente.

Figura 80. Vista general del programa de control de flujo y temperatura en el software *Visual application designer*

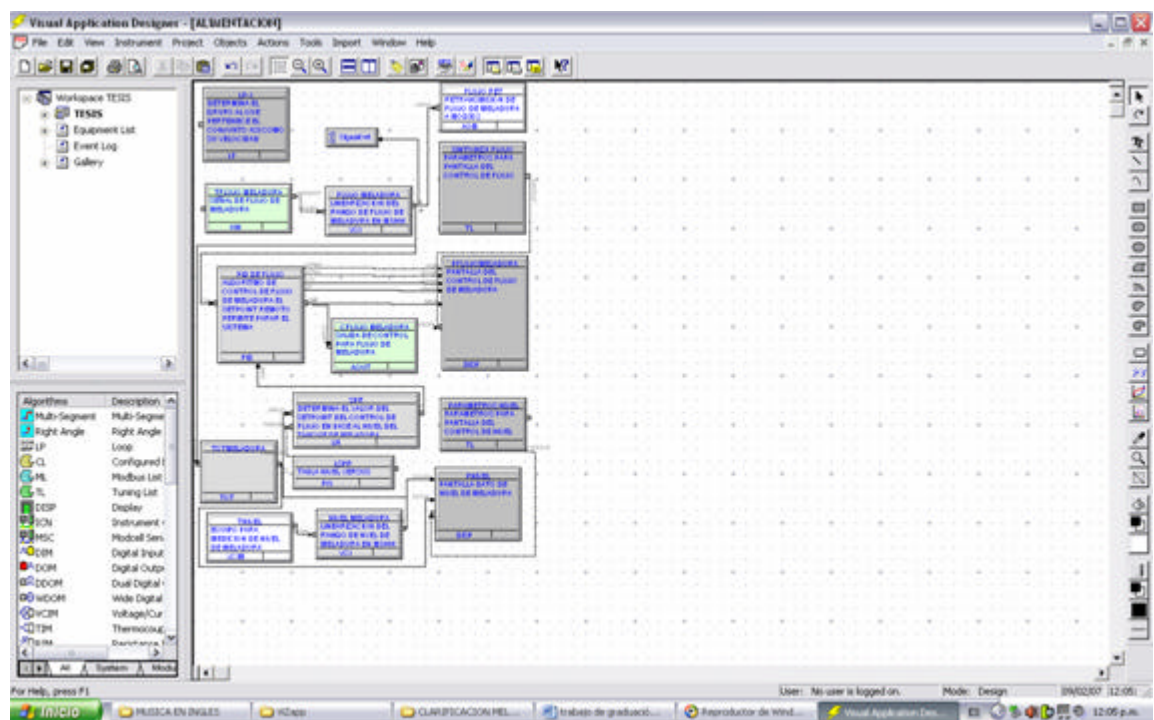
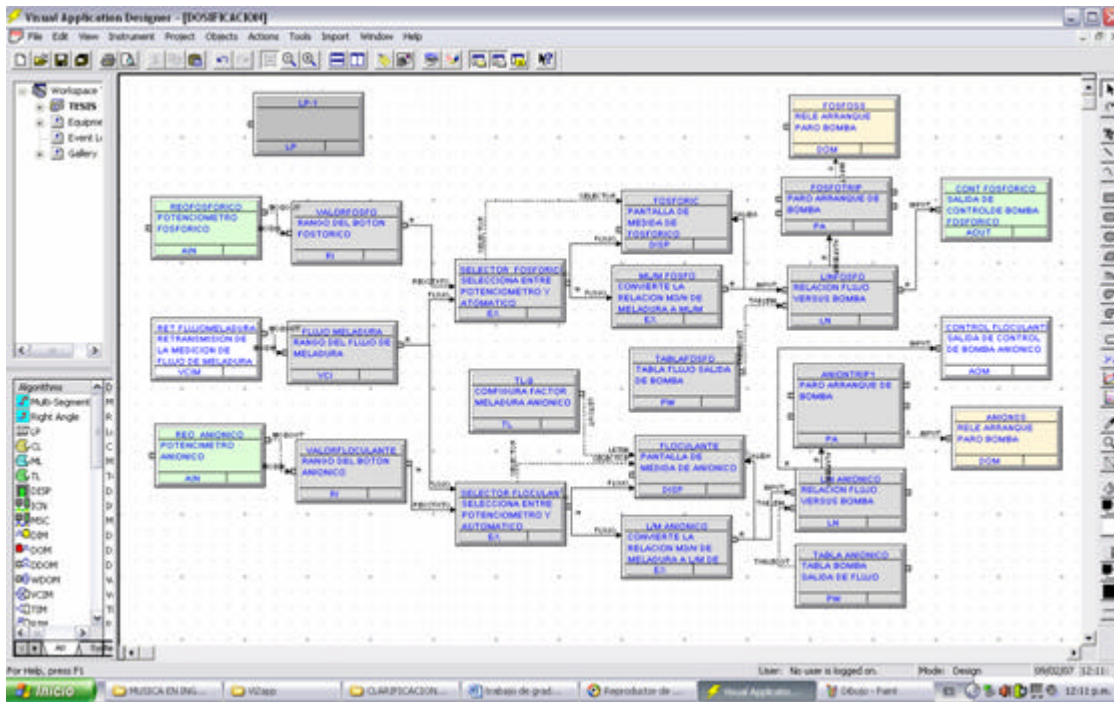


Figura 81. Vista general del programa de los controles de dosificación en el software *Visual application designer*



6.1.1 Descripción de bloques utilizados en la programación de las estrategias de control

Bloque IF: El bloque de interfaz es un bloque de ambiente que contiene información general relacionada con el instrumento (controlador multilazo) que no cae lógicamente dentro de ningún lazo o bloque de función. Un bloque de interfaz es soportado como parte de una configuración de instrumento. Hasta cinco grupos de bloques de función pueden ser incluidos en una base de datos especificando el número de grupo deseado en cada bloque de lazo. Los intervalos de escaneo de grupo determinan la tasa a la cual cada grupo será ejecutado cuando el instrumento se encuentre en el modo RUN.

Bloque SE: El bloque de eventos del sistema es un bloque ambiental que soporta información general de la operación del instrumento. Un bloque de eventos del sistema es soportado como parte de una configuración de instrumento para definir diagnósticos y reconocimiento de eventos del sistema, así como las capacidades de reportes. Eventos del sistema son aquellos que ocurren en el instrumento, son reportados por bloques de base de datos, y pueden ser almacenados en el registro de eventos del sistema. Los diferentes tipos de eventos del sistema son: Solo información, alarmas de proceso, mensajes de solicitud o notificación, diagnósticos de reconocimiento y otros. El registro de eventos del sistema almacena un número configurable de códigos de evento estampados con tiempo para los puntos de diagnóstico y eventos reportados por los bloques de base de datos. Estos códigos son traducidos en mensajes para el *display* del operador o para el *software* de interface.

Bloque DIF: El bloque de interface del *display* es necesario para todos los datos y control relacionados con el *display* del instrumento. Este bloque se utiliza para asignar lo siguiente:

- Una etiqueta de instrumento
- Acceso e ingreso de valores (contraseñas de configuración y sintonización y acceso)
- Personalizar la presentación de alarmas / diagnósticos (parpadeo / encendido y apagado de sonidos y velocidad)
- *Display* de encendido
- Definir el orden en el cual los *displays* de usuario serán seleccionados por la tecla *tag* y/o especificar una entrada para selección remota de un *display* de usuario

Bloque ST: El bloque de tabla de estado es un bloque solo de datos usado por varios bloques de *display*, como el *Display* (DISP) y bloques de *display* de alarmas de proceso (PAD). El bloque consiste en un juego de tablas, cada uno identificado por una cadena de caracteres ASCII. Cada tabla contiene una lista de valores y mnemónicos que son mostrados para el valor correspondiente. Los nombres de tablas de estado son mantenidos dentro del configurador solamente y no son descargados al instrumento. Hay solamente un bloque de tabla de estado dentro de una base de datos de instrumento.

Bloque CL: El bloque de lista configurada es utilizado para especificar y / o coleccionar datos (hasta 99 atributos u otras listas configuradas) que son de interés para un sistema externo. Los datos de la lista configurada son incluidos en: Un mensaje ICN o MSC; o una lista Modbus (sin listas anidadas) para módulos MSC; o solamente como una lista de fondo para ser incluidos en los archivos de interface (TIF o MIF). La ejecución de un bloque de lista es distribuida sobre los períodos de escaneo de todos los grupos y no esta relacionado con los bloques de lazos excepto para el acceso de control.

Los bloques de lista configurada de 1 a 9 son reservados para uso como entrada de listas para los grupos. El configurador coloca estos bloques en la base de datos como sea necesario para doblemente almacenar los datos de usuario que pasan entre grupos. Este proceso es transparente para el usuario excepto que CL10 es el primer bloque de lista configurado por el usuario (como es visto en reportes y listas de referencia cruzada).

Bloque MSC: El bloque de comunicación serial MSC soporta modo esclavo Modbus, esclavo de Modbus Extendido, o comunicaciones maestro Modbus sobre ya sea una red punto a punto o punto a multipunto. Este bloque soporta el modo de transmisión Modbus RTU. El modo ASCII no está soportado.

Bloque LP: El bloque de lazo es un bloque ambiental que proporciona un control maestro para esos bloques de función encontrados entre él y el siguiente bloque de lazo en la base de datos del usuario. Esto incluye acceso de escritura de “fuente de control” para consolas y computadoras y control de grupo de la ejecución del bloque de control para ya sea la base de datos lógica o comando de operador / computadora.

Bloque AIN: Un bloque AIN relaciona una entrada en el circuito integrado de controlador y cuantos otros bloques de función de entrada que sean requeridos pueden ser conectados. Todos los valores de entrada son almacenados en uno de cinco posibles tablas de estado. Entradas de proceso y rutinas de salida utilizan estas tablas para pasar datos entre los bloques de entrada analógica que obtiene datos cada 100 milisegundos y los bloques de función de entrada que pueden correr al intervalo de escaneo de grupo configurado. El bloque de función de entrada conectado al bloque AIN engancha los datos de acuerdo a los parámetros encontrados en la configuración del bloque de función de entrada. Los bloques de función de entradas analógicas conectados utilizan los valores de entrada junto con los datos característicos para proporcionar una señal utilizable para el proceso. Los bloques de función de entrada proporcionan filtraje de entrada, acción, normalización, linearización, y escalado.

Bloque VCI: El bloque de entrada de Voltaje / Corriente proporciona un enlace de entrada desde un módulo de entrada VCIM con un lazo.

Bloque AOM: El bloque de modulo de salida analógica sirve como bloque de manejo de datos para el modulo de salida de corriente. Este bloque es usado para sacar un valor analógico hacia, y recibir un valor de retorno desde el módulo de salida de corriente. El modulo de salida de corriente convierte un

valor de conteo digital a una señal de campo de 4 a 20 mA y la convierte de vuelta en conteos de lectura en 100 milisegundos. El valor de la salida del modulo es revisado contra el valor previo y se convierte en un valor de entrada crudo. Las salidas analógicas son procesadas a través de un circuito que pasa los datos entre los bloques y los módulos utilizando un ciclo de escaneo trifásico de 150 milisegundos para la tarjeta (todos los módulos son leídos cada 150 milisegundos). El escalado de la salida, condiciones de seguimiento y falla son determinadas por este bloque.

Bloque TL: El bloque de lista de sintonización contiene una lista de atributos accesible como parámetros ajustables para uno o más bloques de *display*. Este bloque no es ejecutado. Solo proporciona la información utilizada por el bloque de *display*. Las entradas están constituidas de los parámetros de sintonización específicos, junto con la información requerida para mostrar y editar el valor. Los *displays* de sintonización son invocados desde los bloques de *display* por el argumento TUNE.

Bloque PID: El control regulatorio es soportado a través del uso de un bloque de control PID. Las funciones básicas de cada bloque PID incluyen:

Control básico PID algoritmos (Ganancia, Integral, Derivada). Las variaciones son:

- Derivada en proceso o error
- Proporcional en proceso o error
- Integral estándar o MICRO-SCAN
- Modos de control y salida (controlador), incluyendo seguimiento de *setpoint* y limitación de salida

- *Setpoint* remoto o local con relación y bias, integral manual e integral manual sin procedimiento, entrada de control anticipativo (modelo de compensación proporcionado externamente al bloque PID)
- Entrada de compensación de tiempo muerto (el algoritmo puede ser construido en un bloque de expresión)
- Retroalimentación externa
- Entradas modificadoras de ganancia, integral y derivada (externamente generadas)
- Controladores automáticos, manuales o cascada
- Selección de salida y *setpoint* bajo, medio y alto
- Valores configurables de restitución de la alimentación.

El número de bloques de control PID capaces de correr en un instrumento dependen de la configuración específica. Una configuración posible puede incluir hasta seis u ocho bloques de control PID corriendo a una tasa de cerca de 350 ms. El algoritmo PID corre a un múltiplo de la tasa de tareas en la cual es ejecutado. El procesamiento del *setpoint* es independiente del algoritmo PID y ocurre cada ciclo de ejecución.

Bloque AOUT: El bloque de salida analógica integrada sirve como el bloque de manejo de datos para el circuito de salida de corriente integrado. Un bloque controla una salida analógica desde el circuito integrado. El circuito de salida convierte el valor a una señal de campo de miliamperios. El escalado de la salida, condiciones de seguimiento y de falla son determinadas por este bloque. Todos los valores son almacenados en uno de cinco posibles tablas de estado de tareas. Las rutinas de salida de proceso utilizan estas tablas para pasar datos entre los bloques de salida analógicos integrados, que son actualizados

cada 50 milisegundos, y los bloques de algoritmo de proceso que corren al intervalo de escaneo de grupo configurado.

Bloque DISP: El bloque de *display* es utilizado para asignar recursos de *display* y acciones del teclado a un usuario de *display*. Las acciones del teclado incluyen presionar, detener y soltar una de ocho teclas disponibles (Desde la tecla de alarma hasta la flecha hacia abajo). En su forma más simple, el bloque de *display* conecta los datos variables para presentación como valores en líneas o barras. Estos valores pueden ser formateados e identificados con unidades de ingeniería u otras etiquetas. Funciones más avanzadas son logradas a través del lenguaje de programación del *display*. Un programa de *display* es un manejador de eventos compuesto de argumentos utilizados para responder a las acciones del teclado y otros eventos. El estado del bloque de *display* esta definido dentro del programa (pueden haber múltiples estados) y utiliza el bloque de tabla de estado y el bloque de lista de sintonización. Múltiples bloques de *display* pueden ser configurados para un instrumento y cada una requiere que este listado en el bloque DIF para poder ser accesible. Los bloques de *display* solamente son ejecutados cuando el instrumento esta en modo RUN. En todos los otros estados, solo los *display* de dispositivo estarán disponibles.

Bloque LN: El bloque de linearización produce un valor linearizado de una señal de entrada de punto flotante desde una fuente especificada, o desde los valores de datos locales. Muchos modos de linearización son soportados por este bloque. El método utilizado para una ocurrencia dada de este bloque es especificado por el tipo de linearización. Ciertos atributos del bloque lineari zador son solo presentados para un tipo dado de linearización. La linearización es hecha una vez en cada intervalo de escaneo de grupo mientras la fuente de entrada sea configurada y el estado del instrumento sea RUN.

Bloque TOT: El bloque de totalizador puede contra una señal de entrada analógica convirtiendo la variable lineal analógica en un número de pulsos discretos. Los pulsos son acumulados como un conteo total. El totalizador tiene un rango de 0.0 a 9999999.0. Un umbral de entrada puede ser configurado para evitar la totalización de señales de entrada de bajo nivel extrañas. La función del totalizador puede tener una dirección hacia arriba o hacia abajo, el nuevo conteo es agregado al conteo total actual. En la dirección hacia abajo, el nuevo conteo es restado de la cuenta total. El cálculo es:

Conteo total = Conteo total + o – (Entrada X (Tiempo transcurrido / Tasa)/ Factor de escala)

Bloque VCIM: El bloque VCIM (modulo de entrada de voltaje / corriente) sirve como el bloque de manejo de datos para los bloques de entrada de función VCI, TTI y RTI.

Bloque PW: El bloque de tabla es un bloque solo de datos. La tabla consiste en dos o más pares de coordenadas de punto flotante X, Y (hasta 60 pares). Una tabla puede ser construida para soportar un bloque de linearización como una fuente de datos de punto flotante. En adición, las coordenadas X y Y son parámetros sintonizables.

Cuando una tabla es utilizada por el bloque de linearización para coordenadas X o Y, la tabla debe de ser construida con las coordenadas apropiadas en orden ascendente sin duplicados.

Bloque PA: El bloque de alarma de proceso es utilizado para iniciar una señal de alarma discreta para avisar al operador de una condición de proceso irregular. La alarma es calculada comparando una fuente de alarma con un valor de disparo. La fuente de alarma es usualmente un valor en algún otro

bloque siendo monitoreado. El tipo de consideración hecho es especificado por la condición de disparo. Dependiendo del resultado de la comparación, la alarma es considerada activa o limpia (inactiva). El usuario puede reconocer la existencia de una alarma por uno o varios métodos. Este bloque tiene dos salidas discretas que pueden ser revisadas para ver si la alarma está o no activa o reconocida. Estas salidas pueden ser utilizadas como inicios lógicos en otros bloques a través de la base de datos.

Bloque EX: El bloque de expresión evalúa una expresión especificada por el usuario cada vez que se ejecuta. Operadores lógicos, aritméticos, y condicionales pueden ser mezclados dentro de la expresión, con el resultado final siendo escalado a un tipo de datos configurados. Una salida auxiliar puede proporcionar el resultado escalado a otro tipo de datos. Las expresiones son ingresadas por el usuario en un formato algebraico utilizando la simbología "C" para operadores y funciones y asumiendo la precedencia de operadores tipo 'C'. Una expresión puede ser tan simple como un simple operando (el resultado de los tipos de datos debe ser configurado en este caso) o como una mezcla de operaciones compleja.

6.1.2 Control del flujo de jugo de caña

El sistema de control de flujo tiene la finalidad de mantener constante el flujo de descarga del tanque de alimentación (pulmón) de jugo de caña en función del nivel del mismo, por lo que el punto de consigna del flujo funcionará en base a un punto de consigna remoto que será función del nivel del tanque pulmón. La relación buscada será la que se indica en la siguiente tabla:

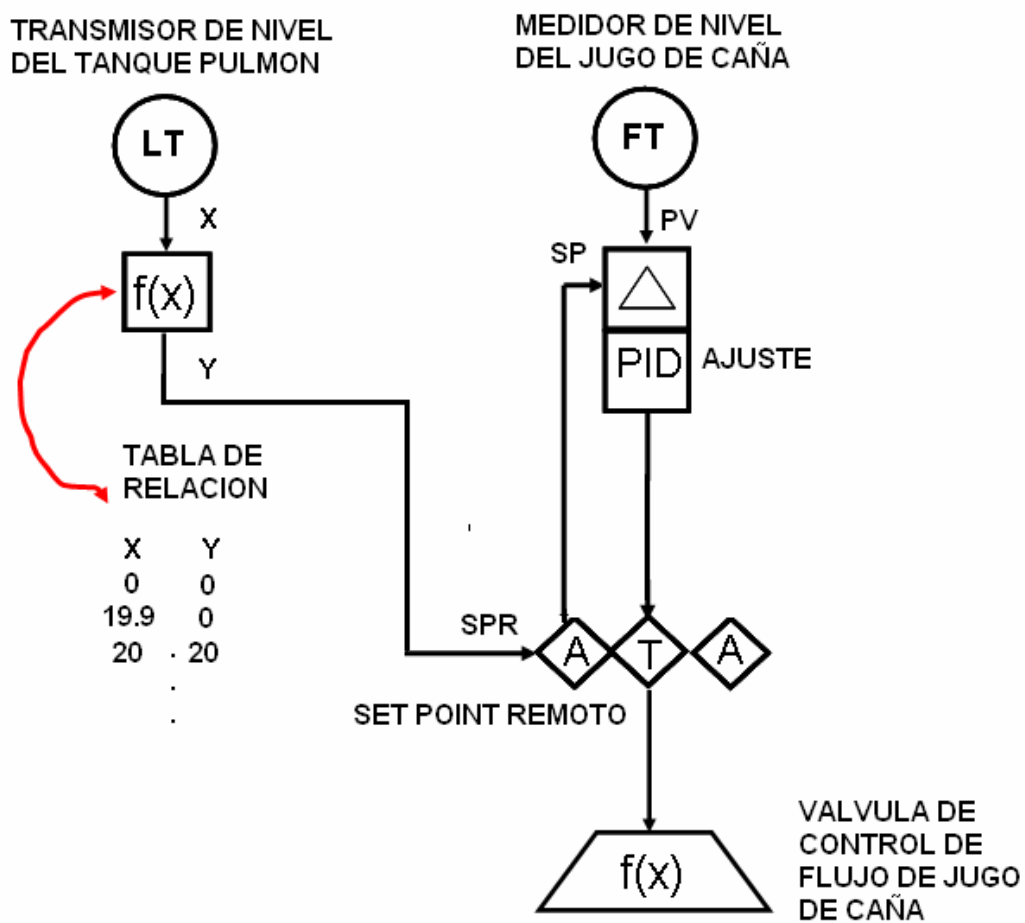
Tabla IX. Relación entre nivel del tanque pulmón y flujo de descarga

Nivel en %	Flujo en m ³ /h
0	0
19.9	0
20	20
70	75
100	75

Como se puede apreciar en la tabla anterior es necesario limitar la operación del sistema a un nivel mínimo de 20% de la capacidad del tanque para proteger al motor de la bomba de descarga del tanque, por lo que al caer el nivel a un valor inferior del 20%, el punto de consigna cambiará a un valor de 0 m³/h, lo que causará que la salida del controlador se vaya a su valor mínimo, y por ende que la bomba de descarga se detenga completamente hasta que se restablezca un valor igual o superior al 20% del nivel del tanque pulmón.

El diagrama de retroalimentación según la simbología SAMA (Asociación de fabricantes de aparatos científicos) para el lazo de control de flujo descrito anteriormente será como el que se muestra a continuación:

Figura 82. Diagrama de lazo de retroalimentación del control de flujo, según la simbología SAMA



El diagrama del lazo de control de flujo, según las normas ISA será

Figura 83. Diagrama de lazo de control de flujo, según normas ISA

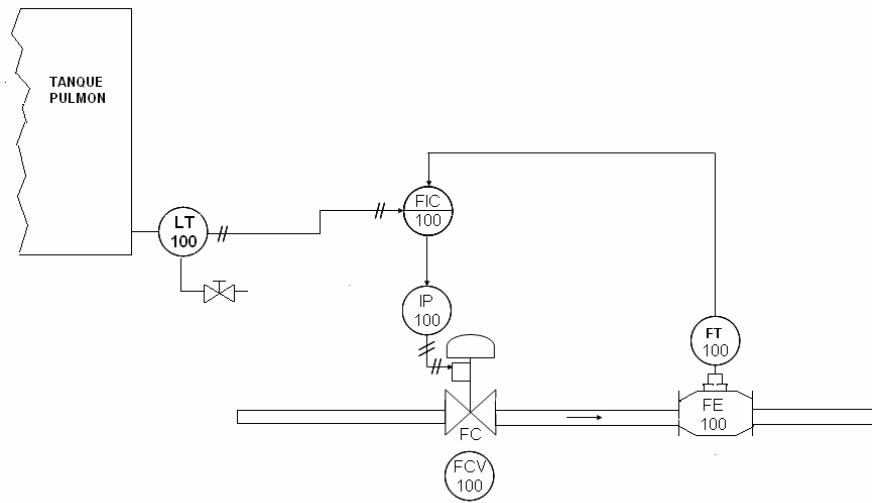
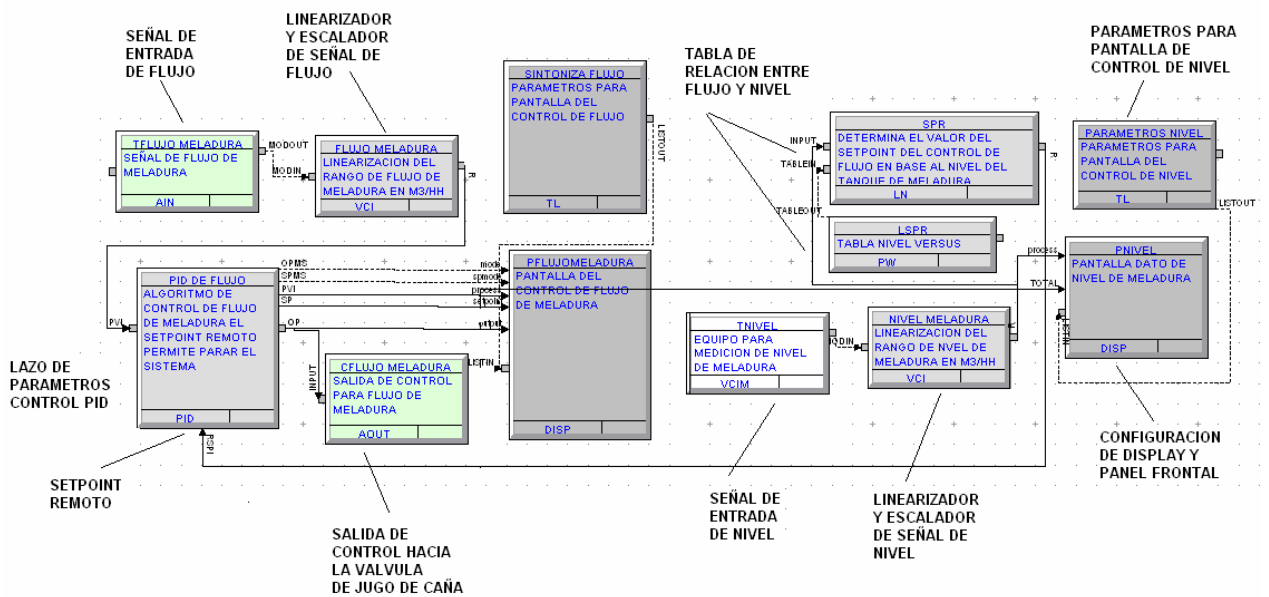


Figura 84. Programación de lazo de control de flujo de jugo de caña



6.1.2.1 Descripción del programa de control de flujo de jugo de caña

En el bloque AIN se configura el tipo de señal de entrada proveniente del medidor de flujo de jugo de caña (4 a 20 mA en este caso) de tipo magnético que llega al canal de entrada integrado 1, el cual se conecta con el bloque VCI para asignarle el rango de ingeniería a la señal analógica (0 a 100 m³/hr). Posteriormente esa señal se utiliza como entrada para el bloque PID en donde se realiza el control regulatorio y donde se configuran los parámetros de Ganancia, Integral, Derivada, tipo de control, límites del *setpoint* y de salida, entre otros. La salida del bloque PID se lleva hacia el bloque AOUT el cual controla la señal de salida integrada 1 de 4 a 20 mA para manejar una válvula de control modulada que se encargará de mantener el flujo en el valor fijado automáticamente por el nivel del tanque de alimentación.

En el bloque VCIM definido como “NIVEL” se configura el tipo de señal de entrada proveniente del transmisor de presión diferencial utilizado para medir el nivel del tanque pulmón que llega a un módulo de entrada adicional, el cual se conecta con el bloque VCI definido como “NIVEL DE MELADURA” para asignarle el rango de ingeniería de 0 a 100%. La señal de salida del bloque mencionado se lleva hacia una tabla de datos para limitar la cantidad de flujo requerida por el sistema dependiendo del nivel del tanque pulmón como se muestra en la tabla IX. La señal de salida de la tabla de flujo requerido versus nivel del tanque pulmón se utiliza como *setpoint* remoto para el bloque PID del control de flujo.

En la estrategia se utilizan dos bloques de *display*, los cuales se utilizan para configurar el *display* para mostrar los valores de las variables de proceso, *setpoint* y porcentaje de salida para el control de flujo, y el nivel del tanque

pulmón, además para permitir configurar los parámetros de control del lazo PID, control automático / manual y otros por medio del panel frontal del instrumento. Los parámetros del control regulatorio que pueden ser modificados desde el *display* del instrumento son declarados en el bloque TL.

6.1.3 Control de temperatura del jugo de caña

El lazo de control de temperatura del jugo de caña tiene como propósito principal mantener la temperatura en un valor determinado por el usuario por medio del manejo de una válvula de vapor de entrada. Este lazo de control trabaja en modo manual, automático y de seguimiento. El modo de seguimiento bloquea todo el control automático del lazo y se posiciona en un valor igual a 0 para proteger al sistema de daños térmicos en las paredes del clarificador cuando no exista flujo de jugo de caña en el sistema por debajo de un valor predeterminado. Cuando el sistema recobra una cantidad de flujo mínima, el controlador retorna al estado en el que se encontraba previo a la restricción del modo de seguimiento (manual o automático).

El diagrama de retroalimentación, según la simbología SAMA para el lazo de control de temperatura, se puede representar como se muestra en la figura siguiente.

Figura 85. Diagrama de lazo de retroalimentación del control de temperatura, según la simbología SAMA

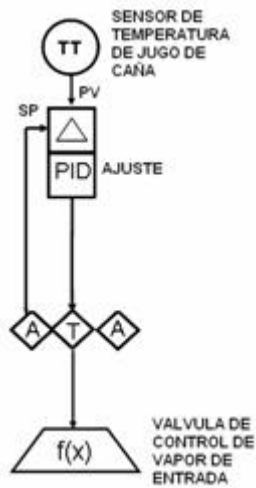


Figura 86. Diagrama de lazo de control de temperatura, según normas ISA

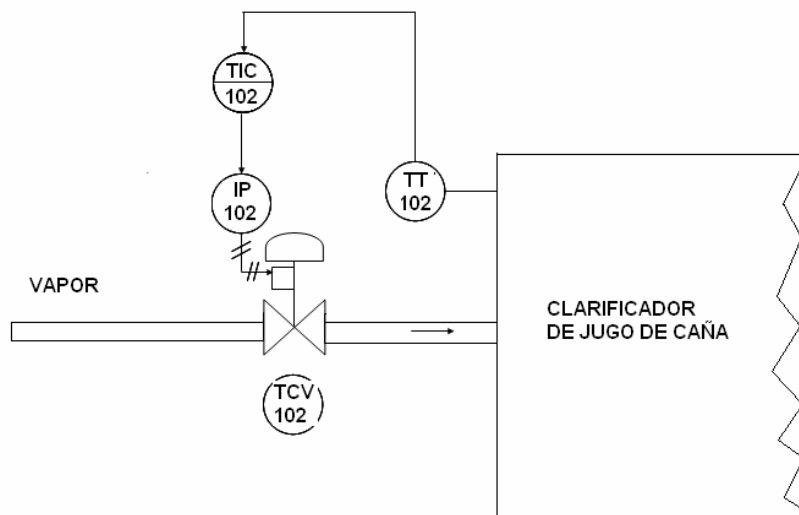
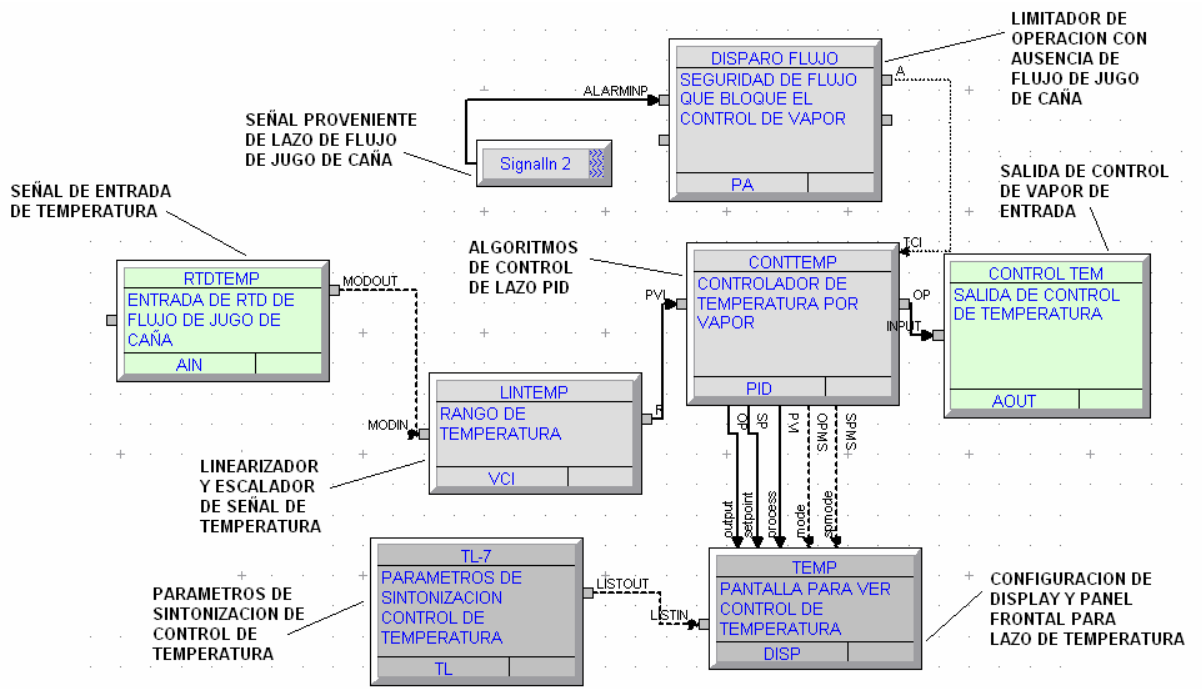


Figura 87. Programación de lazo de control de temperatura de clarificación



6.1.3.1 Descripción del programa de control de temperatura

En el bloque AIN se configura el tipo de señal de entrada proveniente del sensor de temperatura del jugo de caña (transmisor 4 a 20 mA) que llega al canal de entrada integrado 2, el cual se conecta con el bloque VCI para asignarle el rango de ingeniería a la señal analógica (0 a 100 °C). Posteriormente esa señal se utiliza como entrada para el bloque PID en donde se realiza el control regulatorio y donde se configuran los parámetros de Ganancia, Integral, Derivada, tipo de control, límites del *setpoint* y de salida, entre otros. La salida del bloque PID se lleva hacia el bloque AOUT el cual controla la señal de salida integrada 2 de 4 a 20 mA para manejar una válvula

de control modulada que se encargará de mantener la temperatura en el valor seleccionado por el operador.

Para proteger al sistema de daños térmicos provocados por el ingreso de vapor al sistema con ausencia de flujo de jugo de caña, se utiliza un bloque de alarma de proceso PA para limitar el funcionamiento del sistema dependiendo de la cantidad de flujo existente. Dado que la señal de flujo se encuentra en otra sección del programa, se utiliza el bloque denominado como “Signa In 2” para utilizarla en diferentes partes del programa.

En la estrategia se utiliza un bloque de *display*, el cual se utiliza para configurar el *display* para mostrar los valores de las variables de proceso, *setpoint* y porcentaje de salida para el control de temperatura, además para permitir configurar los parámetros de control del lazo PID, control automático / manual y otros por medio del panel frontal del instrumento. Los parámetros del control regulatorio que pueden ser modificados desde el *display* del instrumento son declarados en el bloque TL.

6.1.4 Control de dosificación de ácido fosfórico

El objetivo de este lazo de control es el de dosificar la cantidad de ácido fosfórico que se aplica al jugo de caña en función de la cantidad de flujo existente en el sistema y de las partes por millón que se deseen. El sistema trabaja en modo manual y automático. En modo manual, la dosificación se controla por medio de un potenciómetro, el cual simula una señal de flujo, y en automático sigue a la señal de flujo verdadera. Existen diferentes relaciones configuradas en el controlador, las cuales están asociadas con las partes por millón; así por ejemplo, para 10 ppm, la dosificación adecuada es de 1.5642 ml/m por cada metro cúbico de jugo de caña que pase por el sistema. Además como protección para la bomba dosificadora de ácido, al no haber una cantidad de flujo mínima determinada, se puede habilitar un disparo por medio de un relé de salida.

Figura 88. Diagrama de lazo de retroalimentación del control de dosificación de ácido fosfórico, según la simbología SAMA

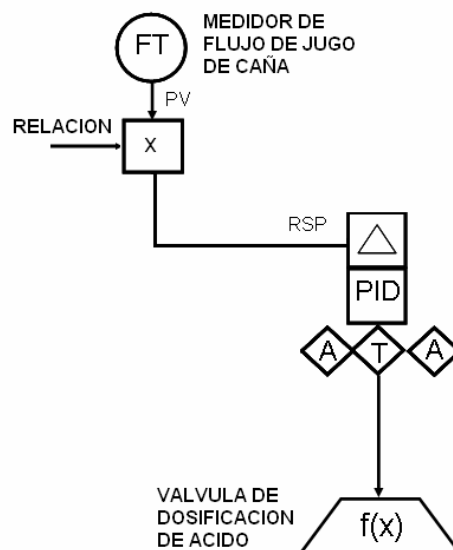


Figura 89. Diagrama de lazo de control de dosificación de ácido fosfórico, según normas ISA

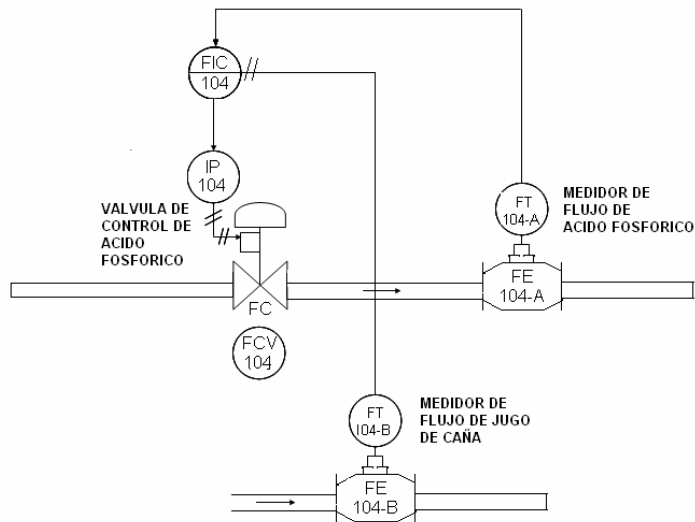
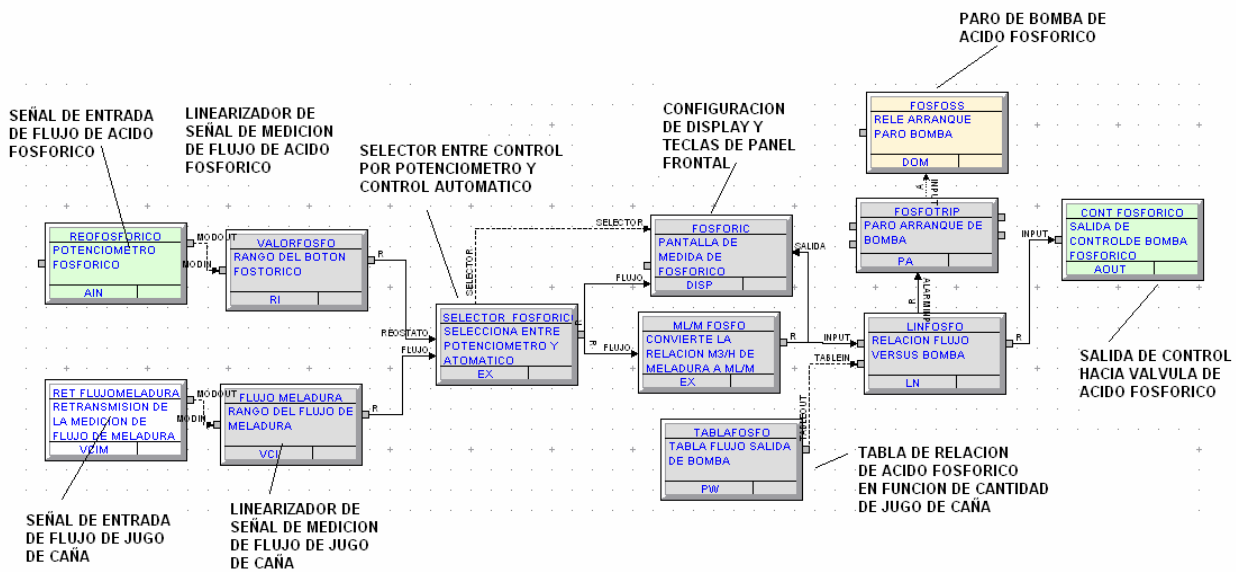


Figura 90. Programación de lazo de control de dosificación de ácido fosfórico



6.1.4.1 Descripción del programa de control de dosificación de ácido fosfórico

En el bloque VCIM se configura el tipo de señal de entrada proveniente del medidor de flujo de jugo de caña (4 a 20 mA) que llega a un modulo de entrada adicional, el cual se conecta con el bloque VCI para asignarle el rango de ingeniería a la señal analógica (0 a 100 m³/hr). Paralelamente en el bloque AIN se configura la señal de entrada proveniente de un potenciómetro de 0 a 1000 ohmios que sirve para simular una señal de flujo de ácido fosfórico y que llega a la entrada analógica integrada 1. El operador tiene la opción de seleccionar el modo manual (simulando flujo con el potenciómetro) o en modo automático siendo controlada la cantidad de ácido fosfórico en base a la cantidad de flujo de jugo de caña que haya en el sistema. Para dosificar la cantidad de ácido fosfórico correcto se utiliza el bloque de tabla PW y de linearización LN para de esa forma limitar el *setpoint* de flujo de ácido al valor requerido para ser controlado por medio de una válvula de control modulada.

Para evitar introducir ácido en el sistema ante la ausencia de flujo de jugo de caña, se utiliza en el programa una salida digital controlada por una alarma de proceso para utilizarla como permisivo del arranque y paro de la bomba de ácido.

Se utiliza un bloque de *display*, el cual se utiliza para configurar el *display* para mostrar los valores de las variables de proceso, *setpoint* y porcentaje de salida para el control de dosificación de ácido.

6.1.5 Control de dosificación de floculante (aniónico)

La finalidad de este lazo de control es la de dosificar la cantidad de floculante que se aplica al jugo de caña en función de la cantidad de flujo que exista en el sistema, y su funcionamiento es idéntico al del lazo de control de dosificación de ácido fosfórico.

Figura 91. Diagrama de lazo de retroalimentación del control de dosificación de floculante, según la simbología SAMA

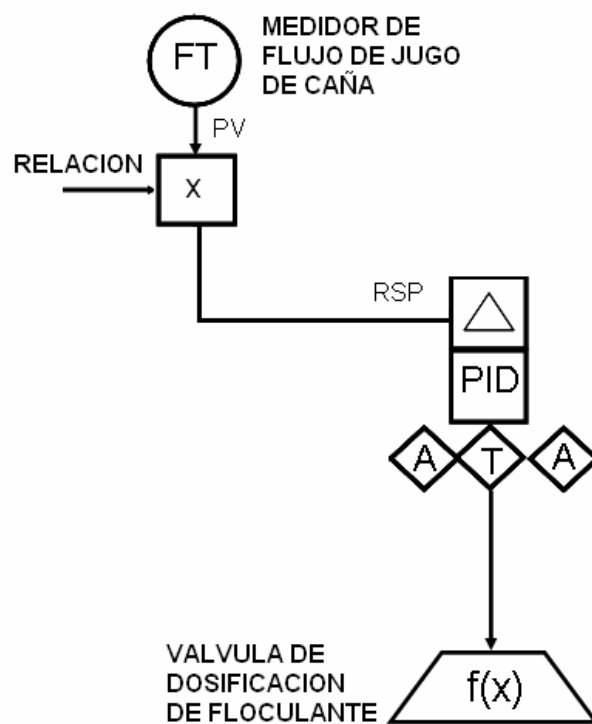


Figura 92. Diagrama de lazo de control de dosificación de floculante, según normas ISA

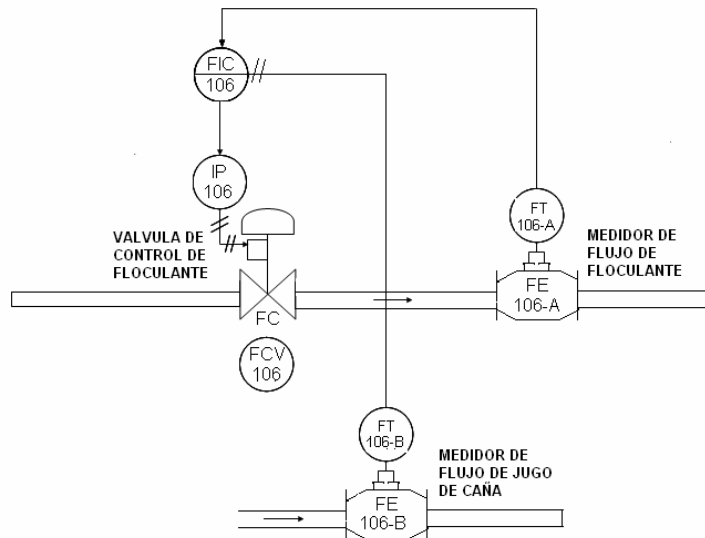
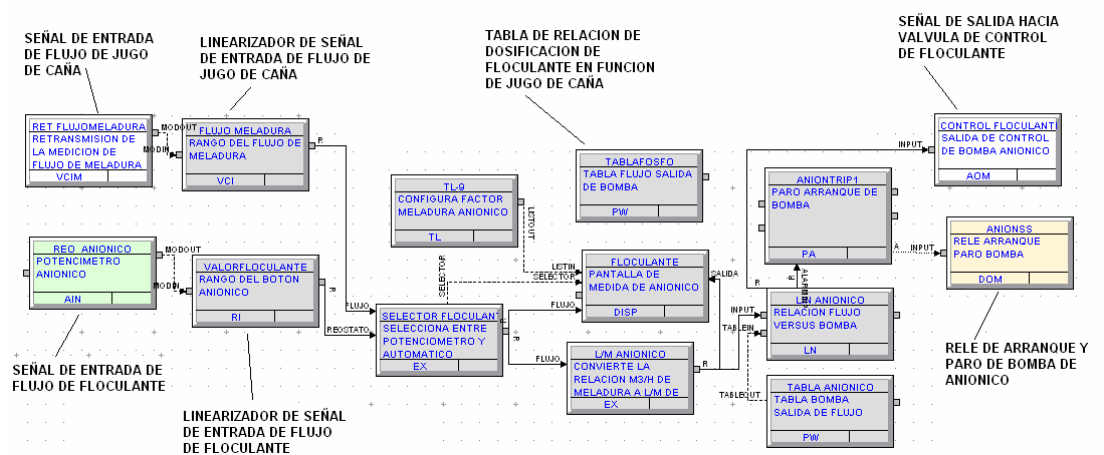


Figura 93. Programación de lazo de control de dosificación de floculante



6.1.5.1 Descripción del programa de control de dosificación de floculante

En el bloque VCIM se configura el tipo de señal de entrada proveniente del medidor de flujo de jugo de caña (4 a 20 mA) que llega a un modulo de entrada adicional, el cual se conecta con el bloque VCI para asignarle el rango de ingeniería a la señal analógica (0 a 100 m³/hr). Paralelamente en el bloque AIN se configura la señal de entrada proveniente de un potenciómetro de 0 a 1000 ohmios que sirve para simular una señal de flujo de aniónico y que llega a la entrada analógica integrada 2. El operador tiene la opción de seleccionar el modo manual (simulando flujo con el potenciómetro) o en modo automático siendo controlada la cantidad de floculante en base a la cantidad de flujo de jugo de caña que haya en el sistema. Para dosificar la cantidad de floculante necesaria se utiliza el bloque de tabla PW y de linearización LN para de esa forma limitar el *setpoint* de flujo de aniónico al valor requerido para ser controlado por medio de una válvula de control modulada.

Para evitar introducir aniónico en el sistema ante la ausencia de flujo de jugo de caña, se utiliza en el programa una salida digital controlada por una alarma de proceso para utilizarla como permisivo del arranque y paro de la bomba de aniónico.

Se utiliza un bloque de *display*, el cual se utiliza para configurar el *display* para mostrar los valores de las variables de proceso, *setpoint* y porcentaje de salida para el control de dosificación.

6.1.6 Control del pH

El lazo de control de pH tiene la finalidad de mantener un valor de pH determinado durante el proceso de clarificación para todas las variaciones de carga que puedan existir en el sistema. Para este propósito se cuenta con un medidor de pH en línea insertado en el jugo de caña, el cual envía su señal hacia el controlador y éste de acuerdo al punto de consigna, se encarga de abrir o cerrar una válvula de alimentación de cal en lechada para mantener el pH constante. Este lazo de control trabaja en modo manual, automático y de seguimiento. El modo de seguimiento bloquea todo el control automático del lazo y se posiciona en un valor determinado por la posición de un potenciómetro manejado por el operador.

Figura 94. Diagrama de lazo de retroalimentación del control de pH, según la simbología SAMA

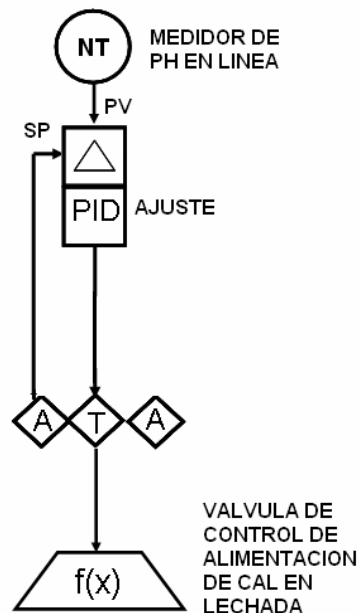


Figura 95. Diagrama de lazo de control de pH, según normas ISA

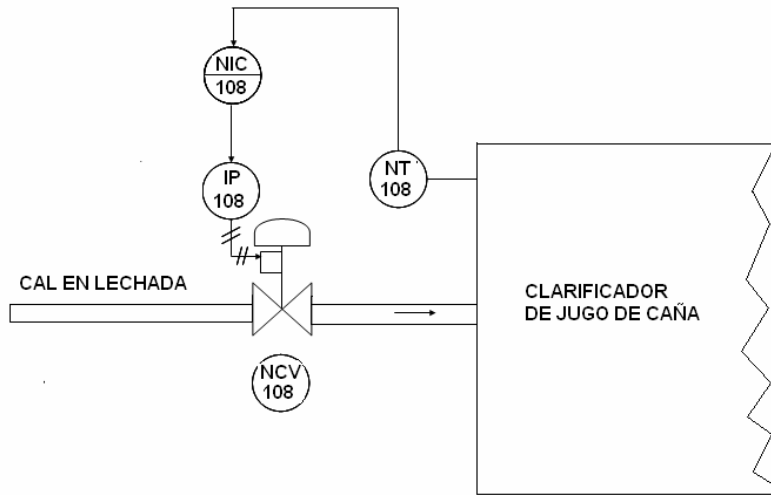
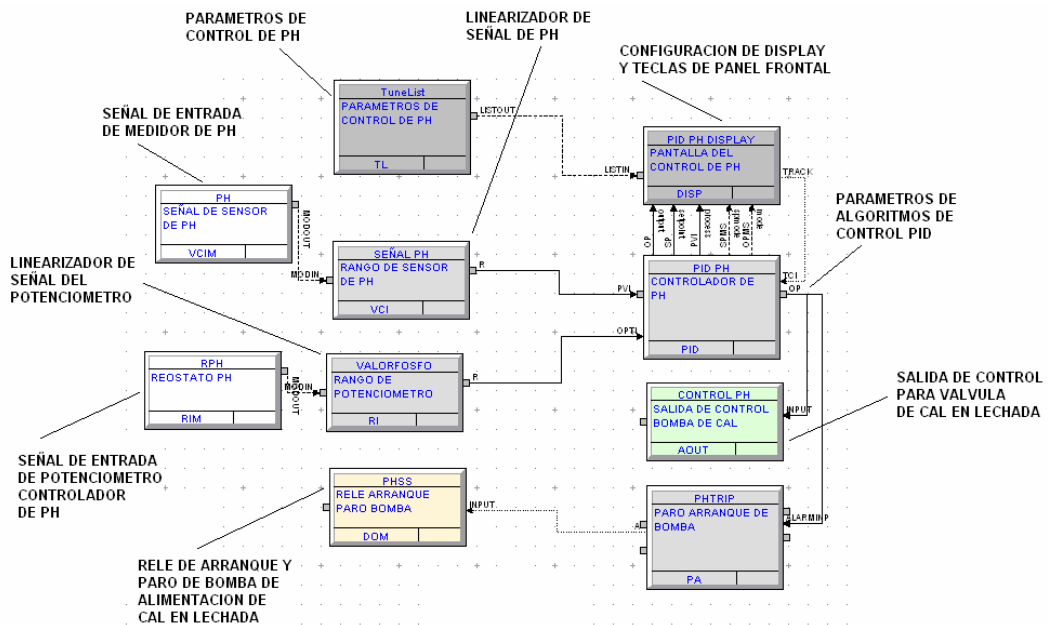


Figura 96. Programación de lazo de control de pH



6.1.6.1 Descripción del programa de control de pH

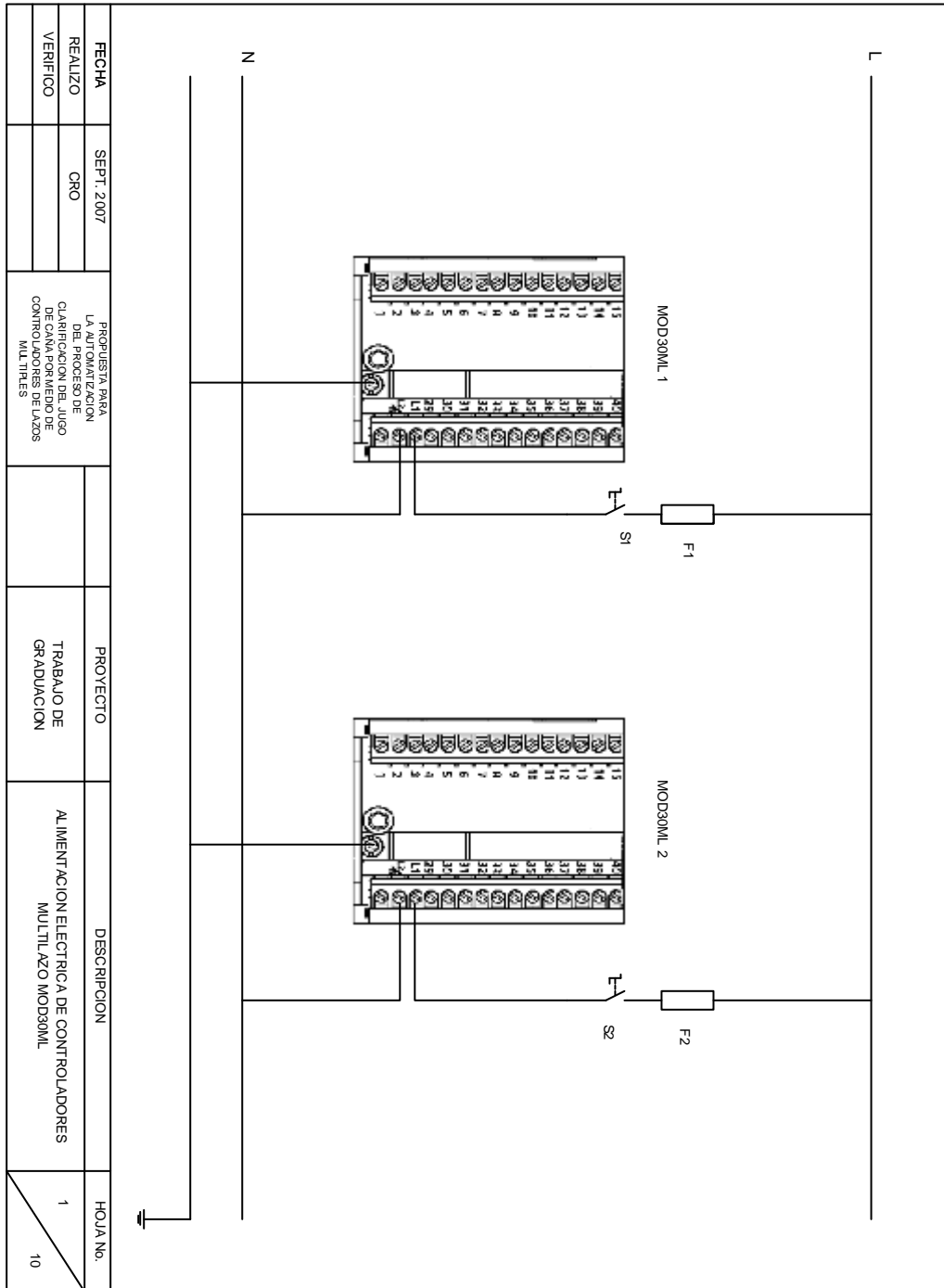
En el bloque VCIM se configura el tipo de señal de entrada proveniente del sistema de medición de pH (transmisor 4 a 20 mA) que llega a un modulo de entrada adicional de corriente, el cual se conecta con el bloque VCI para asignarle el rango de ingeniería a la señal analógica (0 a 14 pH). Posteriormente esa señal se utiliza como entrada para el bloque PID en donde se realiza el control regulatorio y donde se configuran los parámetros de Ganancia, Integral, Derivada, tipo de control, límites del *setpoint* y de salida, entre otros. La salida del bloque PID se lleva hacia el bloque AOUT el cual controla la señal de salida integrada 2 de 4 a 20 mA para manejar una válvula de control modulada que se encargará de mantener el pH en el valor seleccionado por el operador.

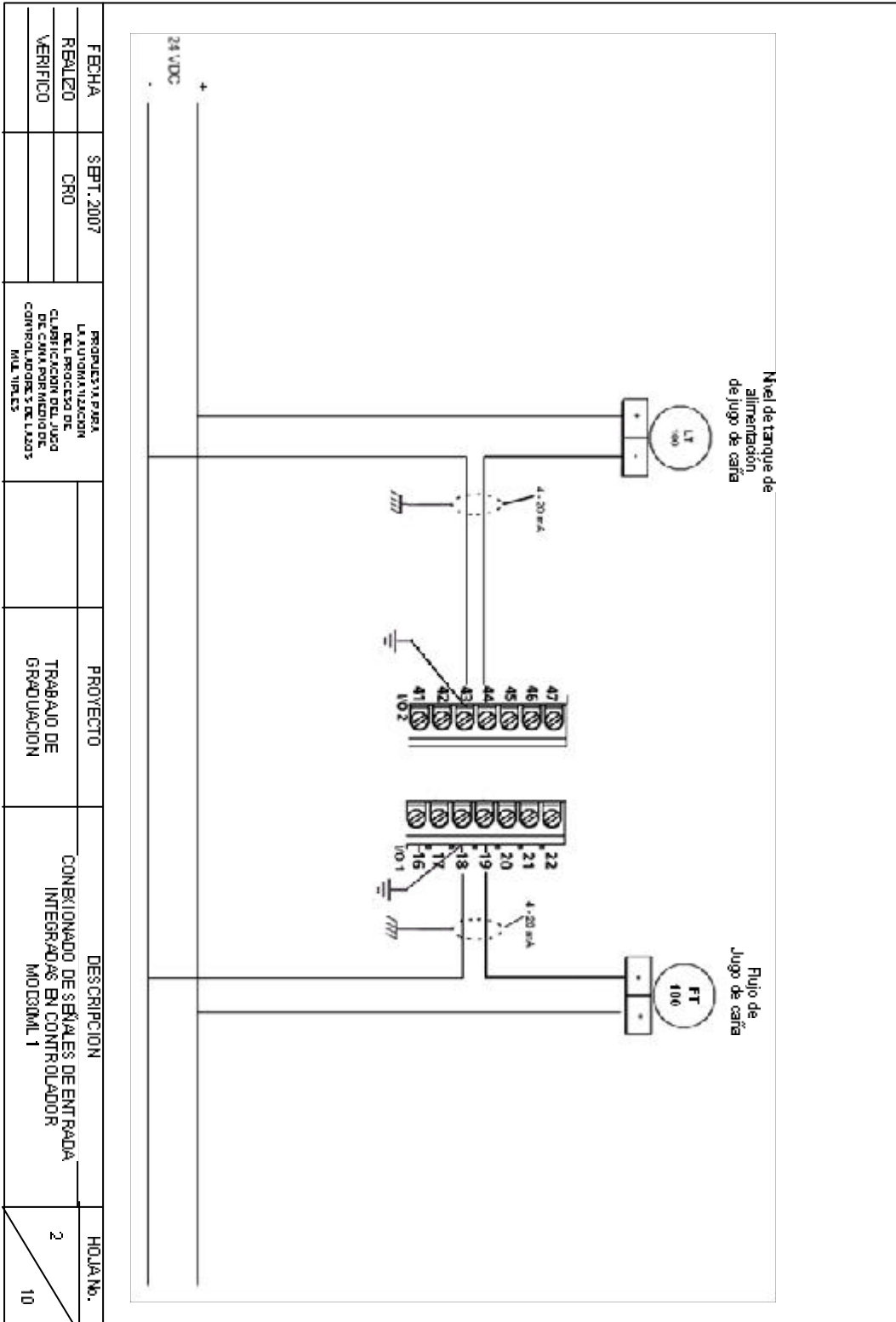
Para controlar al sistema manualmente se utiliza un potenciómetro de 0 a 1000 ohmios conectado a un modulo de entrada adicional para resistencia el cual se conecta al bloque RI para asignarle el rango de ingeniería de 0 a 100% y que funcionará en modo *tracking* (de seguimiento) para el bloque PID.

En la estrategia se utiliza un bloque de *display*, el cual se utiliza para configurar el *display* para mostrar los valores de las variables de proceso, *setpoint* y porcentaje de salida para el control de pH, además para permitir configurar los parámetros de control del lazo PID, control automático / manual y otros por medio del panel frontal del instrumento. Los parámetros del control regulatorio que pueden ser modificados desde el *display* del instrumento son declarados en el bloque TL.

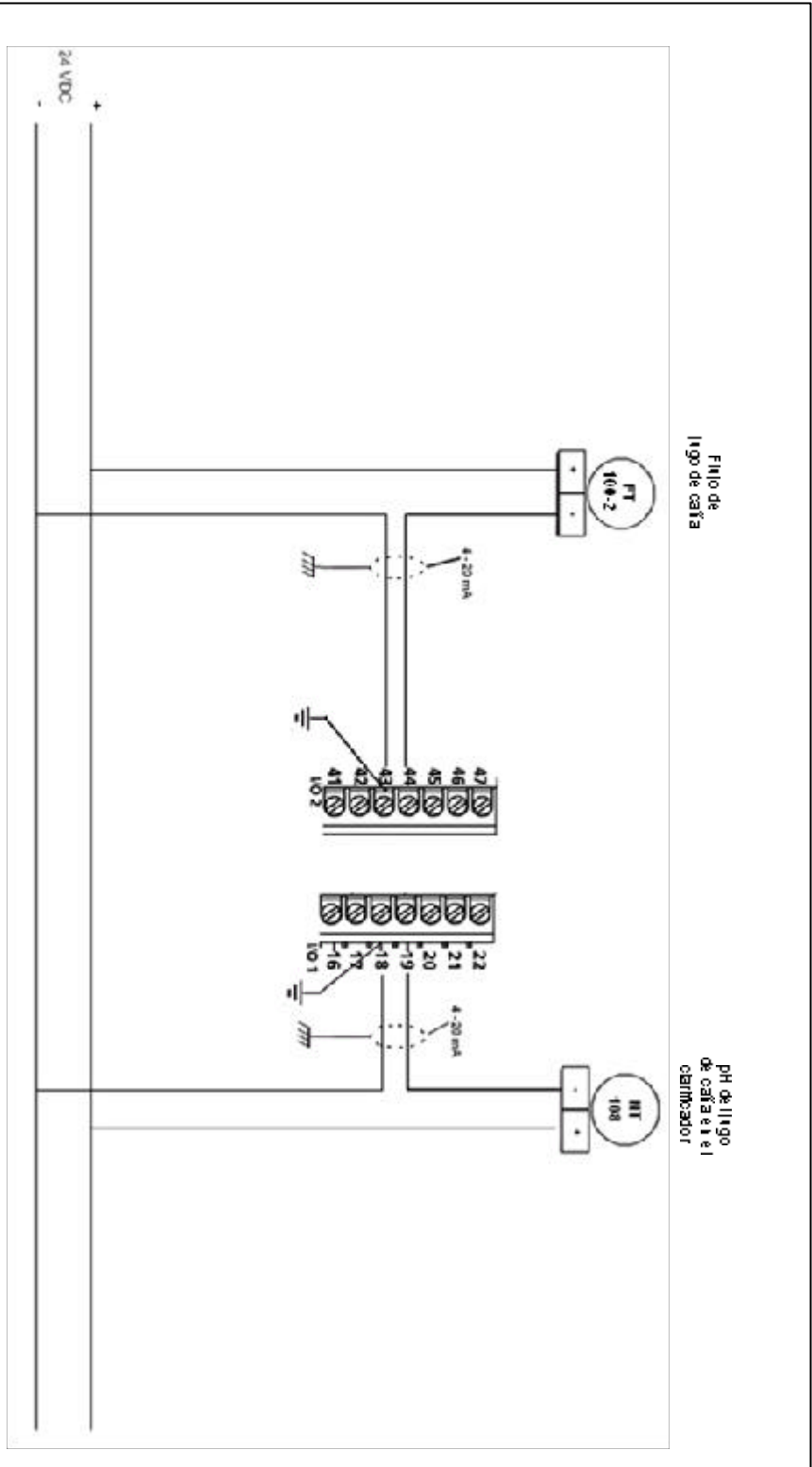
Para proteger a la bomba de cal en lechada de trabajar con un bajo flujo, se utiliza una salida digital controlada por una alarma de proceso para utilizarla como permisivo del arranque y paro de la bomba de cal en lechada en base al porcentaje de salida de la válvula.

6.2 Diagramas de conexionado de las señales de control y monitoreo

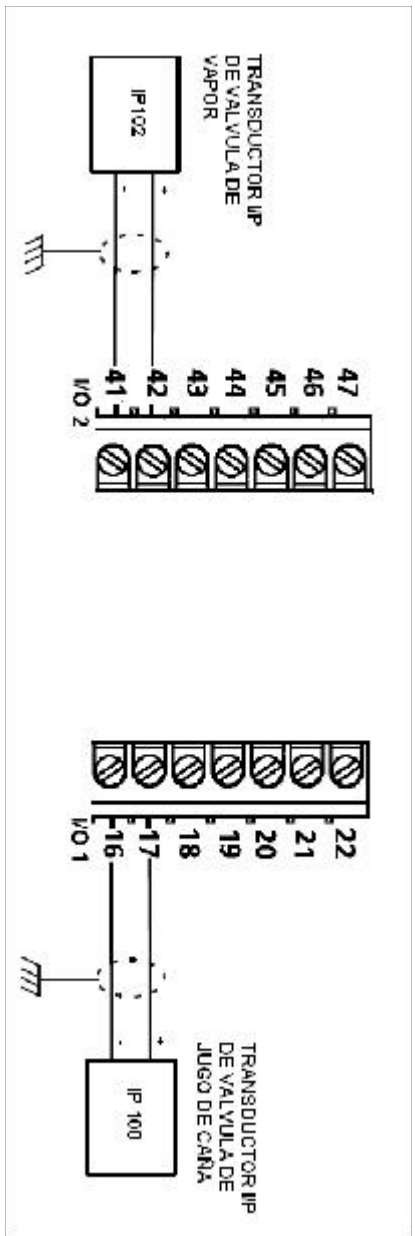




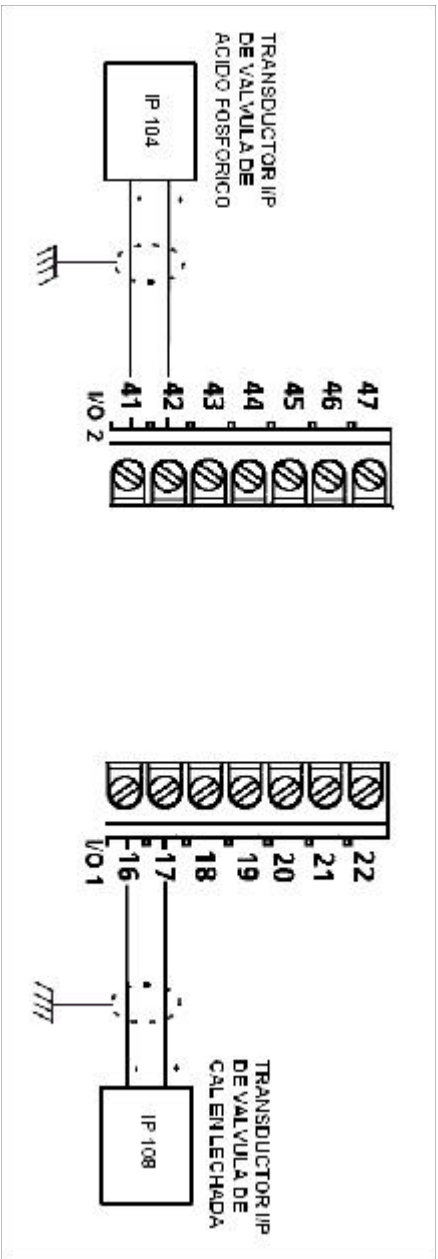
FECHA	SEPT. 2007	PROYECTO PARA LA AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE CLASIFICACION DEL JUGO DE CAFE POR MEDIO DE CONTROLADORES SDC LADDS MIL VIELES	PROYECTO	CONEXIONADO DE SEÑALES DE ENTRADA INTEGRADAS EN CONTROLADOR MOD30ML 1	HOLAJN.
REALIZO	CRD		TRABAJO DE GRADUACION		2
VERIFICO					10



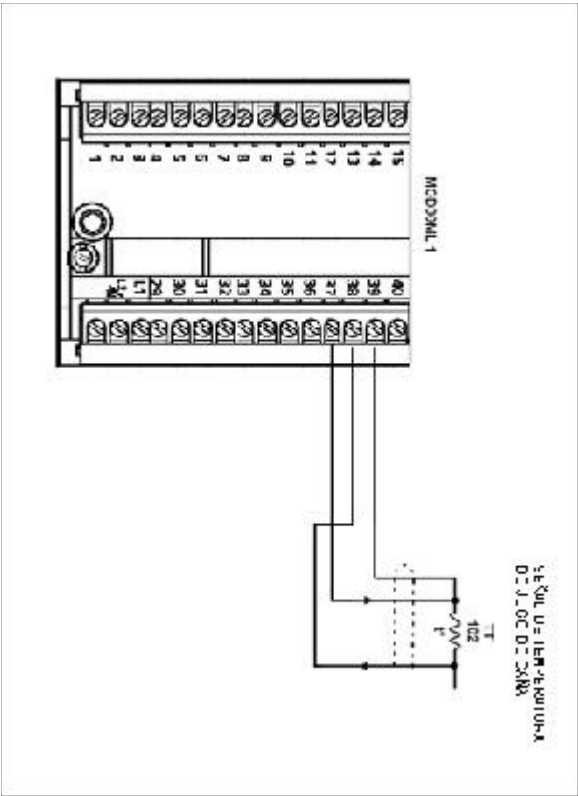
FECHA	SEPT. 2007	PROYECTO	DESCRIPCION	HOJA NO.
REALIZADO	CRD	TRABAJO DE GRADUACION	CONEXIONADO DE SEÑALES DE ENTRADA INTEG RADAS EN CONTROLADOR MODDML 2	3
VERIFICADO				10
PROYECTO PARA LA AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE CLASIFICACION DEL AGUO DE CANA POR MEDIO DE COMPARADORES DE LUZOS MULTIPLES				



FECHA	SEPT. 2007	PROYECTO	DESCRIPCION	HOJA NO.
REALIZADO	CRO	TRABAJO DE GRADUACION	CONEXIONADO DE SEÑALES DE SALIDA INTENSIDADAS EN CONTROLADOR MODULO 1	4
VERIFICADO				10
		PROYECTA PARA LA AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE CLASIFICACION DEL JUGO DE CAÑA POR MEDIO DE UN CONTROLADOR DE LOGICAS PROGRAMABLES		

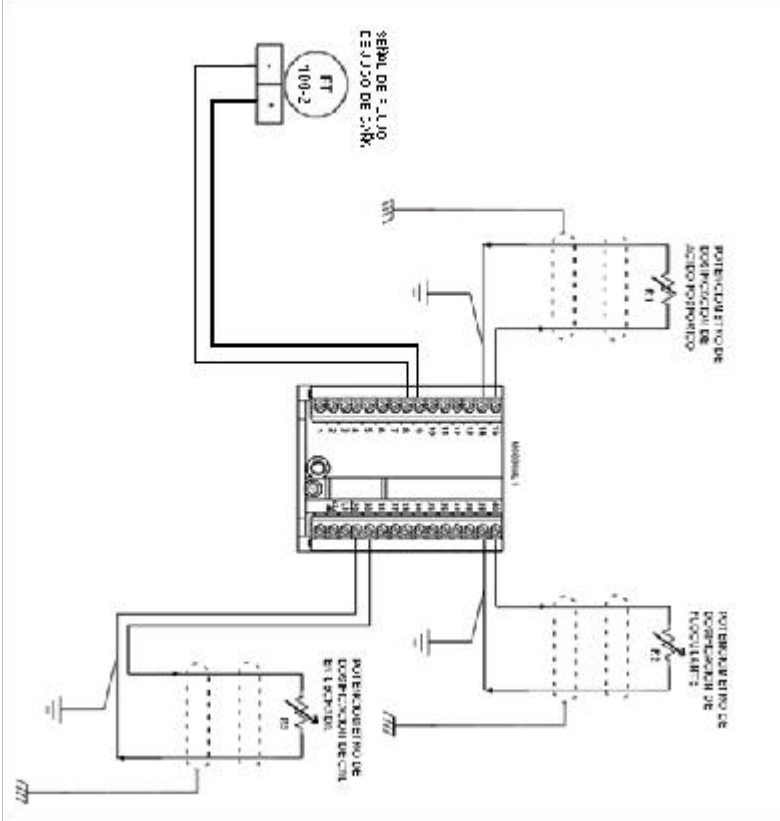


FECHA	SEPT. 2007	PROYECTO	LA AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE CLASIFICACION DEL AGUA DE CALAFORNIA EN LOS COMBUSTIBLES DE LOS MILITARES	DESCRIPCION	CONEXION DE SEÑALES DE SALIDA INTEG RADAS EN CONTROLADOR MODMIL 2	HOJA No.	5 / 10
REALIZADO	CRD	TRABAJO DE GRADUACION					
VERIFICADO							

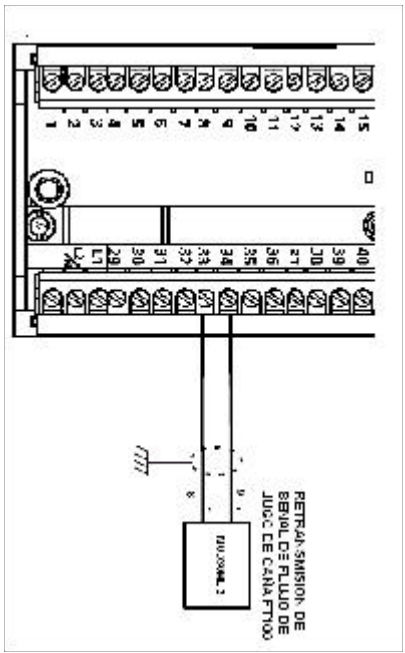


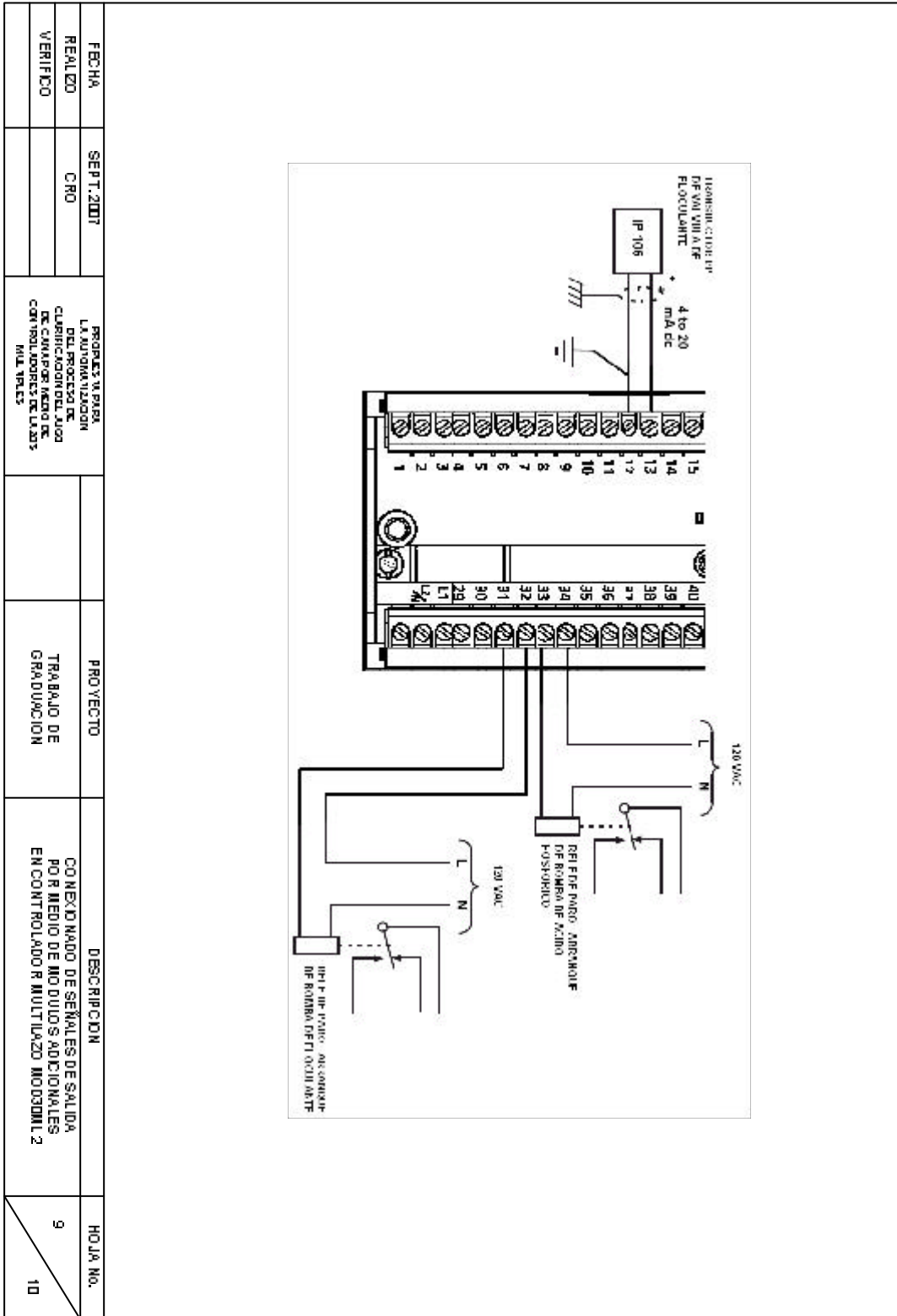
SE SOLICITA LA REPARACION
DE UN OJO DE CALIBRACION

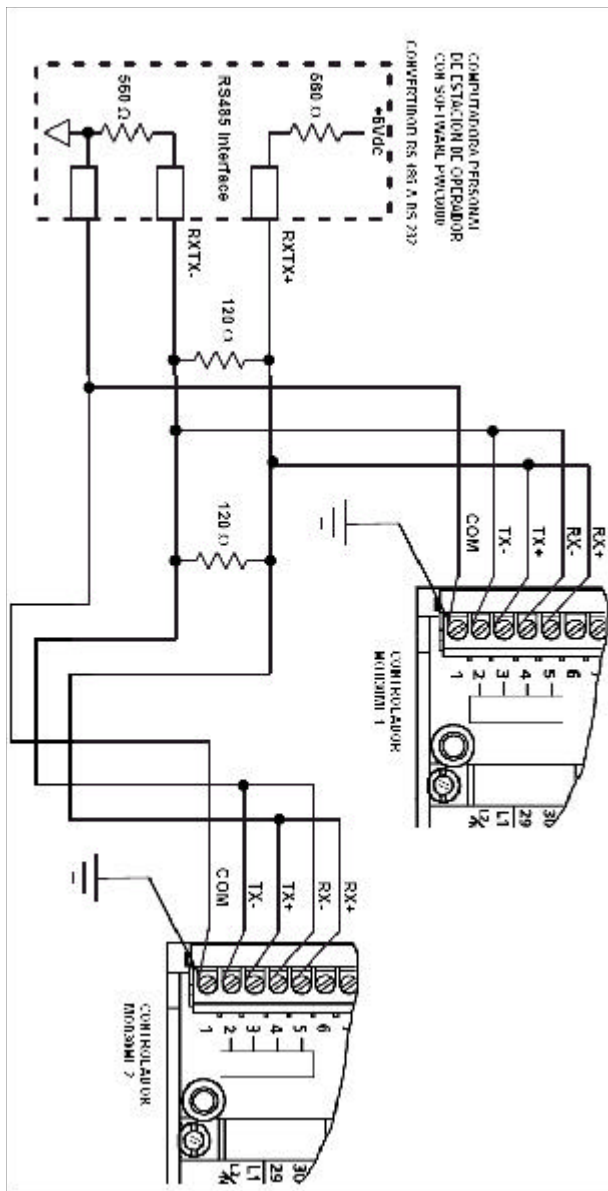
FECHA		SEPT. 2007		PROYECTO Y PARA LA REALIZACION DEL PROYECTO DE CONEXION DEL OJO DE CALIBRACION EN CONTROLADOR MULTIAJO MCO32ML 1 MIL VERTS		PROYECTO		DESCRIPCION		HOJA NO.	
REALIZO		CRO				TRABAJO DE GRADUACION		CONEXIONADO DE SEÑALES DE ENTRADA POR MEDIO DE MODULOS ADICIONALES EN CONTROLADOR MULTIAJO MCO32ML 1		6	
VERIFICO										10	

FECHA	SEPT. 2007	PROYECTO	DESCRIPCION	HOJA No.
REALIZADO	CRD	TRABAJO DE GRADUACION	CONEXIONADO DE SEÑALES DE ENTRADA POR MEDIO DE MODULOS ADICIONALES EN CONTROLADOR MULTIAZOS MOD30ML2	7
VERIFICADO				10
PROYECTO PARA LA AUTOMATIZACION DEL PROCESO DE CLASIFICACION DEL JUDIC CON UN CONTROLADOR MULTIAZOS		 <p>Diagrama de conexión de un módulo de control. El diagrama muestra un módulo con terminales numerados de 1 a 24. Se conectan los siguientes componentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> Una bobina de relé controlada por una señal de flujo (FT 100-2) proveniente de un sensor. Una bobina de relé controlada por una potencia en uso (potencia en uso). Una bobina de relé controlada por una potencia en uso (potencia en uso). Una bobina de relé controlada por una potencia en uso (potencia en uso). <p>Las bobinas de los relés están conectadas a una línea de alimentación (+V) y a tierra (GND). Los contactos de los relés están conectados a una línea de salida (+V) y a tierra (GND).</p>		

FECHA	SEPT. 2007	PROYECTO	DESCRIPCION	HOJA NO.
REALIZO	CRO	PROYECTO DE LA ALIMENTACION DEL PROCESO DE CLASIFICACION DE LOS CONTROLADORES DE LAS MIL VILES	TRABAJO DE GRAVACION	8
VERIFICO			CONEXIONADO DE SEÑALES DE SALIDA POR MEDIO DE MODULOS ADICIONALES EN CONTROLADOR MULTIAZAR MOD03MIL 1	10







FECHA	SEPT. 2007	PROYECTO Y PARA	PROYECTO	DESCRIPCION	HOJA NO.
REALIZADO	CRO	LA REALIZACION DEL PROYECTO DE CONEXION DE LOS CONTROLADORES RS-485	TRABAJO DE GRAFICACION	CONEXIONADO DE COMUNICACION RS-485 ENTRE CONTROLADORES MODULO Y ESTACION DE OPERACION	10
VERIFICADO		MIL TRAYS			10

CONCLUSIONES

1. La automatización del proceso de clarificación del jugo de caña en los ingenios azucareros, tiene un impacto significativo en la mejora de la calidad de la meladura en etapas posteriores del proceso.
2. La adecuada selección de los elementos de campo en los procesos industriales, garantiza su correcto funcionamiento y durabilidad.
3. La selección del controlador de proceso más adecuado para cada aplicación, debe hacerse con base en criterios de funcionalidad, rapidez de ejecución y facilidad de operación para los usuarios.
4. Al proponerse un proyecto de automatización se deben tomar en cuenta cuáles son los requerimientos particulares de las empresas, para de esa forma generar la alternativa que resulte más funcional y rentable para las mismas.

RECOMENDACIONES

1. Al automatizar un proceso industrial, inculcar en los usuarios las buenas prácticas de operación, ya que la eficiencia de un proceso, no sólo depende de la tecnología que esté instalada en el mismo, sino también de la correcta aplicación de la filosofía de control.
2. Analizar cómo se pueden implementar mejoras en los procesos industriales por medio de la automatización para lograr reducción de costos de operación, y mejoras en la eficiencia de los mismos.
3. Reforzar el estudio de la instrumentación industrial en el pènsum de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
4. Fomentar la mejora del laboratorio de automatización industrial, para tener la posibilidad de realizar más prácticas sobre programación de controladores e implementación de estrategias de control.
5. Al seleccionar un sistema de control para controlar un proceso, especificarlo con un protocolo de comunicación abierto, para que pueda ser fácilmente interconectado con otros sistemas existentes o futuros dentro de la planta, sin importar el fabricante de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB Instrumentation, Inc. **Electrolytic Conductivity Measurement technical note**. Febrero 1999.
2. ABB Instrumentation, Inc. **Magmeter Basics**. Publicación TI_FM_MagBasics_2, agosto 2004.
3. ABB Instrumentation Inc. **pH measurement technical note**. Febrero 1999.
4. Creus, Antonio. **Instrumentación Industrial**. Sexta Edición. México: Editorial Alfaomega, 1998.
5. Fay, James A. **Mecánica de Fluidos**. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., 1996.
6. Honig, Pieter. **Principios de tecnología Azucarera**. (Tomo I). México: Compañía Editorial Continental, S.A., 1974.
7. Micromod Automation, Inc. **Manual de Operador de software de Visualización de datos 53PW6000**. Septiembre 2005.
8. Micromod Automation, Inc. **MOD30ML Multiloop Controller Installation Manual**. Publicación IB-1800R-INS. Noviembre 2004.
9. Moreno, Mauricio Amestegui, **Apuntes de control PID**. Tesis Ing. Electrónico, Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés. Enero 2001.
10. Mortimer, Charles E. **Química**. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1983.
11. Perry, John H. **Manual del Ingeniero Químico**. (Tomo II). México: Editorial Hispano Americana, 1966.
12. Spencer, Meade. **Cane Sugar Handbook**. Novena Edición (Tomo II). Nueva York: Editorial John Wiley and Sons, Inc., 1963.