

T  
629-895.  
RIO i



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

### **Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

**"Implementación de un control digital para el Módulo de Control de Nivel y Caudal de la Planta de Control de Procesos de la FIMCP"**

### **TESIS DE GRADO**

**Previo a la obtención del Título de:**

### **INGENIERO MECÁNICO**

**Presentada por:**

**Jaime Humberto Ríos Orellana**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2004**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a DIOS por la oportunidad de estudiar que me brindó.

A mi director de tesis Ing. Eduardo Orcés por su colaboración en esta tesis.

Al Ing. Francis Loayza por ayuda en el desarrollo de este proyecto.

## DEDICATORIA



A MIS QUERIDOS PADRES  
ORLANDO Y ANGELITA  
A MIS HERMANOS  
HERNÁN Y SARA.  
Y EN ESPECIAL A  
OLGA MARIA.

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

**"La responsabilidad del contenido de esta  
Tesis de grado, me corresponde  
exclusivamente; y el patrimonio intelectual  
de la misma a la ESCUELA SUPERIOR  
POLITÉCNICA DEL LITORAL"**

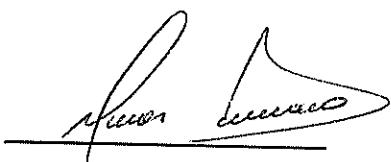
**(Reglamento de Graduación de la ESPOL)**



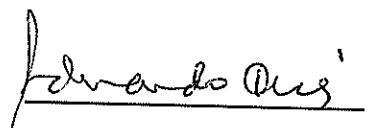
---

Jaime Humberto Ríos Orellana

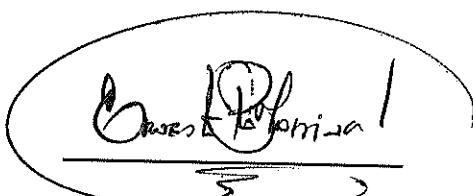
# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



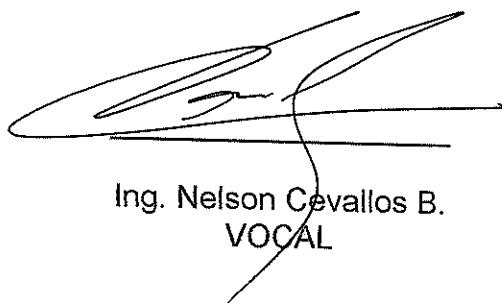
Ing. Omar Serrano V.  
PRESIDENTE



Ing. Eduardo Orcés P.  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Ernesto Martínez L.  
VOCAL



Ing. Nelson Cevallos B.  
VOCAL



## RESUMEN

Los avances en las nuevas tecnologías que se presentan hoy en día, ofrecen ventajas, que crean la necesidad de mejorar y actualizar los recursos técnicos con los que cuenta la Ingeniería Mecánica para el desarrollo de nuevas técnicas.

Con este propósito se plantea este proyecto el cual consiste en rehabilitar, mejorar y actualizar, el Módulo de Control de Nivel y Caudal de la Planta de Procesos Industriales en el laboratorio de Procesos Industriales de la FIMCP. Este proyecto beneficiará a los estudiantes y a los profesores, los cuales podrán contar con nuevas y mejoradas herramientas para la explicación de sus cátedras.

El estado actual del Módulo de Control Nivel y Caudal de la Planta de Procesos Industriales no permite que sea utilizada para el fin que fue diseñado, debido básicamente al deterioro de los controladores neumáticos sin los cuales el sistema no puede operar.

El objetivo del presente trabajo es rehabilitar mejorar y actualizar el Módulo de Nivel y caudal de la Planta de Procesos Industriales, mediante la

incorporación de un sistema de adquisición de datos y control digital por computadora.

El conjunto formado por la interfase Field Point, que permite la comunicación de los sensores y elementos de control del módulo con la computadora y la creación de un programa que realice la labor de un control digital, permitirán el monitoreo y control desde una computadora sobre todas las funciones del Módulo de Nivel y Caudal de la Planta de Procesos.

Primeramente analizan todas las variables que se desean controlar se realizaran pruebas sobre todos los elementos del módulo tales como sensores, transductores, bombas y válvulas de control para constatar su estado, después de lo cual se calibrarán todos estos instrumentos según sus escalas originales.

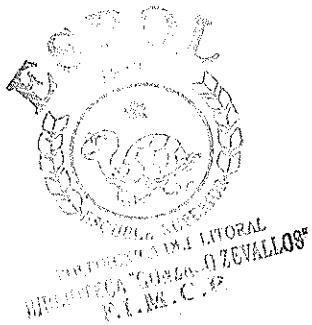
Posteriormente se instalará la interfase Field Point, la cual permitirá la comunicación, entre los sensores en campo, los elementos de control y la computadora. Además se construirán circuitos que complementen el control de la bomba principal desde la computadora y el panel de control.



Finalmente la creación en el lenguaje gráfico de programación LabView de un control digital virtual, este operar como un controlador proporcional integral diferencial (PID), controlando el proceso.

Los resultados que se esperan al final de este proyecto son la recuperación total de todas las funciones del Módulo de Control de Nivel y Caudal, para de este modo dentro de la materia Sistemas de Control, llevar a cabo las dos prácticas de Ajuste de Controlador tanto para el lazo de nivel por el método de Curva de Reacción, como para el lazo de caudal por el método de Ganancia Última.

Se espera también que los estudiantes de este modo se relacionen más con las nuevas tecnologías y con su uso, para aumentar la aplicación de estas en nuestro medio.



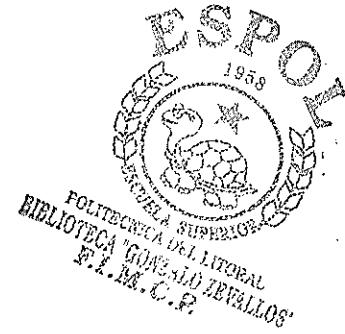
## ÍNDICE GENERAL

	Pág
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIX
ÍNDICE DE PLANOS.....	XX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1.....	3
1. MÓDULO DE NIVEL Y CAUDAL DE LA PLANTA DE PROCESOS.....	3
1.1. Generalidades del módulo de nivel y caudal.....	3
1.2. Descripción del módulo.....	4
1.3. Sensores, transductores y válvulas de control.....	10
1.3.1. Descripción del sensor de nivel.....	16
1.3.2. Descripción del sensor de caudal.....	19
1.3.3. Descripción del transductor de corriente a presión (I/P).....	24
1.3.4. Descripción de las válvulas de control.....	27
CAPITULO 2.....	37
2. CALIBRACIÓN DE SENsoRES, TRANDUCTORES Y VÁLVULAS DE CONTROL.....	37

2.1. Calibración del sensor de nivel.....	45
2.2. Calibración del sensor de caudal.....	55
2.3. Calibración de los transductores de corriente a presión (I/P).....	67
2.4. Calibración de las válvulas de control.....	80
CAPITULO 3.....	91
<b>3. INTERFASE Y EQUIPOS PARA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL</b>	
DIGITAL.....	91
3.1. Equipos de adquisición de datos Field Point.....	91
3.1.1. Descripción del FP-1000.....	94
3.1.2. Descripción del FP-AI111.....	102
3.1.3. Descripción del FP-AO200.....	107
3.1.4. Programa de configuración Fiel Point Explorer.....	113
3.2. Interfase gráfica de programación Lab View.....	137
3.2.1. Descripción de la programación en Lab View.....	138
3.2.2. Definición de íconos.....	144
3.2.3. Definición de subrutinas (subvis).....	158
3.2.4. Descripción de ciclos For, While, Case, Sequence.....	161
3.2.5. Gráficas de barrido.....	165
3.2.6. Arreglos.....	167
3.3. Circuitos auxiliares de control.....	169
3.3.1. Circuito de encendido y apagado de bomba.....	169
CAPITULO 4.....	177

4. DESARROLLO DE PROGRAMA PARA EL CONTROL DIGITAL.....	177
4.1. Teoría de controladores.....	177
4.1.1. Tipos de controladores por retroalimentación.....	184
4.2. Descripción del Controlador Proporcional Integral Diferencial.....	216
4.3. Descripción del ciclo de adquisición y control del programa.....	233
4.4. Descripción de las subrutinas o SubVIS transductores.....	243
4.5. Descripción y manejo del panel principal. ....	270
CAPITULO 5.....	283
5. DESARROLLO DE PRÁCTICAS PARA ESTUDIANTES.....	283
5.1. Manejo general del equipo.....	283
5.2. Práctica de Ajuste de Controlador por el método de Ganancia última .....	315
5.2.1. Objetivo.....	316
5.2.2. Teoría.....	316
5.2.3 .Procedimiento.....	319
5.2.4. Cálculos .....	321
5.3. Práctica del Ajuste de Controlador por el método de Curva de Reacción.....	333
5.3.1. Objetivo.....	334
5.3.2 .Teoría.....	334
5.3.3. Procedimiento .....	337

5.3.4. Cálculos.....	340
CAPITULO 6.....	349
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	349
6.1. Conclusiones y recomendaciones.....	349
APENDICES	
BIBLIOGRAFIA	



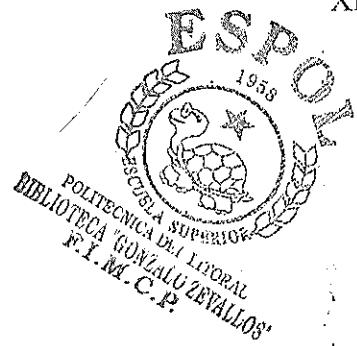
## ABREVIATURAS

A.C.	Corriente alterna.
ADC	Conversión de Analógica a Digital.
Amp	Amperio.
B.P.	Banda proporcional.
bits/s	Bits por segundo.
cm	Centímetro.
dB	Decibeles.
D.C.	Corriente continua.
e.a.	Error de angularidad.
SCADA	Supervisor control y adquisición de datos
E/S	Entrada/Salida.
Fuse	Fusible.
Hz	Hertz.
I/P	Convertidor o transductor de corriente a presión.
IN	Acceso a la señal de entrada.
KΩ	Kilo-ohmios de resistencia.
Kbits/s	Kilo bits por segundo.
Kcu	Ganancia última.
lit/min	Litros por minuto.
min	Minutos.
mA	Miliamperios de corriente.
m³/s	Metros cúbicos por segundo.
OUT	Acceso a la señal de salida.
psi.	Libras fuerza por pulgada cuadrada de presión de aire.
P.B.	Porcentaje de banda proporcional.
P	Proporcional.
PI	Proporcional más integral.
PD	Proporcional más derivativo.
PID	Proporcional más integral más derivativo.
rpm	Repeticiones por minuto.
seg	Segundos.

## SIMBOLOGÍA

AIR SUPPLY	Suministro de aire.
COM	Común.
C	Bobina contactor.
C#	Contacto de contactor.
d/dt	Pre-actuación y estabilización.
FCV1	Válvula de control de flujo 1 (elemento final de control).
FieldPoints	(Punto de Campo).
G	Ganancia o Sensibilidad.
HV#	Válvula manual para regular el flujo de agua #.
INPUT	Acceso a la señal de entrada.
L#	Línea de fuerza #.
N	Línea neutra.
OUTPUT	Acceso a la señal de salida.
P	Presión.
Q	Flujo de agua en lit/min o m <sup>3</sup> /s .
Range	Campo de medida.
Reg. #	Regulador de presión de aire #.
Re#	Resistencia eléctrica #.
R#	Bobinas de relé.
R##	Contacto de relé.
set-point	Punto de control.
span	Ajuste de multiplicación.
$\tau_I$	Ajuste integral en rpm.
Td	Ajuste derivativo o tiempo derivativo en seg.
Tu	Tiempo o Periodo último en min o seg.
T <sub>0</sub>	Tiempo de transporte (tiempo muerto) #, en min o seg.
$\tau$	Constante de tiempo #, en min o seg.
$\tau_D$	Rapidez de derivación o Ajuste derivativo en seg.
V	Tensión en voltios.
zero	Ajuste de cero.
$\Omega$	Ohmios de resistencia.
+	Polo positivo de conexión eléctrica.
-	Polo negativo de conexión eléctrica.

C)   
Conexión eléctrica a tierra  
Número (1,2, 3,...).



## ÍNDICE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1.1. Esquema del módulo de nivel y caudal.....	5
FIGURA 1.2. Partes de un sensor transductor de presión.....	13
FIGURA 1.3. Esquema de un strain gage.....	14
FIGURA 1.4. Strain gage.....	15
FIGURA 1.5. Medidor de presión de diafragma .....	16
FIGURA 1.6. Sensor de nivel Taylor .....	17
FIGURA 1.7. Curva típica de nivel vs salida .....	18
FIGURA 1.8. Placa orificio instalada en la tubería.....	19
FIGURA 1.9. Tipos de placa orificio.....	20
FIGURA 1.10. Transmisor de diafragma.....	21
FIGURA 1.11. Sensor de caudal Taylor.....	22
FIGURA 1.13. Curva típica de salida vs caudal.....	23
FIGURA 1.14. Transductor i/p Taylor.....	24
FIGURA 1.15. Esquema de transductor I/P.....	25
FIGURA 1.16. Curva de corriente vs presión del I/P .....	26
FIGURA 1.17. Transductores de corriente a presión I/P.....	27
FIGURA 1.18. Curvas de apertura de válvula vs caudal.....	30
FIGURA 1.19. Tipos de émbolos para válvulas.....	30
FIGURA 1.20. Válvula de control de vástago recíproco.....	33
FIGURA 1.21. Válvula de control FCV1.....	34
FIGURA 1.22. Válvula de control FCV2.....	35
FIGURA 2.1. Relación medida ideal y real – lectura.....	39
FIGURA 2.2. Error de cero.....	40
FIGURA 2.3. Error de multiplicación.....	41
FIGURA 2.4. Error de angularidad.....	42
FIGURA 2.5. Método general de calibración.....	44
FIGURA 2.6. Medidor de presión de diafragma.....	47
FIGURA 2.7. Curva de calibración del sensor de nivel.....	52
FIGURA 2.8. Esquema de la práctica de calibración del Sensor de caudal.....	62
FIGURA 2.9. Curva de calibración para sensor de caudal.....	63
FIGURA 2.10. Esquema de conexiones del convertidor i/p.....	71
FIGURA 2.11. Curva de calibración i/p transducer serie	

140Ctk12113-10117a.....	76
FIGURA 2.12. Curva de calibración i/p transdutor serie 140Ctk12113-10115a.....	76
FIGURA 2.13. Válvula de control neumática.....	81
FIGURA 2.14. Esquema de la práctica de calibración de la Válvula de control.....	84
FIGURA 2.15. Curva de calibración válvula FCV1.....	89
FIGURA 2.16. Curva de calibración válvula FCV2.....	89
FIGURA 3.1. Sistema modular Field Point .....	92
FIGURA 3.2. Redes industriales sistema modular Field Point.....	93
FIGURA 3.3. Módulo Field Point FP-1000.....	94
FIGURA 3.4. Descripción del módulo FP-1000.....	95
FIGURA 3.5. Módulo Field Point FP-1000 y FP-1001.....	96
FIGURA 3.6. Sistemas de conexión RS-485 y RS-232.....	96
FIGURA 3.7. Riel DIN estándar.....	99
FIGURA 3.8. Seguro para riel DIN.....	99
FIGURA 3.9. Instalación de FP-1000 en el riel DIN.....	100
FIGURA 3.10. Instalación de la base terminal.....	101
FIGURA 3.11. Sum nistro de poder del FP-1000.....	101
FIGURA 3.12. FP-1000 instalado en las bases terminales.....	102
FIGURA 3.13. Módulo de entradas de corriente FP-AI-111.....	102
FIGURA 3.14. Instalación del módulo en la base terminal.....	105
FIGURA 3.15. Diagrama de conexiones del módulo FP-AI-111.....	107
FIGURA 3.16. Instalación del módulo en la base terminal.....	110
FIGURA 3.17. Diagrama de conexiones del módulo FP-AO-200.....	112
FIGURA 3.18. Ventana principal del Field Point Explorer.....	113
FIGURA 3.19. Partes de la ventana del Field Point Explorer.....	115
FIGURA 3.20. Añadir recursos de comunicación.....	117
FIGURA 3.21. Configurando los recursos de Comunicación.....	118
FIGURA 3.22. Encontrando dispositivos.....	119
FIGURA 3.23. Mensaje de error.....	120
FIGURA 3.24. Editar dispositivo.....	122
FIGURA 3.25. Configuración de dispositivo FP-AI-111.....	123
FIGURA 3.26. Configuración de canales en FP-AI-111.....	124
FIGURA 3.27. Editar ítem en FP-AI-111.....	126
FIGURA 3.28. Configuración de ítem en FP-AI-111.....	126
FIGURA 3.29. Configuración del ítem all en el FP-AI-111.....	128
FIGURA 3.30. Configuración de dispositivo FP-AO-200.....	129
FIGURA 3.31. Configuración de canales en FP-AO-200.....	130
FIGURA 3.32. Editar ítem en FP-AO-200.....	132
FIGURA 3.33. Configuración de ítem en FP-AO-200.....	132
FIGURA 3.34. Escribir valor de corriente en un ítem en FP-AO-200.....	134
FIGURA 3.34. Configuración del ítem all en el FP-AO-200.....	136
FIGURA 3.35. Ejemplo de controles e indicadores.....	139

FIGURA 3.36. Diagrama de bloques.....	139
FIGURA 3.37. Icono conector.....	140
FIGURA 3.38. Ventana de inicio de Lab View.....	141
FIGURA 3.39. Panel frontal y diagrama de bloques.....	143
FIGURA 3.40. Barra de herramienta del panel frontal.....	145
FIGURA 3.41. Barra de herramientas del diagrama de bloques.....	147
FIGURA 3.42. Paleta de herramientas.....	149
FIGURA 3.43. Paleta de controles.....	152
FIGURA 3.44. Paleta de funciones.....	154
FIGURA 3.45. Edición de icono conector.....	159
FIGURA 3.46. Ventana de edición de icono conector.....	159
FIGURA 3.47. Cableado de icono conector.....	160
FIGURA 3.48. Ciclo While.....	162
FIGURA 3.49. Ciclo For.....	163
FIGURA 3.50. Estructura case.....	164
FIGURA 3.51. Estructura de secuencia.....	165
FIGURA 3.52. Waveform chart.....	166
FIGURA 3.53. Waveform graph.....	167
FIGURA 3.54. Arreglos.....	168
FIGURA 3.55. Panel principal de control.....	170
FIGURA 3.56. Circuito unificar de activación de bomba y calentador del panel de control de la planta de procesos.....	171
FIGURA 3.57. Circuito de activación de reles de control a través del puerto LPT1.....	172
FIGURA 3.58. Diagrama de conexiones a la tarjeta de la interfase de control de encendido de bomba y calentador.....	173
FIGURA 3.59. Caja de la interfase Field Point.....	174
FIGURA 3.60. Caja de la interfase Field Point.....	175
FIGURA 3.61. Diagrama de conexiones en interior de la interfase Field Point.....	176
FIGURA 4.1. Controladores de procesos Taylor y Fisher.....	179
FIGURA 4.2. Controladores de procesos Foxboro co.....	181
FIGURA 4.3. Circuito de control para intercambiador de calor.....	182
FIGURA 4.4. Circuito para control de nivel de líquido.....	183
FIGURA 4.5. Efecto de la ganancia del controlador sobre la salida del controlador. (a) controlador de acción directa, (b) controlador de acción inversa.....	187
FIGURA 4.6. Respuesta del sistema de nivel de líquido.....	188
FIGURA 4.7. Definición de banda proporcional.....	192
FIGURA 4.8. Respuesta de un controlador proporcional Integral (PI) (acción directa) a un cambio escalón en el error.....	196
FIGURA 4.9. Control de un intercambiador de calor.....	202
FIGURA 4.10. Registro de un circuito de flujo.....	205

FIGURA 4.11. Efectos de los cambios de control.....	210
FIGURA 4.12. Respuesta del circuito de control del intercambiador de calor .....	213
FIGURA 4.13. Respuesta del circuito de control del intercambiador de calor.....	215
FIGURA 4.14. Panel principal y diagrama de bloques del lazo de nivel.....	218
FIGURA 4.15. Panel de diagrama de bloques del lazo de nivel.....	219
FIGURA 4.16. Icono del controlador PID.....	220
FIGURA 4.17. Panel principal y diagrama de bloques del controlador PID.....	221
FIGURA 4.18. Panel principal y del controlador PID.....	222
FIGURA 4.19. Pane de diagrama de bloques del controlador PID.....	224
FIGURA 4.20. Algoritmo matemático del controlador.....	225
FIGURA 4.21. Calculo del diferencial de tiempo.....	226
FIGURA 4.22. Calculo del diferencial de tiempo.....	227
FIGURA 4.23. Calculo del error.....	228
FIGURA 4.24. Calculo del componente proporcional.....	229
FIGURA 4.25. Calculo del componente diferencial.....	230
FIGURA 4.26. Cálculo del componente integral.....	232
FIGURA 4.27. Esquema del programa de control.....	234
FIGURA 4.28. Adquisición de datos en el lazo.....	235
FIGURA 4.29. FP OPEN.VI.....	236
FIGURA 4.30. FP Create Tag.VI.....	237
FIGURA 4.31: FP READ.VI.....	237
FIGURA 4.32. Envío de datos al Field Point.....	238
FIGURA 4.33. FP OPEN.VI .....	239
FIGURA 4.34. FP CREATE TAG.VI .....	240
FIGURA 4.35. FP WRITE.VI.....	240
FIGURA 4.36. Interrupción y error de la comunicación .....	241
FIGURA 4.37. FP CLOSE.VI.....	242
FIGURA 4.38. General error handler.....	242
FIGURA 4.39. Panel frontal del programa de control de nivel.....	244
FIGURA 4.40. Panel de diagrama de bloques control de nivel.....	245
FIGURA 4.41. Panel frontal del programa de control de caudal.....	246
FIGURA 4.42. Diagrama de bloques de control de caudal.....	247
FIGURA 4.43. Corriente/caudal.Vi.....	248
FIGURA 4.44. Corriente/caudal.Vi.....	249
FIGURA 4.45. Corriente/nivel.Vi.....	250
FIGURA 4.46. Corriente/nivel.Vi.....	250
FIGURA 4.47. Nivel-A-Ma.Vi.....	251
FIGURA 4.48. Nivel-A-Ma.Vi.....	252
FIGURA 4.49. Caudal-A-Ma.Vi.....	253
FIGURA 4.50. Caudal-A-Ma.Vi.....	253.



FIGURA 4.51. Bomba-On.Vi.....	254
FIGURA 4.52. Panel de diagrama de bloques Bomba-On.Vi.....	254
FIGURA 4.53. Bomba-Off.Vi.....	256
FIGURA 4.54. Panel De Diagrama De Bloques Bomba-Off.Vi.....	256
FIGURA 4.55. Alarma.Vi.....	258
FIGURA 4.56. Diagrama de bloques Alarma.Vi.....	258
FIGURA 4.57. Retardador de tiempo.....	259
FIGURA 4.58. Diagrama de señales de entrada control nivel.....	260
FIGURA 4.59. Diagrama de señales de salida control nivel.....	262
FIGURA 4.60. Diagrama de alto del programa.....	264
FIGURA 4.61. Diagrama de encendido y apagado de la luz piloto de la bomba.....	265
FIGURA 4.63 Diagrama de señales de entrada control caudal.....	266
FIGURA 4.64. Diagrama de señales de salida control NIVEL.....	268
FIGURA 4.65 Contador del lazo While.....	269
FIGURA 4.66. Panel frontal de control del lazo de nivel.....	271
FIGURA 4.67. Gráficas de barrido control de nivel.....	273
FIGURA 4.68. Paleta de manejo de gráficas.....	274
FIGURA 4.69. Representación de los sensores.....	275
FIGURA 4.70. Representación de las válvulas de control.....	276
FIGURA 4.71. Barra de controles del lazo de nivel.....	276
FIGURA 4.72. Panel frontal de control del lazo de caudal.....	277
FIGURA 4.73. Punto de control para el caudal.....	278
FIGURA 4.74. Gráficas de barrido control de caudal.....	279
FIGURA 4.75. Representación de los sensores.....	281
FIGURA 4.76. Representación de las válvulas de control.....	281
FIGURA 4.77. Barrá de controles del lazo de caudal.....	282
FIGURA 5.1. Caja de disyuntores.....	284
FIGURA 5.2. Interruptor de la fuente de la interfase de encendido de bomba desde la computadora.....	285
FIGURA 5.3. Descripción del panel de control.....	286
FIGURA 5.4. Conectores de los módulos a interfase .....	289
FIGURA 5.5. Conectores de la computadora a interfase.....	289
FIGURA 5.6. Respuesta de un sistema a varios valores de k .....	292
FIGURA 5.7. Respuesta del circuito cuando la ganancia del controlador se hace igual a la ganancia última $K_{CU}$ el periodo último es $T_U$ .....	297
FIGURA 5.8. Respuesta de razón de disminución gradual de un cuarto al cambio en la entrada de perturbación y el punto de control.....	298
FIGURA 5.9. Diagrama de bloques de un circuito típico de control por retroalimentación.....	302
FIGURA 5.10. Diagrama de bloques equivalente y simplificado en el cual todos los instrumentos de campo y el proceso	

Tu .....	329
FIGURA 5.32. Gráfica de la respuesta del sistema a variaciones en el punto de control.....	331
FIGURA 5.33. Gráfica de la respuesta del sistema a variaciones en el punto de control.....	332
FIGURA 5.34. Circuito de control lazo abierto.....	336
FIGURA 5.35. Botón automático a manual.....	337
FIGURA 5.36. Respuesta de un sistema a un salto escalón.....	338
FIGURA 5.37. Parámetros del modelo POMTM en la respuesta de un sistema a un salto escalón.....	339
FIGURA 5.38. Respuesta del sistema de control de nivel a un salto escalón.....	341
FIGURA 5.39. Salto escalón en la apertura de la válvula de control de 4 -7.5 mA.....	341
FIGURA 5.40. Instante en el que se produce el salto escalón.....	343
FIGURA 5.41. Instante en el que se produce la reacción al salto escalón en el sistema.....	344
FIGURA 5.42. Cálculo de la constante de tiempo del sistema. ....	345
FIGURA 5.43. Gráfica de la respuesta del sistema a variaciones en el punto de control.....	348

## ÍNDICE TABLAS

	Pág
TABLA 1 Características del Sensor de Nivel Taylor.....	17
TABLA 2 Características del Sensor de Caudal Taylor.....	23
TABLA 3 Características de la Válvula Taylor FCV1.....	35
TABLA 4 Características de la Válvula Taylor FCV2.....	36
TABLA 5 Primera Aproximación de la Calibración.....	50
TABLA 6 Aproximación de la Calibración.....	50
TABLA 7 Curva de Calibración del Sensor de Nivel.....	51
TABLA 8 Cálculo del Error Promedio del Instrumento.....	53
TABLA 9 Datos para Calibración del Sensor de Caudal.....	63
TABLA 10 Cálculo del Error Promedio del Instrumento.....	66
TABLA 11 Datos para la Curva de Calibración I/P Transducer SERIE 1400TK12113-10117A .....	74
TABLA 12 Datos para la Curva De Calibración I/P Transducer SERIE 1400TK12113-10115A.....	75
TABLA 13 Cálculo del Error Promedio del Instrumento I/P Transducer SERIE 1400TK12113-10117A .....	77
TABLA 14 Cálculo del Error Promedio del Instrumento I/P Transducer SERIE 1400TK12113-10115A .....	78
TABLA 15 Datos para la Curva de Calibración válvula FCV1 Normalmente Abierta.....	86
TABLA 16 Datos Para La Curva De Calibración Válvula FCV2 Normalmente Cerrada.....	87
TABLA 17 Fijación de filtros para el módulo FP-AI-111.....	104
TABLA 18 Terminales asignadas al FP-AI-111.....	106
TABLA 19 Terminales asignadas al FP-AO-200.....	111
TABLA 20 Selección de canales FP-AI-111.....	128
TABLA 21 Selección de canales FP-AO-200.....	135
TABLA 22 Formulas para ajuste de razón de asentamiento de un cuarto .....	286
TABLA 23 Formulas para ajuste de razón de Asentamiento de un cuarto .....	299

## ÍNDICE PLANOS

PLANO 1

Círculo Unificar de Activación de Bomba y Calentador.

PLANO 2

Círculo de Activación de Bomba y Calentador por Puerto LPT1

PLANO 3

Diagrama de Conexiones de la Interfase Field Point



## **INTRODUCCIÓN**

Como parte de la modernización de los Laboratorios de la FIMCP se crea la necesidad de restaurar y mejorar equipos, con las más nuevas tecnologías de control por computadoras y sistemas SCADA, mejorando tanto la eficiencia y precisión de estos equipos.

Dentro de este marco se propuso el proyecto de actualización de la planta de procesos del laboratorio de procesos industriales de la FIMCP, este proyecto propone la recuperación de la planta de procesos para convertirla en una herramienta de laboratorio para el estudio de los procesos más comunes en la industria y toda la instrumentación que conlleva.

Esta tesis abarca la recuperación de uno de los tres módulos que compone la planta de procesos, el módulo de control de nivel y caudal, y la implementación de un control digital virtual que reemplace a los antiguos controladores neumáticos, mediante el uso de interfaces de control digital y la creación de software para el control del módulo desde un computador personal.

La facilidad de operación y la permanencia en las calibración de los controles digitales, convertirán al módulo de control de caudal y nivel en una buena

herramienta didáctica para la ejecución de prácticas de laboratorio, siendo este su objetivo principal.

El módulo de control de caudal y nivel permitirá realizar prácticas de ajuste de controlador para el curso de sistemas de control, el controlador digital virtual es programado con las mismas características matemáticas de un controlador neumático, lo que permite que se puedan demostrar en el laboratorio las teorías expuestas en clase, durante la práctica los alumnos aprenderán las técnicas para el ajuste de un sistema de control, a pesar que en un futuro los controladores serán una simple pieza del sistema de control de procesos, las técnicas aquí expuestas seguirán siendo la base de la operación de dichos controladores.



# CAPITULO 1

## 1. MÓDULO DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL DE LA PLANTA DE PROCESOS

### 1.1. Generalidades del módulo de Control de Nivel y Caudal

El módulo del lazo de control de nivel y caudal es uno de los tres módulos que conforman la Planta de Procesos Industriales de la FIMCP. Esta planta fue construida con el propósito de estudiar algunos de los procesos más comunes en la industria como el control de nivel y caudal, además nos permite estudiar el método de funcionamiento y la utilización de algunos tipos normalizados de transmisores, transductores y válvulas de control, así como de las nuevas tecnologías aplicadas al control de procesos como los sistemas SCADA y control por computadora, principalmente fue construida con el propósito de estudiar los métodos de ajuste de controladores mediante la realización de prácticas de

laboratorio dentro del curso de sistemas de control. El módulo de control de nivel y caudal permite la interacción del estudiante con elementos reales de control e instrumentación, además ofrece un sistema de control que permite la demostración de las teorías expuestas en clase. Con la finalidad de actualizar y mejorar la planta de procesos industriales se implementaron las más nuevas y versátiles tecnologías de adquisición y control por computadora, esta tecnología permitió controlar la planta de procesos desde el monitor de una computadora, a través de la programación de una interfase gráfica, que nos permite monitorear en tiempo real los cambios en las variables del sistema, además con la creación de un controlador virtual con las mismas características matemáticas de un controlador neumático pero con la facilidad y permanencia de la calibración, que nos permite un software de computadora.

## **1.2. Descripción del módulo de Control de Nivel y Caudal**

El módulo de control de nivel y caudal fue diseñado para trabajar en dos lazos o sistemas diferentes, el primer lazo permite el control de nivel en el tanque principal y el segundo lazo permite el control del caudal que ingresa al tanque principal, este mcdo de diseño permite realizar dos prácticas en este módulo una para ajuste de controlador en el lazo de

control de nivel y otra de ajuste de controlador en el lazo de control de caudal, la diferencia en las prácticas es el método para obtener parámetros de ajuste para el controlador. La Figura 1.1 presenta el esquema del sistema y la disposición de las partes del módulo de Control de Nivel y Caudal.

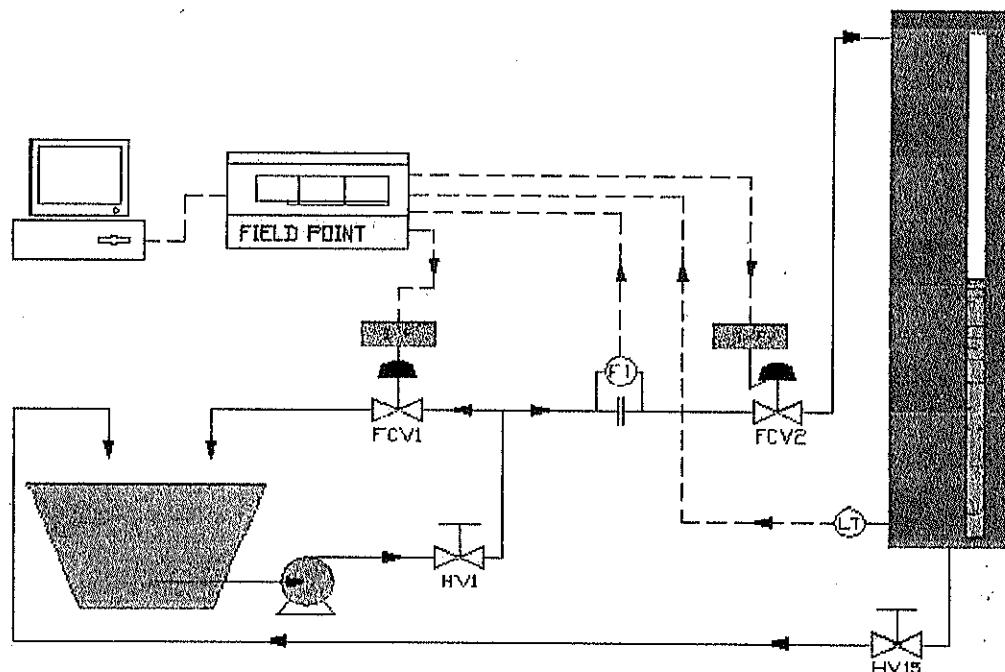


FIGURA 1.1. ESQUEMA DEL MÓDULO DE NIVEL Y CAUDAL

El módulo de control de nivel y caudal consta de las siguientes partes:

- 1- Tanque cisterna.
- 2- Bomba de agua.
- 3- Válvula principal de ingreso HV1.
- 4- Sensor de caudal FT.

- 5- Válvula neumática regulable normalmente abierta FCV1.
- 6- Válvula neumática regulable normalmente cerrada FCV2.
- 7- Tanque principal.
- 8- Sensor de nivel LT.
- 9- Válvula de descarga HV15.
- 10-Transductores de corriente eléctrica a presión I/P
- 11-Interfase de entradas y salidas de corriente Field Point.



La diferencia entre el lazo de nivel y el lazo de caudal se basa solo en el tipo de variable que es controlada, físicamente no existe variación en el módulo, el único cambio de un sistema a otro es el programa que se encarga de controlar los procesos.

### **Descripción del circuito del Lazo de Control de Caudal.**

La función de este lazo es controlar el caudal de agua que ingresa al tanque principal, manteniéndolo lo más cercano al punto de control (Set point) a pesar de las perturbaciones que se le pudieran infringir al sistema.

Cuando la bomba es encendida impulsa el agua desde el tanque cisterna al circuito, la válvula principal de ingreso HV1 debe de estar

completamente abierta. A continuación se presenta una bifurcación al circuito, una parte del caudal se dirige hacia la válvula de control FCV1 normalmente abierta la cual devuelve parte del caudal al tanque cisterna y otra hacia el sensor FT.

Después de la bifurcación, el caudal alcanza el sensor de caudal FT, el cual indica el caudal a través de la tubería en metros cúbicos por segundo. A continuación se encuentra la válvula neumática de control FCV2, esta válvula es normalmente cerrada, la función de las dos válvulas es controlar el caudal de agua que circula dentro de la tubería con el propósito de mantener el caudal seteado, estable. A continuación el agua es descargada en el interior del tanque principal, el sensor LT en este sistema solo transmite el nivel del tanque. Finalmente la válvula de descarga HV15, retorna el caudal al tanque cisterna, la válvula debe de operar completamente abierta para obtener la más rápida respuesta posible.

#### **Descripción del circuito del Lazo de Control de Nivel.**

La función de este lazo es controlar el nivel de agua en el tanque principal, manteniéndolo lo más cercano al punto de control (set point) a pesar de las perturbaciones que se le pudieran infringir al sistema.

Cuando la bomba es encendida impulsa el agua desde el tanque cisterna al circuito, la válvula principal de ingreso HV1 debe estar completamente abierta. A continuación se presenta una bifurcación al circuito, una parte del caudal se dirige hacia la válvula FCV1 y otra hacia el sensor FT.

El lazo de nivel debe de aprovechar todo el caudal que la bomba puede enviarle, para que la respuesta del sistema sea mas rápida, es por esa razón que la válvula neumática FCV1 debe permanecer cerrada durante la operación, ya que de lo contrario parte de caudal se desviará de retorno a la cisterna.

Después de la bifurcación, el caudal alcanza el sensor de caudal FT, el cual para este sistema solo indica el caudal de agua que ingresa al tanque principal, en metros cúbicos por segundo. A continuación se encuentra la válvula neumática de control FCV2, esta válvula es normalmente cerrada, su función es controlar el caudal de agua que ingresar al tanque principal con el propósito de mantener el nivel seteado, estable. En el fondo del tanque principal se encuentra el sensor de nivel LT el cual transmite una señal de corriente directamente proporcional al nivel del tanque a la interfase Field Point.

Finalmente la válvula de descarga HV15, retorna el caudal al tanque cisterna, la válvula debe de operar completamente abierta para obtener la más rápida respuesta posible.

### **Características de un sistema de control.**

La estabilidad, exactitud y rapidez de respuesta son características necesarias que debe tener todo sistema de control, los sistema deben ser estables, y esto significa que la respuesta a una señal ya sea un cambio al punto de control o una perturbación, debe alcanzar y mantener un valor útil durante un periodo razonable.

Un sistema de control inestable producirá por ejemplo oscilaciones persistentes o de gran amplitud en la señal o bien puede ser que la señal tome valores que corresponden a límites extremos. Cualquier tipo de respuesta característica de un sistema de control inestable es obviamente poco satisfactoria.

Es conveniente hacer notar que no existe sistema de control alguno, que pueda mantener un error cero entre el punto de control y la variable controlada, porque siempre es necesario que exista un error para que el sistema inicie una acción correctora.

Un sistema de control ideal es estable de una exactitud absoluta (mantiene un error nulo a pesar de las perturbaciones del sistema y responda de manera instantánea a los cambios en el punto de control).

La planta de procesos industriales cuenta con un sistema de control que es lo suficientemente flexible para realizar prácticas de laboratorio de ajuste de controlador y establecer los parámetros de ajuste que logran que el sistema se torne los exacto y estable posible.

### **1.3. Sensores, transductores y válvulas de control**

Se conoce como instrumentación a la técnica y equipos destinados a medir, visualizar, monitorear, y controlar las operaciones de un proceso determinado.

Los sistemas de control e instrumentación se aplican para optimizar la eficiencia de los procesos. Una planta de procesos industriales representa un balance de energías, hacia y desde los procesos dinámicos. Los sistemas de control debidamente complementados por los de instrumentación, regulan en forma automática el flujo de energía que va hacia las unidades del proceso y también las características que presentan los productos de salida de las mismas. En todo sistema de

control automático de un proceso, los componentes principales son: el proceso en sí mismo y el controlador. Este último tiene a su cargo la tarea de medir el valor de una variable de dicho proceso, exhibir ese valor por medio de algún instrumento, compararla con alguna magnitud de referencia y operar con alguna otra variable para corregir a la que fue medida, en caso de existir alguna desviación respecto de la de referencia.

Los elementos que componen el controlador son: sistema de medición, (formado por el sensor primario, los medios de transmisión del valor medido, el elemento de medición y el display o unidad indicadora) y los medios de control, los elementos de transmisión de la señal de corrección y el elemento final de control.

En el ámbito industrial, el número de variables controladas es numeroso y se pueden mencionar entre las más importantes a las siguientes:

Temperatura, presión, caudal, nivel, humedad, punto de rocío, velocidad, tensión mecánica, vibración, peso, fuerza, etc.

Obviamente, las diferentes características de las variables sometidas a medición y control hacen necesario contar con un número igualmente diverso de elementos sensores o transductores.

Llamamos transductor a un dispositivo que convierte a una señal en otra de distinta naturaleza, la cual se puede medir, analizar, y usar para dar comienzo a una función de control. La tecnología actual de fabricación de transductores permite contar con una amplia gama y variedad de ellos con características de precisión y confiabilidad realmente notables. En lo que sigue, se expondrá la información acerca de los sensores, transductores y elementos de control que utiliza el módulo de control de nivel y caudal de la planta de procesos.

El módulo de control de nivel y caudal de la planta de procesos cuenta con dos sensores transductores eléctricos de presión uno para sensar el nivel de agua dentro del tanque principal y otro para sensar el caudal de agua que ingresa dentro del tanque principal, también cuenta con transductores I/P que se encargan controlar las válvulas de control las cuales a su vez controlan el caudal de agua en el sistema y son los elementos finales de control.

### **Transductor eléctrico de presión.**

Un transductor eléctrico de presión es un elemento primario de medición que convierte una presión de entrada en una señal eléctrica de salida,

proporcional a la presión de entrada. La aparición de esta señal es provocada por la variación de alguna propiedad eléctrica específica del transductor (resistencia, reluctancia, inductancia) cuando el mismo es energizado por una fuente de tensión continua o alterna. Así mismo esa señal tiene debidamente especificados, parámetros tales como amplitud (mV ó mA), respuesta a las frecuencias (ciclos/ segundos) ó duración de pulso. Para el caso del sensor de nivel del módulo de control de nivel y caudal la planta de procesos, se trata de un transductor eléctrico de presión que utiliza extensiómetros (Strain gage).

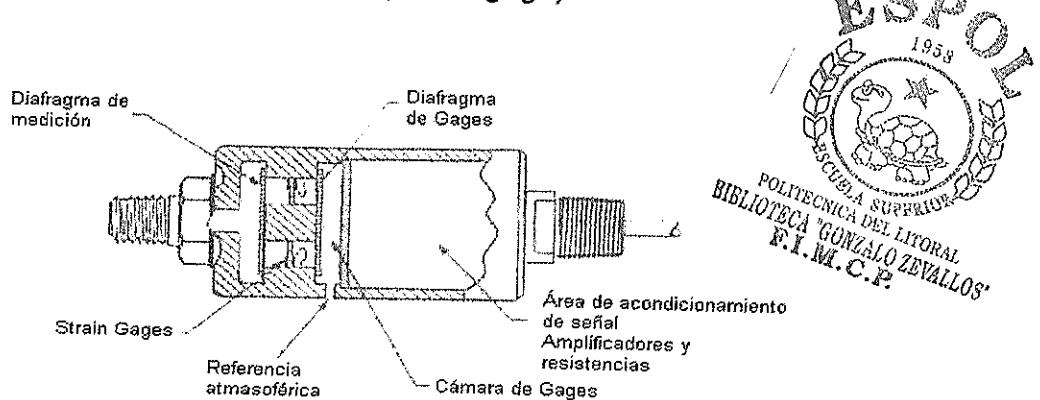


FIGURA 1.2. PARTES DE UN SENSOR TRANSDUCTOR DE PRESION

### **Strain-Gage.**

Este transductor funciona basándose en el principio en el que un alambre conductor sufre una variación en su resistencia eléctrica, en función de la tensión mecánica que se le aplique, produciendo una deformación. Se

define a la deformación como la variación de la longitud dividida por la longitud original ( $\Delta L/L$ ). La variación unitaria de resistencia provocada por la deformación, es igual a la variación de la resistencia dividida por la resistencia original ( $\Delta r/R$ ).

La relación existente entre la deformación unitaria y la variación unitaria de resistencia, recibe el nombre de factor de escala y es igual a  $(\Delta r/R)/(\Delta L/L)$ .

Físicamente, el Strain-gage consiste en una reducida longitud o grilla de alambre fino de 0,2 mm, de elevada resistencia. En el centro de una estructura se haya colocada una armadura soportada en forma rígida, en el plano perpendicular al eje longitudinal del dispositivo, tal como aparece en la Figura 1.3.

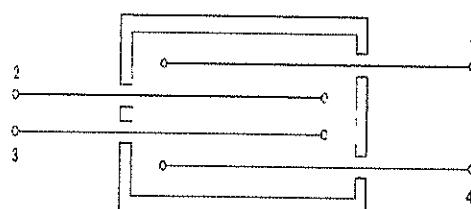


FIGURA 1.3. ESQUEMA DE UN STRAIN GAGE

Además existen cuatro filamentos de alambre sensible a la deformación, de igual longitud, devanados entre aisladores rígidos montados en el marco y en la estructura, si ésta se desplaza hacia la izquierda por la acción de una fuerza externa, los elementos 1 y 4 aumentan su longitud, ocurriendo lo contrario con los elementos 2 y 3. La variación de resistencia en los filamentos es proporcional a la variación de longitud.

Existe otro tipo de sensor en el cual una grilla o hélice de alambre fino sensible, encerrada entre dos capas de papeles pegados, va adherida de igual forma a la superficie del miembro sometido a esfuerzo mecánico.

Nuevamente la acción de la fuerza aplicada a dicho miembro provoca una variación de longitud de los alambres con el consiguiente cambio en su resistencia eléctrica, también proporcional a la deformación.

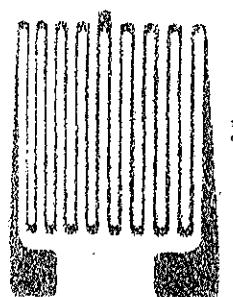


FIGURA 1.4. STRAIN GAGE

### 1.3.1. Descripción del sensor de nivel LT.

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo directamente la altura del líquido sobre una línea de referencia, la planta de procesos cuenta con un sensor de presión de diafragma, este sensa la presión hidrostática producida por la columna de agua dentro del tanque principal. El medidor de presión consiste en un diafragma de acero inoxidable en contacto con el líquido del tanque, en un tanque abierto a la atmósfera esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto. Al aplicársele presión el diafragma se deforma proporcionalmente a la presión que se le aplique, esta deformación es utilizada por un transductor eléctrico para convertir la deformación del diafragma en una variación de corriente eléctrica proporcional a la deformación.

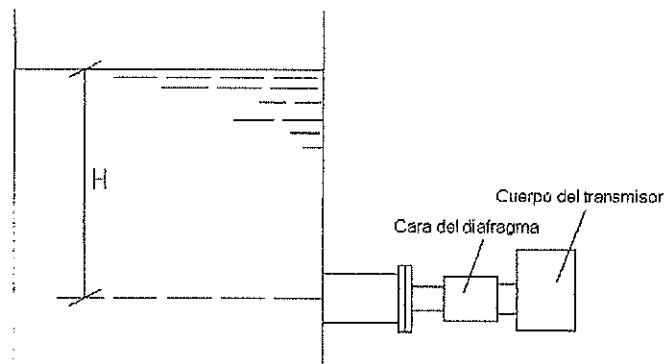
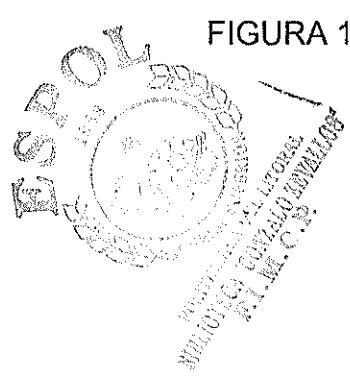


FIGURA 1.5. MEDIDOR DE PRESIÓN DE DIAFRAGMA.



La planta de procesos cuenta con un sensor transductor eléctrico de presión de diafragma de la marca Taylor Instrument con número de serie 453TB01020A0000-911, este sensor es para una columna máxima de 100 pulgadas de agua aproximadamente 2.5 m de agua en el tanque principal, este sensor va acorde con las dimensiones del tanque principal, 2 m de alto, lo que nos permite tener una buena resolución en las lecturas del sensor de nivel del tanque principal.

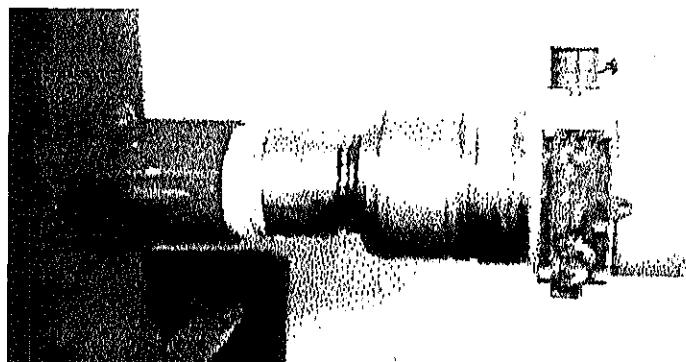


FIGURA 1.6. SENSOR DE NIVEL TAYLOR

La curva típica de porcentaje de nivel versus porcentaje de salida para un sensor de nivel de presión, es una recta, el ajuste de los valores de calibración se logran mediante los tornillos de calibración para el valor de Z o cero y el ajuste del Span.

Características técnicas del Sensor de nivel Taylor	
S/N 453TB01020A0000-911	
Rango de entrada	0 - 100 IN H <sub>2</sub> O
Rango de salida	4 -20 mA DC
Voltaje de suministro	24 VDC
Ajuste de Span	25 – 150 IN H <sub>2</sub> O

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE NIVEL TAYLOR

Estos tornillos de calibración se encuentran en el frente del cuerpo del transmisor eléctrico del sensor de presión, La Figura 1.7 muestra la curva típica para estos sensores.

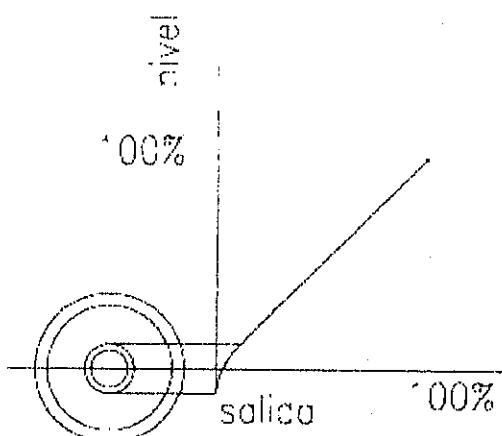


FIGURA 1.7. CURVA TIPICA DE NIVEL VS SALIDA

### 1.3.2. Descripción del sensor de caudal FT.

Los medidores volumétricos determinan el caudal del fluido, para el caso de la planta de procesos en el módulo de control de caudal, lo logra de un modo indirecto mediante elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido en la tubería.

Entre los elementos que logran esta presión diferencial se encuentran la placa orificio, la tobera, y el tubo de venturi. La placa orificio consiste en una placa perforada instalada en la tubería como lo muestra la Figura 1.8.

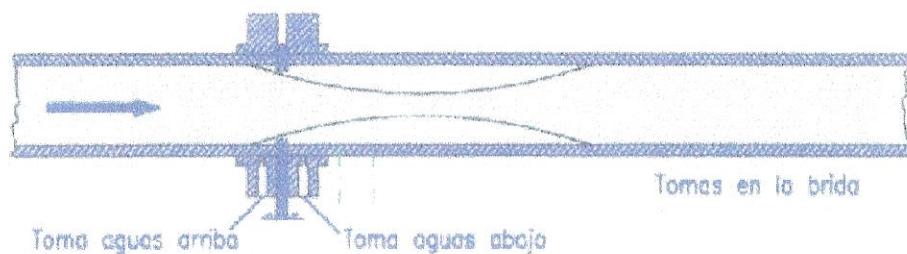


FIGURA 1.8. PLACA ORIFICIO INSTALADA EN LA TUBERIA

A causa de la restricción del fluido por la placa orificio su produce un aumento en su velocidad que da lugar a una caída de presión el caudal resultante resulta ser directamente proporcional a la raíz

cuadrada de esta presión diferencial. La Figura 1.9 muestra algunos tipos de placa orificio utilizados en la industria.

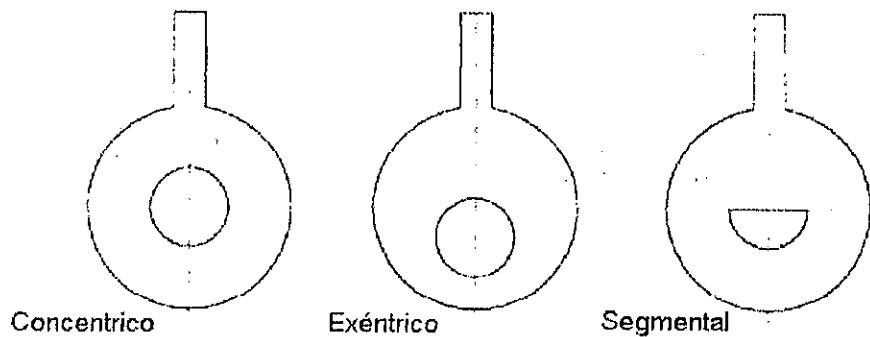


FIGURA 1.9. TIPOS DE PLACA ORIFICIO

Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior a la placa, captan la presión diferencial y la conducen a un sensor transductor de presión diferencial de diafragma, el cual convierte el diferencial de presión en una variación proporcional en la salida de corriente del transmisor del sensor.

El módulo de control de caudal de la planta de procesos cuenta con un sensor transductor de presión diferencial de diafragma, este tiene dos diafragmas en dos cámaras separadas, como se aprecia en la Figura 1.10, estas se encuentran conectadas directamente a las tomas de presión antes y después de la placa orificio, lo que le

permite sensar cada una de las dos presiones originadas por la restricción de la placa orificio.

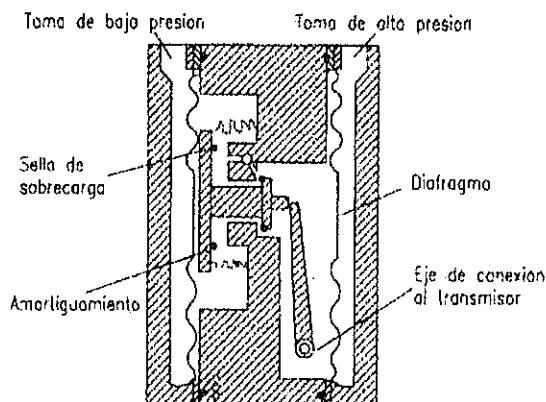


FIGURA 1.10. TRANSMISOR DE DIAFRAGMA

La parte transductora del sensor opera igual que el sensor de nivel, es decir al aplicársele presión el diafragma se deforma proporcionalmente a la presión que se le aplique, esta deformación es utilizada por un transductor eléctrico para convertir la deformación del diafragma en una variación de corriente eléctrica proporcional a la deformación.

Finalmente se utiliza variación de corriente para determinar el caudal real que es proporcional a la raíz cuadrada de la variación de corriente.

La planta de procesos cuenta con un sensor transductor eléctrico de presión ciferencial de diafragma de la marca Taylor Instrument con número de serie 405TB0121090100-1004, este sensor fue diseñado para una presión máxima de 2500 psig, en la línea, el sensor va acorde con las requerimientos del sistema, con un caudal estimado máximo de  $6.40E-4 \text{ m}^3/\text{s}$  o 38.4 litros/min. Para la potencia de la bomba principal, la pérdida por tubería y la reducción en la placa orificio el máximo caudal que se puede alcanzar en el lazo de control de caudal es de  $5.4E-4 \text{ m}^3/\text{s}$  o aproximadamente 32 litros/min, es decir que el sistema casi alcanza las condiciones para el aprovechamiento de toda la escala del sensor, esto nos permite tener una buena resolución en las lecturas del sensor de caudal.

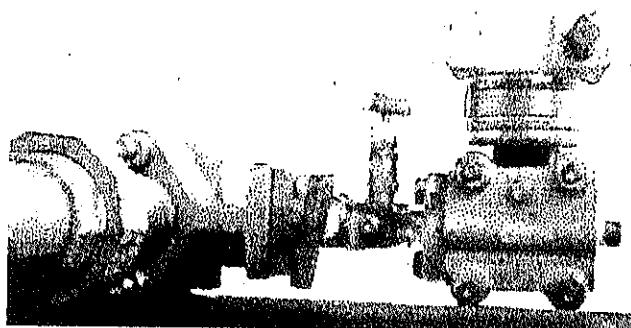


FIGURA 1.11. SENSOR DE CAUDAL TAYLOR

Características técnicas del Sensor de nivel Taylor	
S/N 405TB0121090100-1004	
Rango de entrada	0 – 6.4E-3 m <sup>3</sup> /s H <sub>2</sub> O
Rango de salida	4 -20 mA DC
Voltaje de suministro	24 VDC
Corriente Max	250 mA
Voltaje Max	45VDC
Temperatura Max	85°C

TABLA 2 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE CAUDAL TAYLOR

La curva típica de porcentaje de caudal versus porcentaje de salida para un sensor de caudal, es una cuadrática, el ajuste de los valores de calibración se logran mediante los tornillos de calibración para el valor de Z o cero y el ajuste del Span. Estos tornillos de calibración se encuentran en el frente del cuerpo del transmisor eléctrico del sensor de caudal, La Figura 1.7 muestra la curva típica para estos sensores.

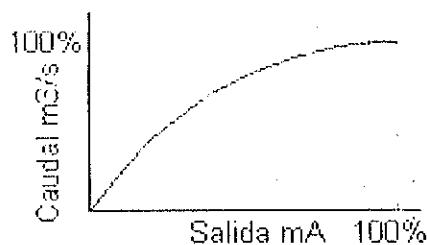


FIGURA 1.13. CURVA TIPICA DE SALIDA VS CAUDAL

### 1.3.3. Descripción de transductor de corriente a presión (I/P).

La planta de procesos para efectuar el control de los procesos cuenta con válvulas de control neumáticas estas requieren un conversor o transductor que cambia la señal eléctrica proporcional del controlador a una señal neumática proporcional para poderlas actuar. En algunos casos el transductor se muestra como parte de la válvula. En el caso de la planta de procesos el transductor I/P es una parte separada montada cerca de la válvula. El transductor I/P está generalmente montado en una situación donde puede repararse fácilmente y la válvula está generalmente montada en el conducto. La señales eléctrica de corriente tiene un rango estándar de 4-20-mA DC, y el rango de las señales de presión neumática para los actuadores neumáticos es de generalmente 3-15 psi. Este tipo de conversor se llama un conversor de I/P porque cambia una señal de corriente (I) a una señal de presión (P). La Figura 1.14 muestra un ejemplo de un transductor I/P.

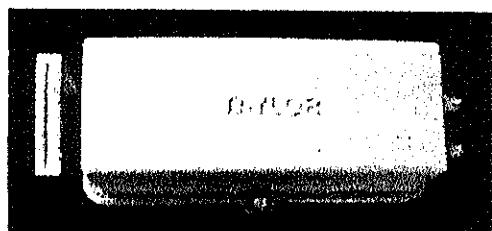


FIGURA 1.14. TRANSDUCTOR I/P TAYLOR

En resumen el transductor I/P se encarga de convertir la señal de corriente de 4-20 mA DC que emite el controlador en una señal proporcional de presión neumática de 3-15 psi para finalmente controlar las válvulas neumáticas de control del lazo. Este dispositivo usa una bobina para inducir un campo magnético para cambiar la posición de una viga en equilibrio o balancín, al aumentar la corriente a través de la bobina esta aleja o acerca el balancín a una tobera, de este modo se controla la pérdida de una pequeña cantidad de presión de aire a través de la tobera. La pérdida de presión de aire a través de la tobera controla la presión de aire principal que se regula a 3-15 psi. El suministro de aire para el transductor I/P en la mayoría es aproximadamente 22 psi para que el transductor pueda controlar la presión entre 3 y 15 psi. La Figura 1.15 muestra un esquema del mecanismo de un transductor I/P.

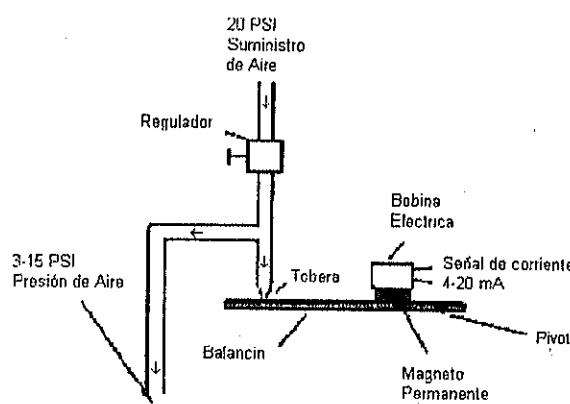


FIGURA 1.15. ESQUEMA DE TRANSDUCTOR I/P

Figura 1.16 proporciona un gráfico que muestra la proporción de corriente versus la presión de aire. Este gráfico le permite seleccionar un valor de la señal de corriente en mA y determinar la cantidad de presión de aire que el conversor de I/P debe producir. Por ejemplo, cuando la señal eléctrica de corriente está en su mínimo (4 mA), la señal de presión de aire también estará en su mínimo (3 psi). Cuando la señal eléctrica está en su máximo (20 mA), la señal de presión de aire estará en su máximo (15psi). El valor del punto medio para la señal eléctrica de corriente es 12 mA que proporciona 9 psi.

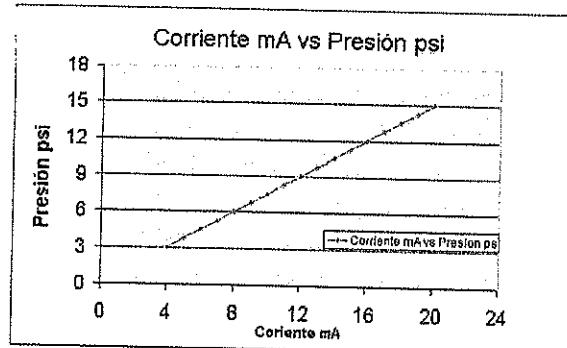


FIGURA 1.16. CURVA DE CORRIENTE VS PRESIÓN DEL I/P

La señal eléctrica de corriente para transductor I/P para el caso de la planta de procesos se origina de la interfase Field Point que es controlada directamente por la computadora, la interfase contiene



un convertidor D/A (Digital /Analógico) de señales que convierte las señales digitales de la computadora en señales analógicas de corriente para el transductor I/P que finalmente opera las válvulas neumáticas de control del proceso.

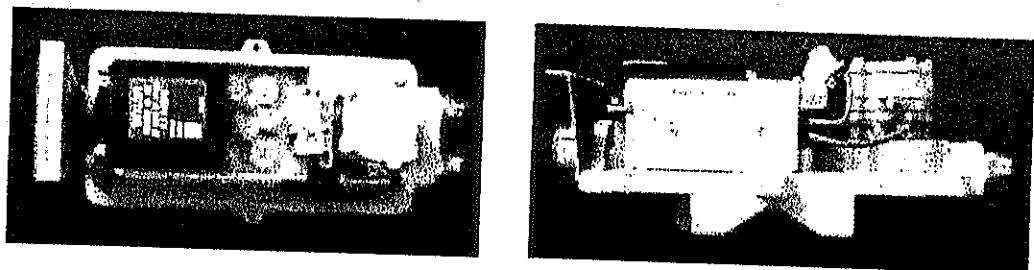


FIGURA 1.17. TRANSDUCTORES DE CORRIENTE A PRESIÓN I/P

#### 1.3.4. Descripción de las válvulas de control.

Las válvulas de control son los elementos finales de control más usuales y se les encuentra en las plantas de proceso, donde manejan los flujos para mantener en los puntos de control las variables que se deben controlar.

La válvula de control actúa como una resistencia variable en la línea de proceso; mediante el cambio de su apertura se modifica la

resistencia al flujo y, en consecuencia, el flujo mismo. Las válvulas de control no son más que reguladores de flujo.

### **Características de flujo de la válvula de control**

Para ayudar a lograr un buen control, el circuito de control debe tener una "personalidad constante", esto significa que en el proceso completo, el cual se define como la combinación de sensor/transmisor/unidad de proceso/válvula; la ganancia; las constantes de tiempo; y el tiempo muerto deben ser tan constantes como sea posible. Otra manera de referirse a que el proceso completo tiene una "personalidad constante" es decir que se trata de un sistema lineal.

La mayoría de los procesos son de naturaleza no lineal, lo que hace que el sensor/transmisor/unidad de proceso tampoco sea lineal. Puesto que el "proceso completo" incluye la válvula, mediante la elección de la correcta "personalidad de la válvula de control" se puede lograr que se reduzcan las características no lineales de la combinación sensor/transmisor/unidad de proceso; si esto se hace de manera correcta, se puede conseguir que la combinación sensor/transmisor/unidad de proceso/válvula tenga una ganancia

constante. La personalidad de la válvula de control se conoce comúnmente como la "característica de flujo de la válvula de control" y, por tanto, se puede decir que el propósito de la caracterización del flujo es obtener en el proceso completo una ganancia relativamente constante para la mayoría de las condiciones de operación del proceso.

La característica de flujo de la válvula de control se define como la relación entre el flujo a través de la válvula y la posición de la misma conforme varía la posición de 0% a 100%. Se debe distinguir entre la "característica de flujo inherente" y la "característica de flujo en instalación". La primera se refiere a la característica que se observa cuando existe una caída de presión constante a través de la válvula. La segunda se refiere a la característica que se observa cuando la válvula está en servicio y hay variaciones en la caída de presión, así como otros cambios en el sistema. Primero se abordará la característica de flujo inherente.

En la Figura 1.18 se muestran tres de las curvas más comunes de característica de flujo inherente. La forma de la curva se logra mediante el contorno de la superficie del émbolo cuando pasa cerca del asiento de la válvula.

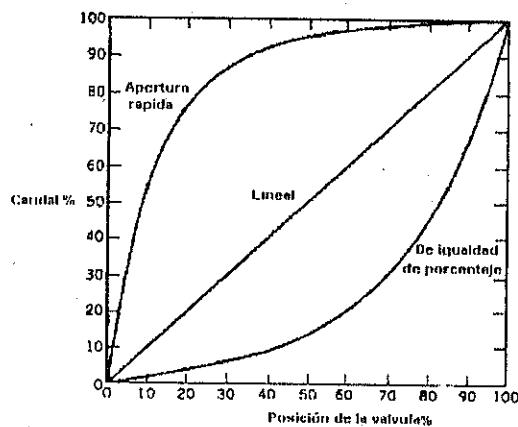


FIGURA 1.18. CURVAS DE APERTURA DE VÁLVULA VS CAUDAL

En la figura 1.19 se muestra el émbolo típico para la válvula lineal y la de porcentaje igual.

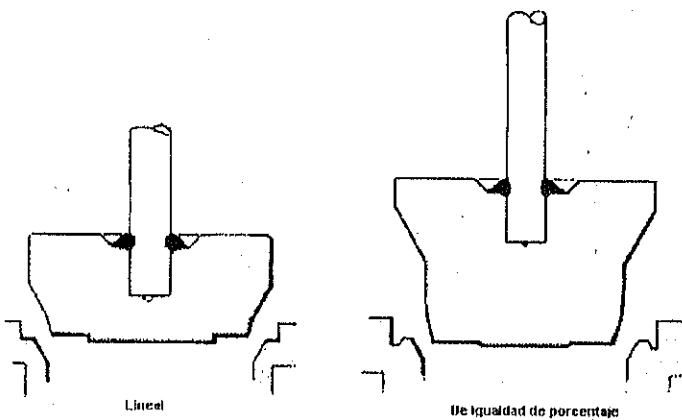


FIGURA 1.19. TIPOS DE ÉMBOLOS PARA VÁLVULAS

La característica de flujo lineal produce un flujo directamente proporcional al desplazamiento de la válvula, o posición de la

válvula; con un 50% de desplazamiento, el flujo es el 50% del flujo máximo.

La característica de flujo de porcentaje igual produce un "cambio muy pequeño en el flujo al inicio del desplazamiento de la válvula, pero conforme éste se abre hasta la posición de abertura máxima, el flujo aumenta considerablemente. El término "porcentaje igual" proviene del hecho de que, para incrementos iguales en el desplazamiento de la válvula, el cambio de flujo respecto al desplazamiento de la válvula es un porcentaje constante de la tasa de flujo en el momento del cambio; es decir, cuando la posición de la válvula se incrementa en 1%, al pasar la posición de la válvula del 20 al 21%, el flujo se debe incrementar en 1% respecto al valor que tenía en la posición del 20%; si la posición de la válvula se incrementa en 1 %, al pasar del 60 al 61 %, el flujo se incrementa en 1% respecto al valor en la posición del 60%.

Existe gran variedad de válvulas de control en el mercado con diferentes tipos de actuadores o accionadores en el caso particular de las válvulas de control de la planta de procesos, se utilizan válvulas de control con accionador neumático de diafragma, el accionador (o actuador) es la parte de la válvula de control con que

se convierte la energía de entrada, ya sea neumática o eléctrica, en movimiento mecánico para abrir o cerrar la válvula.

Las válvulas con que cuenta la planta de procesos se las puede clasificar dentro del grupo de las válvulas de vástago recíproco. En la Figura 1.20 se muestra una válvula de control de vástago recíproco típica, que en particular se conoce como válvula de globo con asiento sencillo y vástago deslizable.

Las válvulas de globo son una familia de válvulas que se caracteriza por una parte de cierre que viaja en línea perpendicular al asiento de la válvula, y se utilizan principalmente para propósitos de estrangulamiento y control de flujo en general.

En la Figura 1.20 también se muestran en detalle los diferentes componentes de la válvula; se observa que la válvula se divide en dos áreas generales: el actuador y el cuerpo.

El actuador es la parte de la válvula con que se convierte en movimiento mecánico la energía que entra a la válvula para aumentar o disminuir la restricción de flujo.



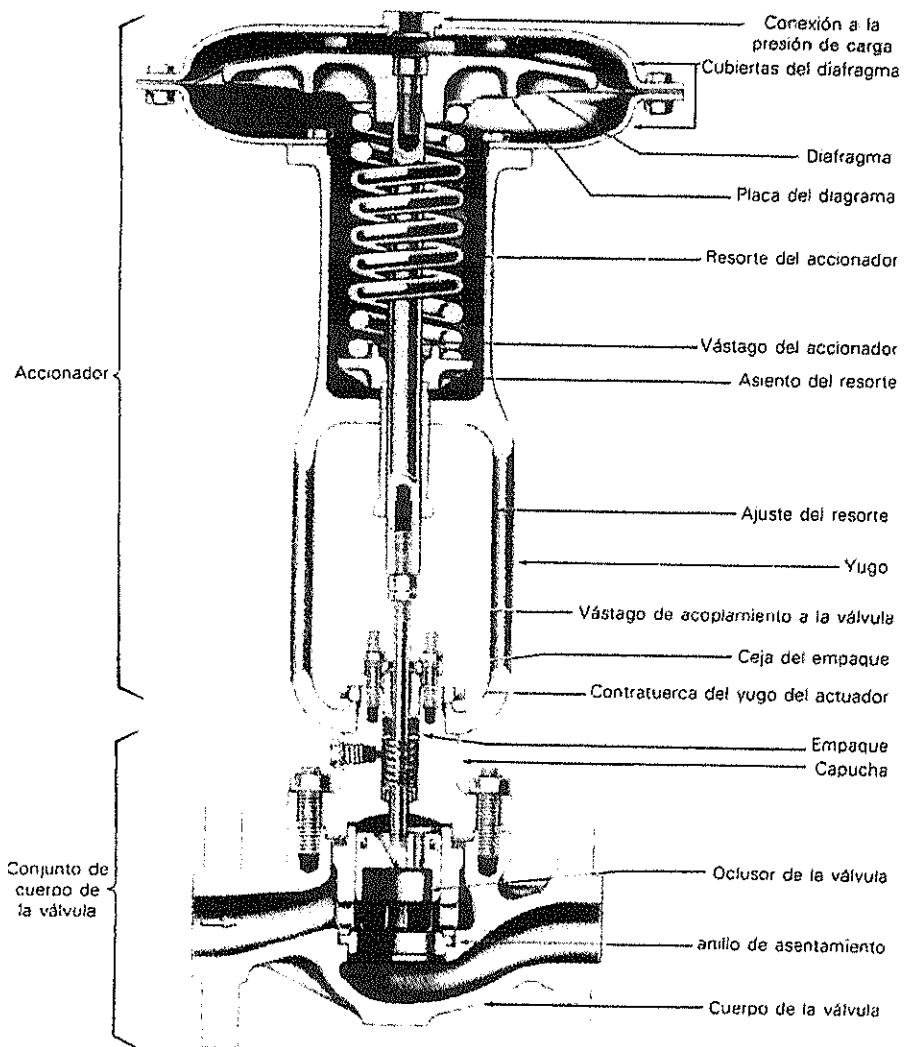


FIGURA 1.20. VÁLVULA DE CONTROL DE VÁSTAGO RECÍPROCO

El lazo de control de caudal y nivel de la planta de procesos cuenta con dos válvulas de control de accionador neumático de vástago reciproco se encuentran denominadas FCV1 y FCV2

### Válvula de control FCV1

La válvula de control FCV1 es de la marca Taylor, una de sus principales características de operación es que normalmente abierta esto significa que requiere presión de aire para accionarse y cerrar el paso de caudal a través de la válvula. La Figura 1.21 muestra la válvula FCV1 instalada en el módulo.

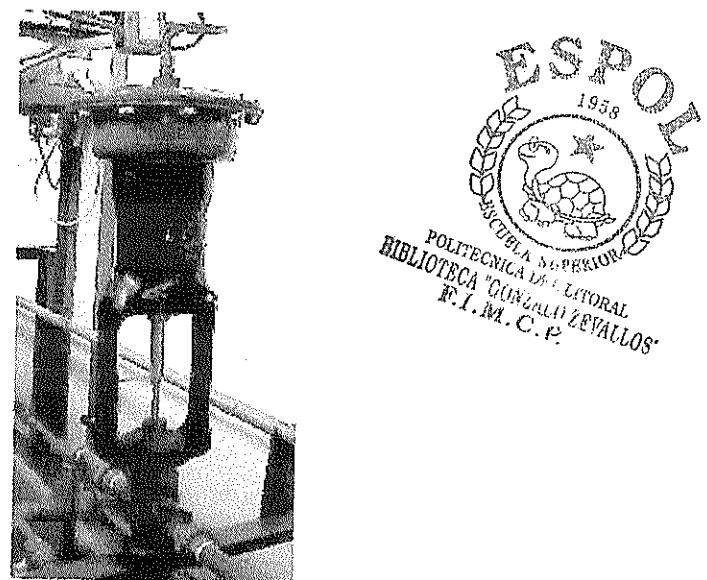


FIGURA 1.21. VÁLVULA DE CONTROL FCV1

A continuación se muestran las principales características que proporciona el fabricante de la válvula FCV1 en la tabla 3.

Características de Válvula FCV1	
Tamaño	Diámetro de la tubería ½"
Rango de entrada de aire	3 – 15 psi
Material del cuerpo	Br
Presión máxima del cuerpo	250 psi
Serie	2000 VA 32220 – 9295A

TABLA 3 CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA TAYLOR FCV1

### Válvula de control FCV2

La válvula de control FCV2 es de la marca Taylor, una de sus principales características de operación es que normalmente cerrada esto significa que requiere presión de aire para accionarse y abrir el paso de caudal a través de la válvula. La Figura 1.22 muestra la válvula FCV2 instalada en el módulo.



FIGURA 1.22. VÁLVULA DE CONTROL FCV2

A continuación se muestran las principales características que proporciona el fabricante de la válvula FCV2 en la tabla 4.

Características de Válvula FCV2	
Tamaño	Diámetro de la tubería ½"
Rango de entrada de aire	3 – 15 psi
Material del cuerpo	Br
Presión máxima del cuerpo	250 psi
Serie	2000 VA 32220 – 9295A

TABLA 4 CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA TAYLOR FCV2

# **CAPITULO 2**

## **2. CALIBRACIÓN DE SENSORES, TRANSDUCTORES Y VÁLVULAS DE CONTROL.**

### **Generalidades**

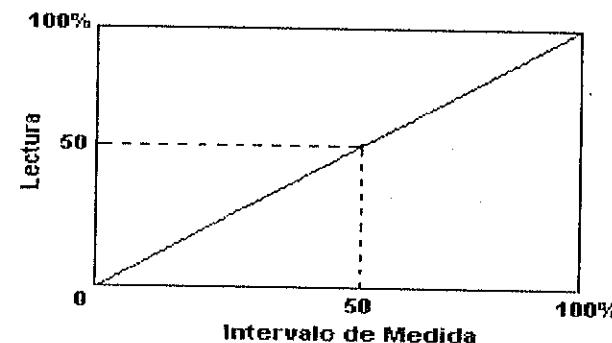
Hemos comprobado que los instrumentos industriales pueden medir, transmitir y controlar las variables que intervienen en un proceso. La ejecución de estas funciones existe una relación entre la variable de entrada y la de salida del instrumento. Por ejemplo; De nivel real de agua dentro del tanque principal a una señal de corriente a la salida del transmisor (4 - 20mA D.C); señal electrónica (4 - 20mA D.C) de entrada a señal neumática de salida (3 -15 psi) en un convertidor I/P (intensidad a presión); señal de entrada neumática a posición del vástago del obturador en una válvula de control, etc.

Existirá una correspondencia entre la variable de entrada y de salida, representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda exactamente al de la variable de entrada, el instrumento estará efectuando una medición correcta. El error de la medida es universal e inevitable y acompaña a toda medida aunque éste sea muy elaborada, o aunque se efectúe un gran número de veces. Es decir, el valor verdadero no puede establecerse con completa exactitud y es necesario encontrar unos límites que lo definan, de modo que sea práctico calcular la tolerancia de la medida.

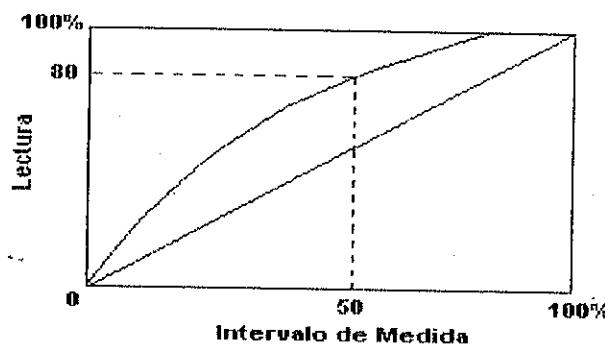
### **Errores de los instrumentos**

Un instrumento es considerado bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicador registrado o transmitido, está comprendida entre los límites determinados por la precisión del instrumento.

En instrumentos ideales (sin errores), la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida, y los valores de lectura del aparato se presentan en una manera lineal. La Figura 2.1 muestra esa relación.



a) instrumento ideal



b) instrumento real

FIGURA 2.1. RELACIÓN MEDIDA IDEAL Y REAL – LECTURA

Cuando un instrumento reacciona a un incremento en su entrada con un incremento en su salida se los conoce como de acción directa.

En condiciones estáticas, de funcionamiento, las desviaciones respecto de la relación lineal indicada, dan lugar a los errores de calibración de los instrumentos, si es que dichas desviaciones no superan la precisión dada por el fabricante del instrumento consideraríamos al mismo como calibrado, aunque no coincida con la curva variable lectura con la recta ideal. Esta

curva puede descomponerse en tres tipos de errores en forma aislada o combinada en los instrumentos.

### Error de cero

Todas las lecturas se encuentran desplazadas un mismo valor con respecto a la recta ideal representativa del instrumento. Este tipo de error se puede observar en el gráfico de la Figura 2.2, donde el desplazamiento puede ser positivo o negativo. El punto de partida o de base de la recta representativa cambia sin que varíe la inclinación o la forma de la curva. (La curva representativa ideal y la curva real actual del instrumento tienen pendientes similares).

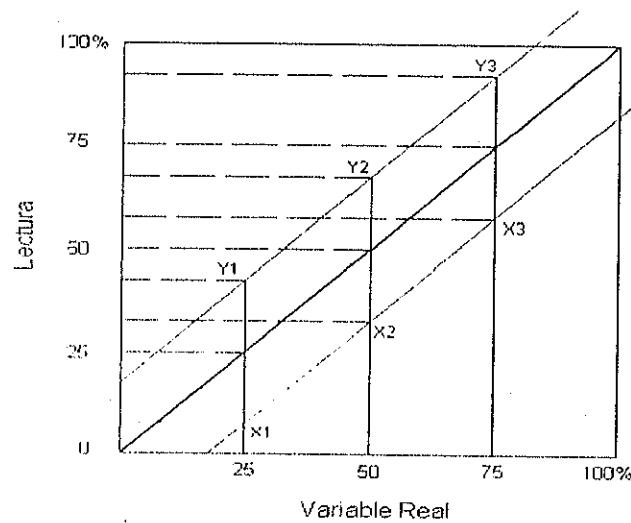


FIGURA 2.2. ERROR DE CERO

## Error de multiplicación

El aumento o disminución progresiva de las lecturas con relación a la recta representativa; de acuerdo a lo que se ve en la Figura 2.3, la que nos muestra que el punto base o de partida no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva o negativa.

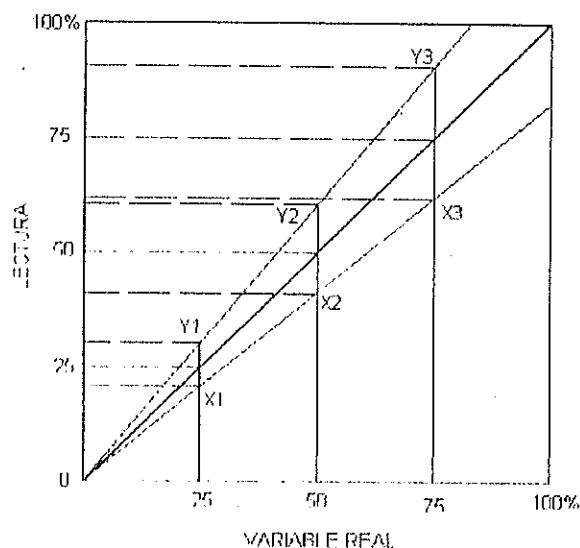


FIGURA 2.3. ERROR DE MULTIPLICACION

## Error de angularidad

La curva real coincide en los puntos 0 y 100% de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. La curva toma la forma de un arco de flecha. En la Figura 2.4, puede verse un error de estas características. La máxima desviación se suele encontrar en la mitad de la

escala. Para calibrar un instrumento es importante, primeramente, eliminar o reducir al mínimo el error de angularidad. Se debe principalmente, a la transmisión, por palancas de movimiento del elemento primario o de la variable medida.

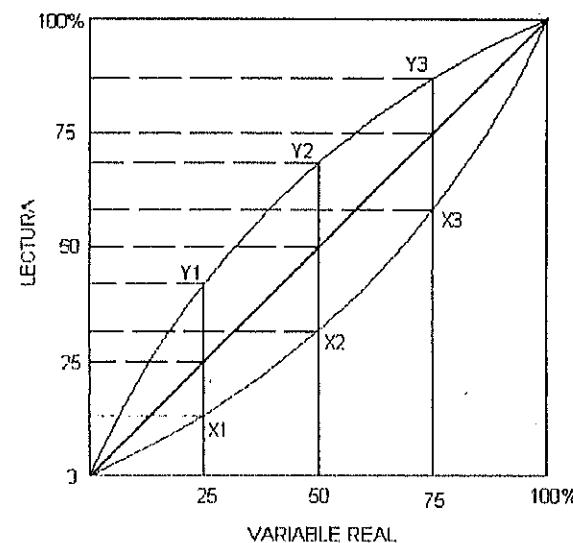


FIGURA 2.4. ERROR DE ANGULARIDAD

### Procedimiento general de calibración

La Figura 2.5, resume lo que a continuación describimos:

1. Situar la variable en el valor mínimo del campo de medida, y en este valor ajustar el tomillo de cero del instrumento hasta que el cero de la escala (Fig. 2.5 b.).

2. Colocar la variable en el valor máximo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de multiplicación (span) hasta que el indique el valor máximo de la variable (Fig.2.5 c.).

En los pasos anteriores no es necesario ajustar con prolijidad los tornillos de cero y de multiplicación ya que aquello se realizará en los pasos finales que, como se observará, son una repetición de los dos primeros; el cuidado en el ajuste será posible en los pasos finales para obtener la precisión máxima posible en la calibración.

3. Repetir los pasos numerados con 1. , y 2. , sucesivamente hasta que las lecturas sean correctas en los valores mínimo y máximo (Fig. 2.5.d y 2.5.e).

4. Situar la variable en el 50% del intervalo de medida y en este punto ajustar el tomillo de angularidad hasta mover el índice una distancia igual a cinco veces el valor del error en la dirección del mismo (la curva real se aplana). Comprobar la angularidad en los valores 25% y 75% de la escala.

5. Reajustar sucesivamente los tornillos de cero y de multiplicación hasta de conseguir la exactitud deseada o requerida (Figs. 2.5 g, 2.5 h y 2.5 i). Si fuera necesario efectuar una nueva corrección de angularidad.



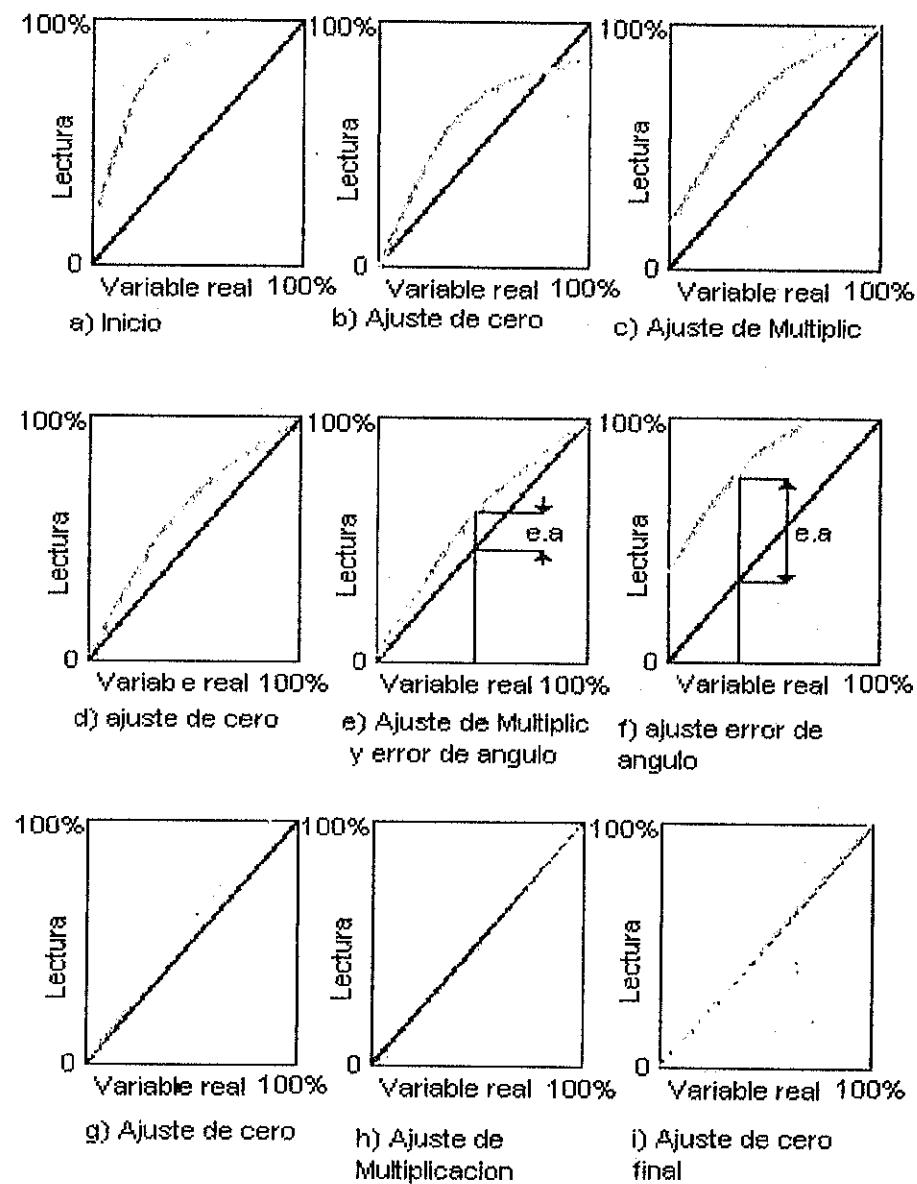


FIGURA 2.5. METODO GENERAL DE CALIBRACION

## 2.1. Calibración del sensor de nivel

La planta de procesos cuenta con un sensor transductor eléctrico de presión de diafragma de la marca Taylor Instrument con número de serie 453TB01020A0000-911, este sensor es para una columna máxima de 100 pulgadas de agua aproximadamente 2.5 m de agua en el tanque principal, este sensor va acorde con las dimensiones del tanque principal, 2 m de alto, lo que nos permite tener una buena resolución en las lecturas del sensor de nivel del tanque principal.

El ajuste de los valores de calibración se logran mediante los tornillos de calibración para el valor de Z o cero y el ajuste del Span. Estos tornillos de calibración se encuentran en el frente del cuerpo del transmisor eléctrico del sensor de nivel.

A continuación se presentará la práctica de calibración para este sensor transmisor, esta se realizó por facilidad directamente en el campo, es decir no se extrajo el sensor de su lugar de trabajo, todas las lecturas de

las mediciones para su calibración fueron tomadas directamente del nivel del tanque principal de procesos.

## **Prueba de calibración del sensor transmisor de nivel**

### **1. Objetivo**

Calibrar el sensor de nivel de modo que su respuesta sea lo más lineal posible y determinar la curva de nivel vs. miliamperios DC, para la conversión dentro del programa de control, de los miliamperios del sensor , en una presentación en pantalla del nivel de agua dentro del tanque.

### **2. Teoría**

El medidor de presión consiste en un diafragma de acero inoxidable en contacto con el líquido del tanque, en un tanque abierto a la atmósfera esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto. Al aplicársele presión el diafragma se deforma proporcionalmente a la presión que se le aplique, esta deformación es utilizada por un transductor eléctrico para convertir la deformación

del diafragma en una variación de corriente eléctrica proporcional a la deformación.

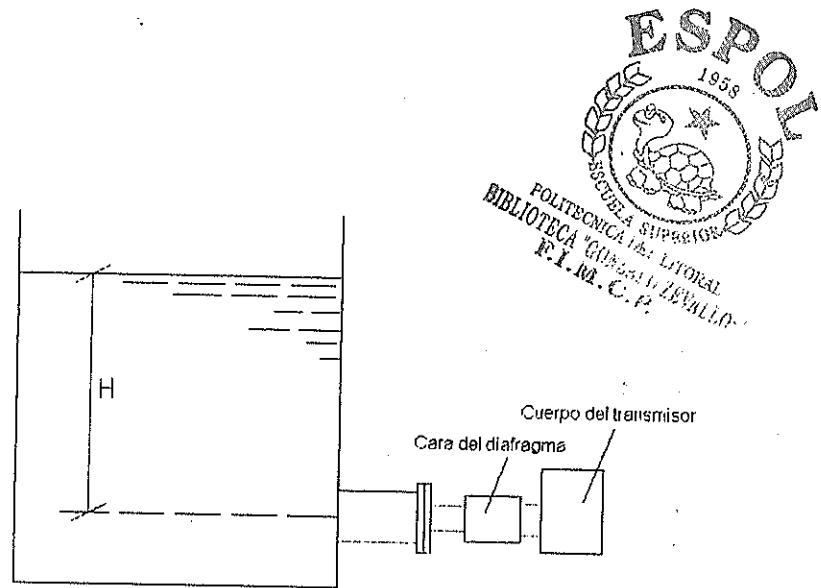


FIGURA 2.6. MEDIDOR DE PRESIÓN DE DIAFRAGMA.

### 3. Equipos

- a) Un sensor transmisor de nivel, instalado en el tanque principal del módulo de nivel, con las siguientes características:

Marca	: Taylor
Modelo	: S/N 453TB01020A0000-911
Rango de entrada	: 0 - 100 IN H <sub>2</sub> O
Rango de salida	: 4 -20 mA DC

Voltaje de suministro

: 24 VDC

- b) La interfase Field Point instalada y operando en el módulo de control de nivel.
- c) Una computadora con el programa Field Point Explorer instalado y corriendo.

#### **4. Procedimiento**

- 1.- Encender el módulo de control de nivel desde los breakers principales.
- 2.- Encender el compresor de aire para el sistema neumático.
- 3.- Arrancar el programa Field Point Explorer desde la computadora de control.
- 4.- Encender la bomba principal, cerciorarse que la válvula HV1 se encuentre abierta completamente y que la válvula HV15 se encuentre cerrada para no perder nivel en el tanque de procesos.



5.- Mediante el programa Field Point Explorer, en el archivo pruebanivel-caudal.IAK, entrando al módulo de salidas de corriente FP-AO-200, en el canal 0, se envía una señal de 20 mA a la válvula de control FCV2 para mantenerla completamente abierta durante la práctica, y una señal de 20 mA en el canal 1 de la válvula de control FCV1 para mantenerla cerrada durante la práctica.

6.- Mediante el programa Field Point Explorer, en el archivo pruebanivel-caudal.IAK, entrando al módulo de entradas de corriente FF-AI-111, se puede monitorear los milí amperios que envía el sensor de nivel a través del canal 15.

7.- Se permite el paso de agua al tanque principal y se controla encendiendo y apagando la bomba principal desde el panel de control, con una escala graduada en centímetros se compara el nivel y se toman datos cada 10 cm. Desde 0 cm. hasta 220 cm. de los valores en milí amperios que devuelve el sensor transmisor.

8.- Crear una tabla con estos valores para analizarlos posteriormente mediante programas como Excel y determinar la mejor línea tendencia que agrupen estos valores.

9.- Si la línea que agrupa estos valores no se ajusta a una línea recta se recalibra el sensor como se explicó en el procedimiento general de calibración.

### Tablas de datos

PRIMERA APROXIMACIÓN PARA TRES PUNTOS		
NIVEL REAL (m)	SALIDA DE CORRIENTE DEL TRANSMISOR TEÓRICA (A)	SALIDA DE CORRIENTE DEL TRANSMISOR A CALIBRAR (A)
2,2	0,02	0,018
1,1	0,012	0,013
0	0,004	0,005

TABLA 5 PRIMERA APROXIMACIÓN DE LA CALIBRACIÓN

CALIBRACIÓN PARA TRES PUNTOS		
NIVEL REAL (m)	SALIDA DE CORRIENTE DEL TRANSMISOR TEÓRICA (A)	SALIDA DE CORRIENTE DEL TRANSMISOR A CALIBRAR (A)
2,2	0,02	0,0206
1,1	0,012	0,0126
0	0,004	0,00398

TABLA 6 APROXIMACIÓN DE LA CALIBRACIÓN

Después de efectuar correcciones en la curva de calibración a través de los tornillos de ajuste de cero y ajuste de multiplicación (span) se linealizará la curva y se muestrean datos con intervalos de 10 cm. en el nivel del tanque, para obtener más puntos para una mejor línea tendencia.

DATOS PARA LA ECUACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN	
NIVEL REAL (m)	SALIDA DE CORRIENTE DEL TRANSMISOR A CALIBRAR (A)
2,2000	0,02006
2,1000	0,019275
2,0000	0,018605
1,9000	0,017843
1,8000	0,017134
1,7000	0,01639
1,6000	0,015648
1,5000	0,014924
1,4000	0,014189
1,3000	0,013459
1,2000	0,01269
1,1000	0,012004
1,0000	0,011298
0,9000	0,010542
0,8000	0,00983
0,7000	0,00908
0,6000	0,008319
0,5000	0,007606
0,4000	0,006871
0,3000	0,006114
0,2000	0,005393
0,1000	0,004615
0,0000	0,00398



TABLA 7 CURVA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE NIVEL

## 5. Análisis de resultados

Mediante el programa Excel se analiza esta dispersión de datos y se extrae una línea tendencia y se comprueba la linealidad de los datos, finalmente se presenta la ecuación de ésta línea tendencia que se utilizará para el programa de control, para transformar corriente en mA, en nivel en metros a continuación se muestra la gráfica de los datos.

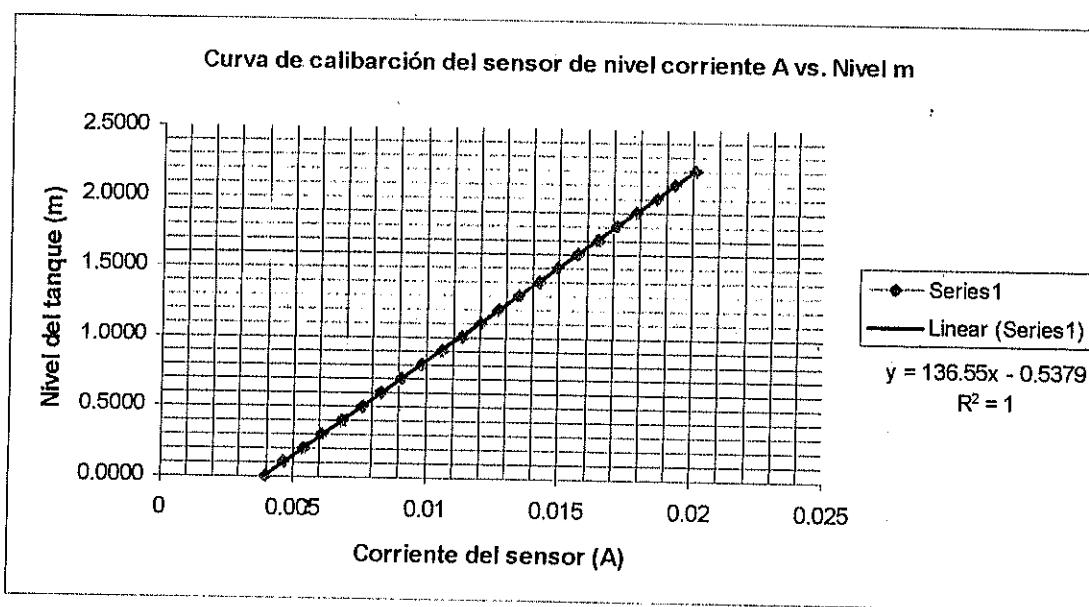


FIGURA 2.7. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE NIVEL.

La ecuación que representa la dispersión de datos es la recta:

$$Y = 136.55 X - 0.537 \quad (2-1)$$

Esta recta nos permite pasar de amperios de corriente análoga a niveles de agua dentro del tanque, debido a que al programa ingresan datos en corriente análoga en mA, enviados por el sensor y se deberá transformarlos en niveles de agua y representarlos en pantalla. Para determinar un error promedio en la calibración del sensor de nivel se compara los resultados reales contra los teóricos calculados a partir de la ecuación 2-1

CÁLCULO DEL ERROR PROMEDIO DEL INSTRUMENTO			
Corriente real del sensor (A)	Nivel real (m)	Nivel teórico (m)	Diferencia absoluta Real - Teórico
0.02006	2.2000	2.201293	0.001293
0.019275	2.1000	2.09410125	0.005899
0.018605	2.0000	2.00261275	0.002613
0.017843	1.9000	1.89856165	0.001438
0.017134	1.8000	1.8017477	0.001748
0.01639	1.7000	1.7001545	0.000155
0.015648	1.6000	1.5988344	0.001166
0.014924	1.5000	1.4999722	0.000028
0.014189	1.4000	1.39960795	0.000392
0.013459	1.3000	1.29992645	0.000074
0.01269	1.2000	1.1949195	0.005080
0.012004	1.1000	1.1012462	0.001246
0.011298	1.0000	1.0048419	0.004842
0.010542	0.9000	0.9016101	0.001610
0.00983	0.8000	0.8043865	0.004387
0.00908	0.7000	0.701974	0.001974
0.008319	0.6000	0.59805945	0.001941
0.007606	0.5000	0.5006993	0.000699
0.006871	0.4000	0.40033505	0.000335
0.006114	0.3000	0.2969667	0.003033
0.005393	0.2000	0.19851415	0.001486
0.004615	0.1000	0.09227825	0.007722
0.00398	0.0000	0.005569	0.005569
Sumatoria			0.054728
Promedio			0.002488

TABLA 8 CÁLCULO DEL ERROR PROMEDIO DEL INSTRUMENTO

Para el cálculo del error promedio utilizamos la sumatoria de las diferencia absolutas entre los valores teóricos y reales, dividida para el número total de muestras, y para convertirlo en relativo se multiplica para 100%.

Error promedio del instrumento:  $0.002488 \times 100\% = 0.2488\%$

Este error promedio lo representa es que cada lectura del instrumento se encuentra en un rango de  $\pm 0.2488\%$  en promedio.



## 2.2. Calibración del sensor de caudal

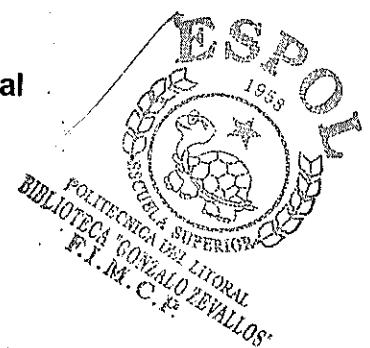
La planta de procesos cuenta con un sensor transductor eléctrico de presión diferencial de diafragma de la marca Taylor Instrument con número de serie 405TB0121090100-1004, este sensor fue diseñado para una presión máxima de 2500 psig, en la línea, el sensor va acorde con las requerimientos del sistema, con un caudal estimado máximo de  $6.40E-4 \text{ m}^3/\text{s}$  o 38.4 litros/min. Para la potencia de la bomba principal, la pérdida por tubería y la reducción en la placa orificio el máximo caudal que se puede alcanzar en el lazo de control de caudal es de  $5.4E-4 \text{ m}^3/\text{s}$  o aproximadamente 32 litros/min, es decir que el sistema casi alcanza las condiciones para el aprovechamiento de toda la escala del sensor, esto nos permite tener una buena resolución en las lecturas del sensor de caudal.

El ajuste de los valores de calibración se logran mediante los tornillos de calibración para el valor de Z o cero y el ajuste del Span. Estos tornillos de calibración se encuentran en el frente del cuerpo del transmisor eléctrico del sensor de caudal.

A continuación se presentará la práctica de calibración para este sensor transmisor, esta práctica se realizó por facilidad directamente en el

campo es decir no se extrajo el sensor de su lugar de trabajo, todas las lecturas de las mediciones para su calibración fueron tomadas directamente del cálculo del caudal de ingreso al tanque principal de procesos.

## Prueba de calibración del sensor transmisor de caudal



### 1. Objetivo

Calibrar el sensor de caudal de modo que su respuesta corresponda a una curva de tipo cuadrática y determinar la curva tendencia de caudal vs. miliamperios DC, para la conversión dentro del programa de control, de los miliamperios del sensor, en una presentación en pantalla del caudal de agua que ingresa al tanque.

### 2. Teoría

El módulo de control de caudal de la planta de procesos cuenta con un sensor transductor de presión diferencial de diafragma, este tiene dos diafragmas en dos cámaras separadas, estas se encuentran conectadas directamente a las tomas de presión antes y después de una placa orificio, colocada en la tubería, lo que le permite sensar

cada una de las dos presiones originadas por la restricción de la placa orificio.

El diferencial de presión se corresponde directamente con la variación de corriente en m A que el transmisor del sensor emite.

Al aplicar ecuación de Bernoulli en la ecuación de la continuidad en la placa orificio se puede relacionar el caudal con el diferencial de presión.

$$m = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (2-2)$$

Donde  $V$  es la velocidad. Si el flujo es adiabático y sin fricción y el fluido es incompresible, podemos escribir la ecuación de Bernoulli

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2gc} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2gc} \quad (2-3)$$

En este caso  $\rho_1 = \rho_2$ . Haciendo simultáneas ecuaciones 2-2 y 2-3 tenemos que para la caída de presión por la placa:

$$p_1 - p_2 = \frac{V_2^2}{2gc} \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (2-4)$$

Y el gasto volumétrico podemos escribirlo como :

$$Q = A_2 V_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2gc}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (2-5)$$

$$Q = A_2 cd \sqrt{\frac{2gc}{\rho(1-\beta^4)} (p_1 - p_2)} \quad (2-6)$$

donde  $\beta$  es la relación de diámetros de la placa orificio y la tubería  $cd$  es el coeficiente de velocidad. El diferencial de presión es proporcional a la corriente entregada por el sensor de donde la ecuación que se podría esperar que generen los datos, estaría representada con el siguiente modelo matemático.

$$Q = A_2 cd \sqrt{\frac{2gc}{\rho(1-\beta^4)} (Km\lambda)} \quad (2-7)$$

La parte transductora del sensor opera igual que el sensor de nivel es decir al aplicársele presión el diafragma se deforma proporcionalmente a la presión que se le aplique, esta deformación es utilizada por un transductor eléctrico para convertir la deformación del diafragma en una variación de corriente eléctrica proporcional a la deformación.

Finalmente se utiliza variación de corriente para determinar el caudal real que es proporcional a la raíz cuadrada de la variación de corriente.



### 3. Equipos

- a. Un sensor transmisor de caudal, instalado en la turbaría de ingreso al tanque principal del módulo de control caudal, con las siguientes características:

Marca	: Taylor
Modelo	: S/N 405TB0121090100-1004
Rango de entrada	: 0 – 6.4E-3 m <sup>3</sup> /s H <sub>2</sub> O
Rango de salida	: 4 -20 mA DC
Voltaje de suministro	: 24 VDC

- b. La interfase Field Point instalada y operando en el módulo de control de caudal.
- c. Una computadora con el programa Field Point Explorer instalado y corriendo.

#### 4. Procedimiento

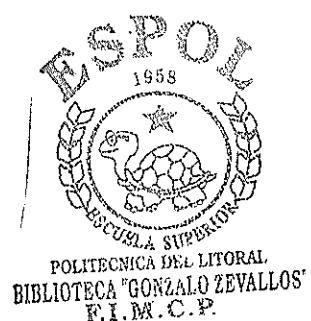
- 1.- Encender el módulo de control de nivel desde los breakers principales.
- 2.- Encender el compresor de aire para el sistema neumático.
- 3.- Arrancar el programa Field Point Explorer desde la computadora de control.
- 4.- Encender la bomba principal, cerciorarse que la válvula HV1 se encuentre abierta completamente y que la válvula HV15 se encuentre cerrada para no perder nivel en el tanque de procesos.
- 5.- Mediante el programa Field Point Explorer, en el archivo pruebanivel-caudal.IAK, entrando al módulo de salidas de corriente FP-AO-200, en el canal 1, se envía una señal de 20 mA a la válvula de control FCV1 para mantenerla completamente cerrada durante la práctica.
- 6.- Mediante el programa Field Point Explorer, en el archivo pruebanivel-caudal.IAK, entrando al módulo de entradas de corriente

FP-AI-111, se puede monitorear los mili amperios que envía el sensor de caudal a través del canal 1.

7.- Se permite el paso de agua al tanque principal y se lo controla, mediante la válvula de control FCV2, a la cual se le varía su apertura enviándole señales desde la computadora, al variar su apertura se varía caudal a través del sensor , con la precisión que nos permite el sistema se puede variar el caudal hasta encontrar valores enteros en miliamperios enviados por el sensor análogos al caudal.

8.- El tanque es dividido en alturas constantes cada en este caso 42 cm. Y tomando en cuenta su diámetro interno promedio 31cm., se puede calcular volúmenes iguales para cada muestra, y tomando el tiempo en que se tarda en llenar dicho volumen, podemos calcular el caudal con precisión para cada señal de corriente enviada del sensor.

8.- Crear una tabla con estos valores para analizarlos posteriormente y mediante programas como Excel determinar la mejor línea tendencia que agrupe estos valores.



9.- Si la línea que agrupa estos valores no se ajusta a una cuadrática se recalibra el sensor como se explico en el procedimiento general de calibración.

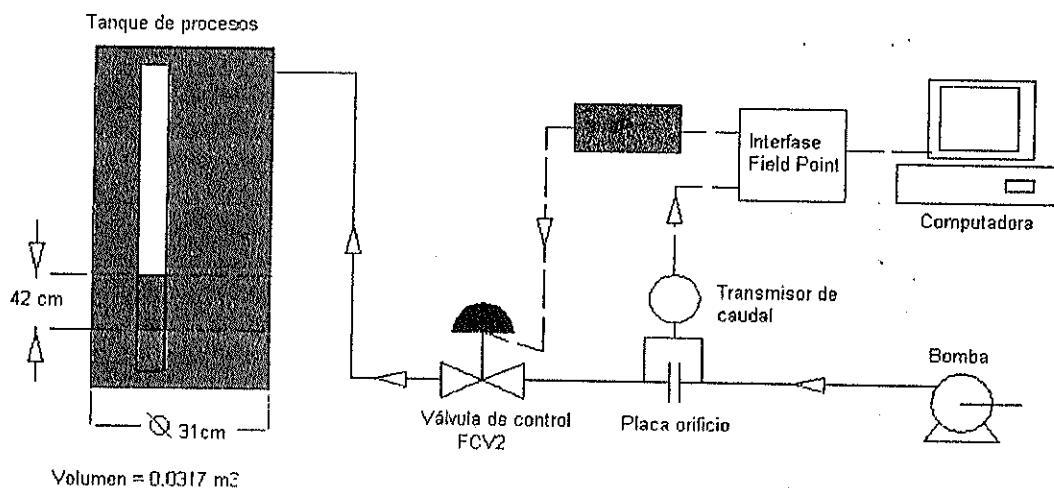


FIGURA 2.8. ESQUEMA DE LA PRACTICA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE CAUDAL

#### Tabla de datos

Para la práctica de calibración se tomaron seis puntos para efectuar las pruebas, los principales se tomaron a cero caudal y a pleno caudal.

DATOS PARA CALIBRACION DEL SENSOR DE CAUDAL			
Corriente del sensor (mA)	Tiempo de llenado (seg.)	Caudal de ingreso (m3/s)	% Apertura de válvula (%)
3.95	0	0	0%
5	198	0.000160098	34%
8	97	0.000326799	55%
11	74	0.000428371	76%
13	66	0.000480295	89%
14.55	61	0.000519663	100%

TABLA 9 DATOS PARA CALIBRACION DEL SENSOR DE CAUDAL

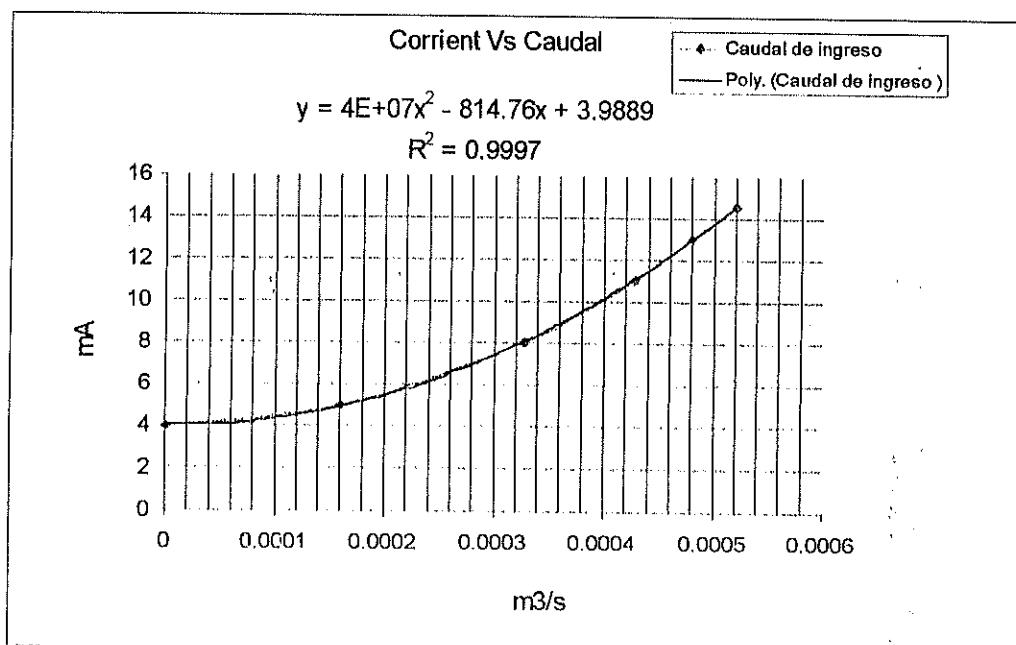


FIGURA 2.9. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA SENSOR DE CAUDAL

En la Figura 2.9 se muestra la curva de calibración, y se puede apreciar que corresponde a una cuadrática, mediante el uso del programa Excel se procede a extraer la línea tendencia de la dispersión de puntos de la gráfica. Se aproxima los valores a un polinomio de grado dos y se muestra la ecuación.

$$Y = 40000000X^2 - 814.76X + 3.9889 \quad (2-8)$$

Esta ecuación nos permite pasar de caudales en  $m^3/s$  a mA de corriente del sensor, pero para el programa de control se requiere todo lo contrario, cambiar las señales del que llegan del sensor en mA a caudales para presentarlos en pantalla. Por esta razón se hace uso la formula de la solución de la ecuación cuadrática:

$$0 = ax^2 + bx + c$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

De la ecuación 2-8 despejando  $y$  se iguala la ecuación a cero y se puede utilizar la solución de la ecuación cuadrática.

$$0 = 40000000X^2 - 814.76X + (3.9889 - y) \quad (2-9)$$

Para este caso solo usaremos las raíces positivas de la ecuación para determinar la curva de corriente en mA a Caudal  $m^3/s$

$$y = \frac{814.76 + \sqrt{814.76^2 - (4 * 4000000(3.9889 - x))}}{2 * 4000000} \quad (2-10)$$

En la ecuación 2-10 se ingresan los valores de las señales del sensor de caudal en mA y se obtienen los valores análogos de caudal en  $m^3/s$ . Mediante el uso de esta ecuación en el programa se podrán presentar en pantalla y monitorear el caudal de ingreso al tanque principal. Como se esperaba su forma es de una raíz cuadrada pero su aproximación contiene un sumando que no aparecía en el modelo matemático.

## 5. Análisis de resultados

La siguiente tabla muestra la comparación entre estos valores teóricos y los reales. Para el cálculo del error promedio utilizamos la sumatoria de las diferencia absolutas entre los valores teóricos y reales, dividida para el número total de muestras, y para convertirlo en relativo se multiplica para 100%.



CÁLCULO DEL ERROR PROMEDIO DEL INSTRUMENTO				
Corriente del sensor (mA)	Caudal Real (m3/s)	Corriente Teórica Ecu 2-2 (mA)	Caudal Teórico Ecu 2-4 (m3/s)	Diferencia absoluta Caudal Real-Teorico
3.95	0	3.99	2.16398E-05	2.16398E-05
5	3.000160098	4.884817166	0.00016019	9.16913E-08
8	3.000326799	7.995631354	0.000326842	4.34253E-08
11	3.000428371	10.98105496	0.000428404	3.28788E-08
13	3.000480295	12.82600473	0.000480324	2.92475E-08
14.55	3.000519663	14.36860089	0.00051969	2.69876E-08
				Sumatoria 2.1864E-05
				Promedio 3.64401E-06

TABLA 10 CÁLCULO DEL ERROR PROMEDIO DEL INSTRUMENTO

$$3.64401\text{E-}06 \times 100\% = 3.64401\text{E-}4\%$$

Este error promedio lo representa es que cada lectura del instrumento se encuentra en un rango de  $\pm 3.64401\text{E-}4\%$  en promedio.

### 2.3. Calibración de los transductores de corriente a presión (I/P)

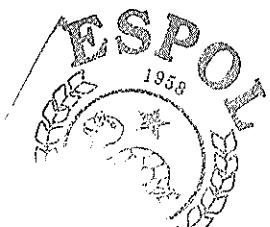
El propósito principal de esta práctica es calibrar los transductores de corriente a presión I/P , que son los encargados de traducir el control de la computadora a los elementos finales de control, las válvulas de control de flujo, un convertidor descalibrado podría inducir un error en la operación de las válvulas de control.

#### 1. Objetivos

- a) Observar y conocer el funcionamiento de los transductores convertidor de señal de entrada de corriente directa a salida de presión de aire, de la marca Taylor.
- b) Determinar la curva de calibración y determinar el error del instrumento.

#### 2. Teoría

Transductores de Corriente a Presión I/P: este dispositivo se encarga de convertir la señal de control de la computadora de 4 a 20 mA a una señal neumática de 3 a 15 psi, con la cual se actúa la válvula de control. Básicamente este transductor al variarle la corriente de



entrada se induce un campo magnético que provoca el desplazamiento proporcional de la bobina que se encuentra suspendida en el extremo de un balancín, el otro extremo, se encuentra una placa que regula la salida de aire a través de una tobera, variando la salida de aire de 3 a 15 psi, la salida es directamente proporcional a la variación de corriente en la entrada.

### 3. Equipos

a) Dos convertidores de señal de entrada de corriente a señal de salida de presión de aire, I/P1 e I/P2 con las siguientes características:

Marca : Taylor.

Acción : proporcionalmente directa.

Rango : 4 - 20 m A — 3 -15 psi

Suministro neumático de potencia: 22 psi

b) 1 Regulador de presión para el suministro de aire hacia el convertidor de corriente directa a presión de aire, con las siguientes características:

Marca : Taylor

Entrada máxima : 21 Kg/ cm<sup>2</sup> (299 psi)

Rango máximo de Salida O - 30 psi

c) 1 Manómetro para constatar la presión de suministro de aire suministro de potencia neumática). La selección de este último no es muy rigurosa respecto a su resolución y precisión pero si se requiere que esté dentro del rango de 0 -30 psi.

d) 1 Manómetro para obtener la indicación a la salida del convertidor de corriente directa a presión de aire.

Sugerencia: De entre los manómetros disponibles, seleccionamos el de mayor resolución.

Marca : Ashcroft (Duragauge) hecho en U.S.A.

Acción : Directa

Resolución : 0.1 psi subd.

Rango : 0 - 30 psi.

e) 1 Fuente de poder de 110VAC a 24 VDC para simular la entrada de corriente al convertidor.

f) 1 Potenciómetro de 10 KΩ conectado en serie con la fuente de poder para regular la entrada de corriente al convertidor y mantenerla entre 4-20 mA

g) 1 Multímetro digital para obtener la señal de entrada de corriente directa desde los el potenciómetro a los convertidores de corriente directa a presión de aire.

Nota: Se utilizará un multímetro de resolución, hasta 0.01 mA.

h) Cable para conexión electrónica de 4 - 20 mA DC., cable para conexión eléctrica de suministros de potencia 117V,50Hz(AC).

i) Cañerías de cobre de diámetro  $\frac{1}{4}$  "O.D., ó mangueras equivalentes con sus respectivos accesorios: conectores "T", válvulas, reducciones, tuercas, sellos, para las respectivas conexiones neumáticas.

j) 1 Juego de destornilladores plano y de estrella para mantenimiento y calibración.

k) Material de limpieza que incluye el spray de limpieza para equipos electrónicos.

#### **4. Procedimiento**

Antes de realizar las pruebas de calibración, se puede desmontar las piezas del instrumento y realizar una limpieza prolífica a cada una de

ellas y colocarlas con cuidado tal como se encontraban al empezar el desmontaje. O simplemente limpiar los mecanismos y conexiones con el spray de equipo electrónico.

La instalación para prueba de ajuste y calibración se la puede realizar como muestran la 2.10.

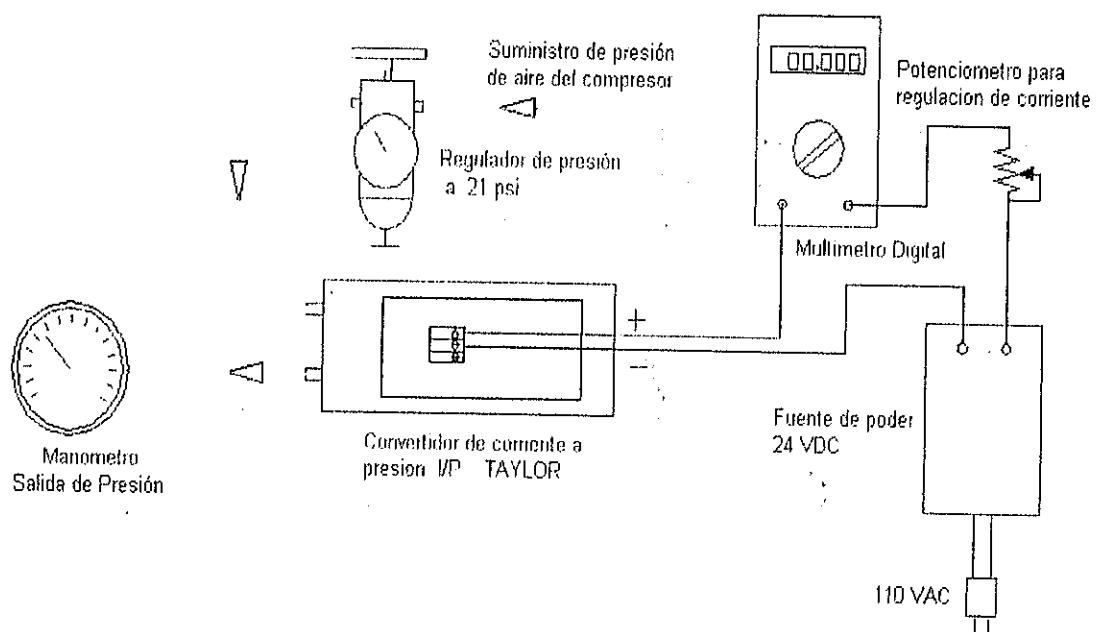


FIGURA 2.10. ESQUEMA DE CONEXIONES DEL CONVERTIDOR I/P

- Conectar todos los equipos según la disposición de la figura 2.10 y encender el compresor, manteniendo el regulador de presión en su presión más baja para evitar que alta presión entre al convertidor I/P.

- b) Ajustar al regulador de presión a 22 psi, para el suministro del convertidor I/P, girando la perilla del regulador y verificando la presión en el manómetro del regulador.
- c) Encender el voltímetro digital y ajustarlo para medir corriente en mA con una resolución de 0.01mA.
- d) Ajustar el potenciómetro de modo que no permita el paso de corriente para que cuando se encienda el la fuente de poder no sobrecargar al convertidor I/P con una sobre corriente.
- f) Encender la fuente de poder de 24 VDC y verificar la lectura en el multímetro digital deberá de indicar 0 mA.
- g) Ajustar el potenciómetro de modo que se consigan un rango de 4 a 20 mA y verificar que la salida de presión del convertidor I/P, cause alguna reacción en el manómetro.
- h) Form una tabla, variando la corriente cada 0.5 mA en el rango de 4-20 mA contra las presiones de salida del convertidor que deberían variar de 3 a 15 psi respectivamente.

- g) Una vez tabulados los valores de entrada y salida, graficarlos.
- h) De existir alguna descalibración en el convertidor se puede ajustar la curva mediante los tornillos de ajuste de cero y span que se encuentran dentro del convertidor I/P, mediante el proceso general de calibración de la Figura 2.5

#### Tabla de datos

A continuación se presentan los datos para la calibración de los dos convertidores I/P, que operan las válvulas de control del módulo de nivel y caudal FCV1 y FCV2, el Transducer Serie 1400TK12113-10117A y el Transducer Serie 1400TK12113-10115A respectivamente el proceso de calibración es idéntico para ambos convertidores.

La tabla de datos se forma con las variaciones de la corriente de entrada, simulada por el potenciómetro y monitoreada desde el voltímetro digital, se tomaron valores de la presión de salida cada 0.5 incrementos de la corriente de entrada. Primero se deben calibrar los extremos de la curva, es decir que para 4 mA se muestren 3psi en la salida de presión y para 20 mA se muestren 15 psi en la salida de presión luego lanzamos los valores medios.



Corriente (mA)	Presión	
	Ideal(psi)	Dada (psi)
4	3	3.1
4.5	3.375	3.5
5	3.75	4
5.5	4.125	4.3
6	4.5	4.8
6.5	4.875	5
7	5.25	5.2
7.5	5.625	5.8
8	6	6
8.5	6.375	6.5
9	6.75	6.9
9.5	7.125	7.2
10	7.5	7.5
10.5	7.875	7.9
11	8.25	8.2
11.5	8.625	8.8
12	9	9
12.5	9.375	9.5
13	9.75	9.9
13.5	10.125	10.1
14	10.5	10.5
14.5	10.875	10.9
15	11.25	11.1
15.5	11.625	11.5
16	12	11.9
16.5	12.375	12.3
17	12.75	12.7
17.5	13.125	13
18	13.5	13.3
18.5	13.875	13.8
19	14.25	14.1
19.5	14.625	14.5
20	15	14.9

TABLA 11 DATOS PARA LA CURVA DE CALIBRACION I/P  
TRANSDUCER SERIE 1400TK12113-10117A

Corriente (mA)	Presión	
	Ideal(psi)	Dada (psi)
4	3	3.1
4.5	3.375	3.5
5	3.75	3.9
5.5	4.125	4.2
6	4.5	4.7
6.5	4.875	5
7	5.25	5.2
7.5	5.625	5.8
8	6	6
8.5	6.375	6.5
9	6.75	6.9
9.5	7.125	7
10	7.5	7.5
10.5	7.875	7.9
11	8.25	8.2
11.5	8.625	8.6
12	9	9
12.5	9.375	9.4
13	9.75	9.8
13.5	10.125	10.1
14	10.5	10.5
14.5	10.875	10.9
15	11.25	11.15
15.5	11.625	11.5
16	12	11.9
16.5	12.375	12.3
17	12.75	12.7
17.5	13.125	13.05
18	13.5	13.3
18.5	13.875	13.8
19	14.25	14.05
19.5	14.625	14.5
20	15	14.9

TABLA 12 DATOS PARA LA CURVA DE CALIBRACION I/P  
TRANSDUCER SERIE 1400TK12113-10115A

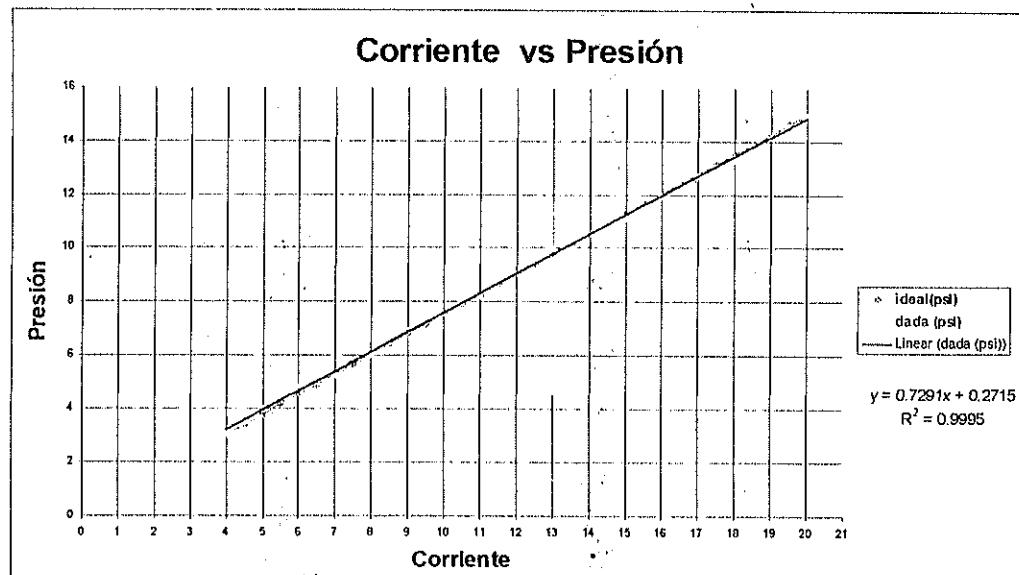


FIGURA 2.11. CURVA DE CALIBRACIÓN I/P TRANSDUCER SERIE  
1400TK12113-10117A

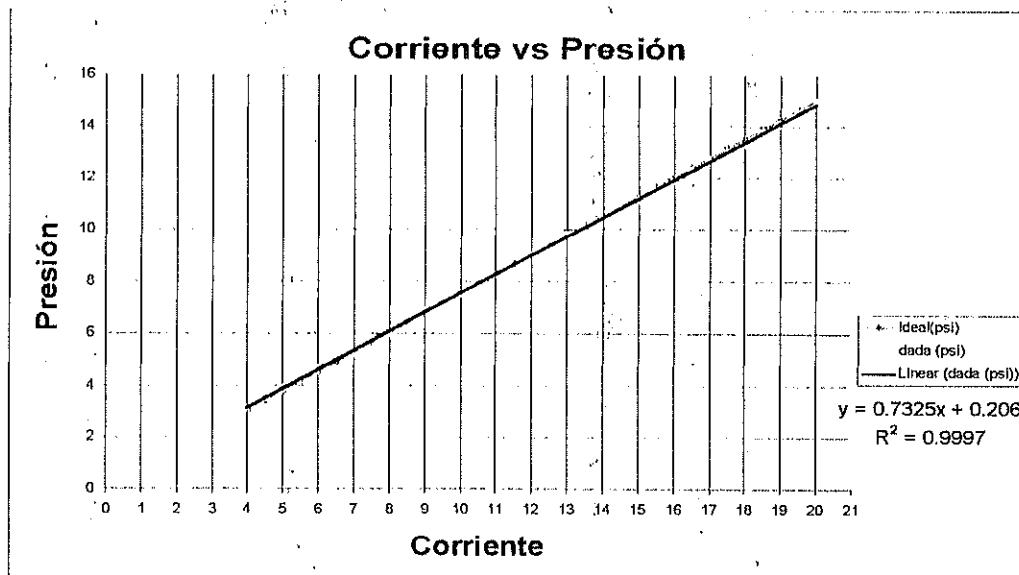


FIGURA 2.12. CURVA DE CALIBRACION I/P TRANSDUCER SERIE  
1400TK12113-10115A



## 5. Análisis de resultados

La siguiente tabla muestra la comparación entre estos valores teóricos y los reales. Para el cálculo del error promedio utilizamos la sumatoria de las diferencia absolutas entre los valores teóricos y reales, dividida para el número total de muestras, y para convertirlo en relativo se multiplica para 100%.

Corriente (mA)	Presión		Diferencia ABS (psi)
	Ideal(psi)	Dada (psi)	
4	3	3.1	0.1
4.5	3.375	3.5	0.125
5	3.75	4	0.25
5.5	4.125	4.3	0.175
6	4.5	4.8	0.3
6.5	4.875	5	0.125
7	5.25	5.2	0.05
7.5	5.625	5.8	0.175
8	6	6	0
8.5	6.375	6.5	0.125
9	6.75	6.9	0.15
9.5	7.125	7.2	0.075
10	7.5	7.5	0
10.5	7.875	7.9	0.025
11	8.25	8.2	0.05
11.5	8.625	8.8	0.175
12	9	9	0
12.5	9.375	9.5	0.125
13	9.75	9.9	0.15
13.5	10.125	10.1	0.025
14	10.5	10.5	0
14.5	10.875	10.9	0.025
15	11.25	11.1	0.15
15.5	11.625	11.5	0.125
16	12	11.9	0.1
16.5	12.375	12.3	0.075
17	12.75	12.7	0.05
17.5	13.125	13	0.125
18	13.5	13.3	0.2
18.5	13.875	13.8	0.075
19	14.25	14.1	0.15
19.5	14.625	14.5	0.125
20	15	14.9	0.1
	Sumatoria		3.5
	Promedio		0,106060606

TABLA 13 CÁLCULO DEL ERROR PROMEDIO DEL INSTRUMENTO  
I/P TRANSDUCER SERIE 1400TK12113-10117A

$$0.106060 \text{ psi} \times 100\% = 10.60\% \text{ psi}$$

Este error promedio lo representa es que cada lectura del instrumento se encuentra en un rango de  $\pm 10.60\% \text{ psi}$  en promedio.

Corriente (mA)	Presión		Diferencia ABS (psi)
	Ideal(psi)	Dada (psi)	
4	3	3.1	0.1
4.5	3.375	3.5	0.125
5	3.75	3.9	0.15
5.5	4.125	4.2	0.075
6	4.5	4.7	0.2
6.5	4.875	5	0.125
7	5.25	5.2	0.05
7.5	5.625	5.8	0.175
8	6	6	0
8.5	6.375	6.5	0.125
9	6.75	6.9	0.15
9.5	7.125	7	0.125
10	7.5	7.5	0
10.5	7.875	7.9	0.025
11	8.25	8.2	0.05
11.5	8.625	8.6	0.025
12	9	9	0
12.5	9.375	9.4	0.025
13	9.75	9.8	0.05
13.5	10.125	10.1	0.025
14	10.5	10.5	0
14.5	10.875	10.9	0.025
15	11.25	11.15	0.1
15.5	11.625	11.5	0.125
16	12	11.9	0.1
16.5	12.375	12.3	0.075
17	12.75	12.7	0.05
17.5	13.125	13.05	0.075
18	13.5	13.3	0.2
18.5	13.875	13.8	0.075
19	14.25	14.05	0.2
19.5	14.625	14.5	0.125
20	15	14.9	0.1
		Sumatoria	2.85
		Promedio	0.086363636

TABLA 14 CÁLCULO DEL ERROR PROMEDIO DEL INSTRUMENTO  
I/P TRANSDUCER SERIE 1400TK12113-10115A

$$0.086363636 \text{ psi} \times 100\% = 8.636\% \text{ psi}$$

Este error promedio lo representa es que cada lectura del instrumento se encuentra en un rango de  $\pm 8.636\% \text{ psi}$  en promedio.



## 2.4. Calibración de las válvulas de control.

Este procedimiento esta dedicado a la calibración de las dos válvulas de control neumáticas del lazo de control de caudal, aprovechando las instalaciones que nos brinda la planta de procesos y la facilidad de los sistemas de adquisición de datos y control.

### 1. Objetivos

Conocer el funcionamiento de la válvula de control, calibrar la válvula de neumática de control de modo que en su respuesta se pueda aprovechar todo el rango de la válvula y determinar el tipo de válvula si es lineal o de igual porcentaje y la histéresis del instrumento.

### 2. Teoría

Las válvulas de control son los elementos finales de control más usuales y se les encuentra en las plantas de proceso, donde manejan los flujos, para mantener en los puntos de control las variables que se deben controlar. La válvula de control actúa como una resistencia variable en la línea de proceso; mediante el cambio de su apertura se modifica la resistencia al flujo y, en consecuencia, el flujo mismo. Las válvulas de control no son más que reguladores de flujo.

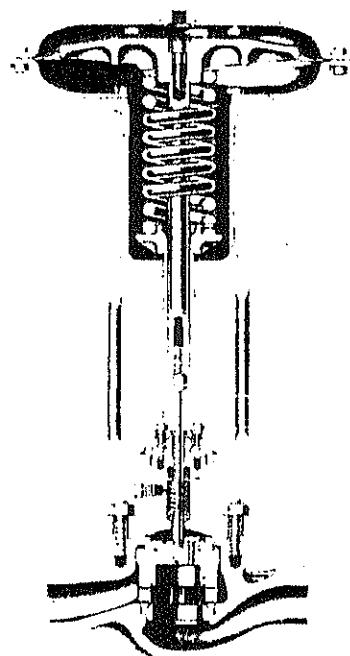


FIGURA 2.13. VÁLVULA DE CONTROL NEUMÁTICA

### 3. Equipos y materiales

a) Una válvula de Control de flujo de líquido FCV1, de aire para cerrar la válvula o empuje para cerrar ATC, con las siguientes características:

Tamaño :  $\frac{1}{2}$  "

Rango de entrada de aire : 3 - 15 psi

Material del cuerpo : Br

Presión del cuerpo : 250 psi

Serie : 2000 VA 32220 - 92954

b) Un convertidor calibrado, de señal de entrada de corriente a señal de salida de presión de aire, I/P con las siguientes características:

Marca : Taylor.

Acción : proporcionalmente directa.

Rango : 4 - 20 mA —— 3 -15 psi

Suministro neumático de potencia: 22 psi

c) Un regulador de presión de aire: entrada máxima : 21 Kg / cm<sup>2</sup> (299 psi), con sus respectivas perillas de regulación y purga sus respectivos manómetros, USG US. GAUGE Rango: 0-30 psi.

d) Un sensor de caudal marca Taylor, calibrado e instalado directamente en la línea de prueba de la válvula de control, y conectado a la computadora a través de la interfase Field Point.

Marca : Taylor

Modelo : S/N 405TB0121090100-1004

Rango de entrada : 0 – 6.4E-3 m<sup>3</sup>/s H<sub>2</sub>O

Rango de salida : 4 -20 mA DC

Voltaje de suministro : 24 VDC

- e) Suministro de aire y suministro de presión de agua para la práctica impulsada por la bomba principal.
- f) Una llave ajustable de boca (francesa) mediana, para ajustar el Rango del actuador o cierre total de la válvula sobre los 15 psi de entrada de aire y apertura de la válvula sobre los 3 psi de entrada de aire y para aflojar la contratuerca de seguridad que permite mover el vástagos sobre las indicaciones del rango establecidas.
- g) Un alicate para mover el vástagos sobre las líneas demarcadas en la placa del rango de la válvula establecido en fábrica.
- h) Un destornillador plano para mover la placa de indicación de acuerdo al ajuste de salida del rango ( si es necesario ).

### 3. Procedimiento

- a) Montar los instrumentos según la disposición dada en la Figura 2.14, el modo más fácil es reemplazando la válvula FCV2 de ingreso al tanque principal por la válvula que se requiera calibrar.



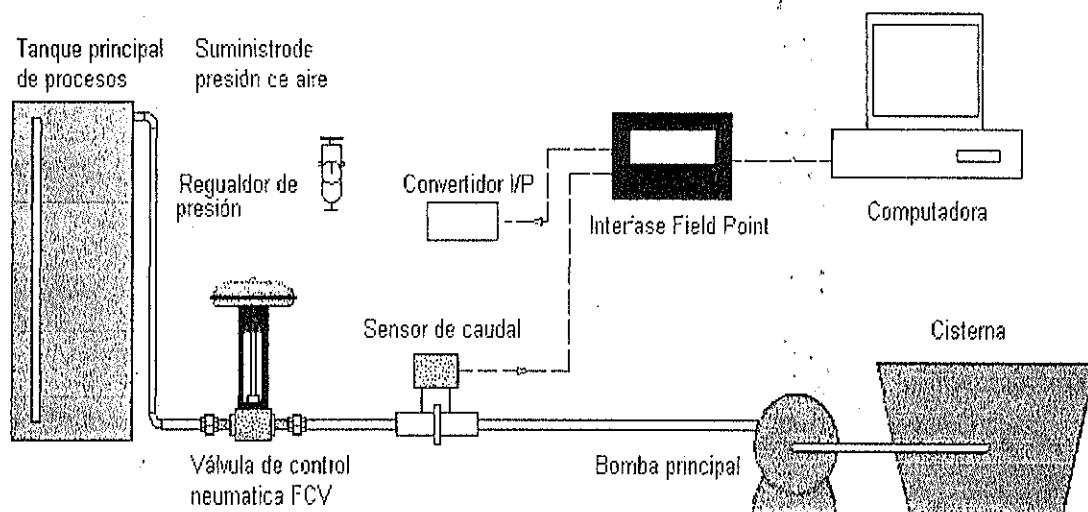


FIGURA 2.14. ESQUEMA DE LA PRÁCTICA DE CALIBRACIÓN DE LA VÁLVULA DE CONTROL

- b) Mediante la ayuda de la computadora y el programa Field Point Explorer se pueden enviar valores de salida de corriente en miliamperios al convertidor o transductor I/P el cual comanda la válvula de control neumática en el rango de 3 a 15 psi.
- c) Enviar valores a través de la computadora al convertidor I/P de 4 a 20 mA en incrementos de un amperio y registrar en correspondiente valor en caudales enviado por el sensor de caudal.
- d) Determinar la curva de la válvula en presión en psi de ingreso a la válvula versus el caudal de salida.

e) Si la válvula no tiene un comportamiento que aproveche todo el recorrido se deberá reajustar el vástago para mejorar su actuación. El propósito es calibrar, dentro de los rangos máximos que el sistema puede alcanzar, en cuanto a caudales, esto crea una calibración específica para cada válvula de control, evitando el desperdicio de recorrido de vástago.

**Nota:** Anotar el número de hilos que sobresalen desde la contratuerca de seguridad en el vástago de la válvula. Tener la precaución de hacer una señal con tinta de difícil remoción en el nivel del vástago sobre la tuerca de ajuste del Rango del actuador (Cuando la válvula esté calibrada).

- f) Girar la tuerca de ajuste del Rango del actuador en dirección del movimiento de las manecillas del reloj
- g) Girar el vástago en dirección del movimiento de las agujas del reloj, o en contra de este movimiento aflojando previamente la contratuerca de seguridad.
- h) Graficar la curva de calibración.
- i) Determinar la histéresis de la válvula de control.

### Tabla de datos

A continuación se mostrarán los datos obtenidos después de la calibración tanto para la válvula de control FCV1 como para la válvula de control FCV2.

Los datos mostrados son tomados tanto abriendo como cerrando la válvula para determinar la histéresis del instrumento.

Curva de calibración de válvula FCV1		
Presión de entrada (psi)	Caudal a través d la válvula	
	Abriendo (m <sup>3</sup> /s)	Cerrando (m <sup>3</sup> /s)
3	0.000547894	0.000548358
3.75	0.000547661	0.000548358
4.5	0.000547429	0.000547429
5.25	0.00054673	0.000547196
6	0.000544629	0.000544863
6.75	0.000535666	0.000542285
7.5	0.000526548	0.000533282
8.25	0.000513057	0.000521439
9	0.000484928	0.000509064
9.75	0.000460885	0.000477765
10.5	0.00043046	0.000455023
11.25	0.000387187	0.000418389
12	0.000312064	0.000371614
12.75	0.000252323	0.000311235
13.5	0.000194931	0.000260946
14.25	0.000121455	0.000183768
15	3.98699E-05	5.63497E-05

TABLA 15 DATOS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN VÁLVULA FCV1 NORMALMENTE ABIERTA.



Curva de calibración de válvula FCV2		
Presión de entrada (psi)	Caudal a través de la válvula	
	Abriendo (m <sup>3</sup> /s)	Cerrando (m <sup>3</sup> /s)
3	0.000547894	0.000548358
3.75	0.000547661	0.000548358
4.5	0.000547429	0.000547429
5.25	0.00054673	0.000547196
6	0.000544629	0.000544863
6.75	0.000535666	0.000542285
7.5	0.000526548	0.000533282
8.25	0.000513057	0.000521439
9	0.000484928	0.000509064
9.75	0.000460885	0.000477765
10.5	0.00043046	0.000455023
11.25	0.000387187	0.000418389
12	0.000312064	0.000371614
12.75	0.000252323	0.000311235
13.5	0.000194931	0.000260946
14.25	0.000121455	0.000183768
15	3.98699E-05	5.63497E-05

TABLA 16 DATOS PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN VÁLVULA FCV2 NORMALMENTE CERRADA.

### Cálculos

Cálculo de histéresis para la válvula FCV1 Normalmente abierta:

$$\text{SPAN} = 0.000548358 - 3.98699E-5 = 0.000505489$$

Para la válvula FCV1 la máxima diferencia entre los valores ascendentes y descendentes corresponde al valor teórico de 13.5 psi

$$\text{Max dif.} = 0.000260946 - 0.000194931 = 6.6015E-5$$

$$\text{Histéresis} = H = \text{max. Dif. / SPAN} * 100\%$$

$$H = 6.6015E-5 / 0.000505489 * 100 = 13.05 \%$$

Cálculo de histéresis para la válvula FCV2 Normalmente cerrada:

$$\text{SPAN} = 0.000542755 - 2.97095E-5 = 0.000513045$$

Para la válvula FCV2 la máxima diferencia entre los valores ascendentes y descendentes corresponde al valor teórico de 4.5 psi

$$\text{Max dif.} = 2.97095E-5 - 0.000137193 = 0.00010748$$

$$\text{Histéresis} = H = \text{max. Dif. / SPAN} * 100\%$$

$$H = 0.00010748 / 0.000513045 * 100 = 20.9 \%$$

### Gráficos

Los gráficos que se muestran a continuación nos permiten ver el comportamiento de las válvulas de control tanto mientras se les suministra presión para cerrarlas como mientras se abren y determinar la histéresis de cada una.



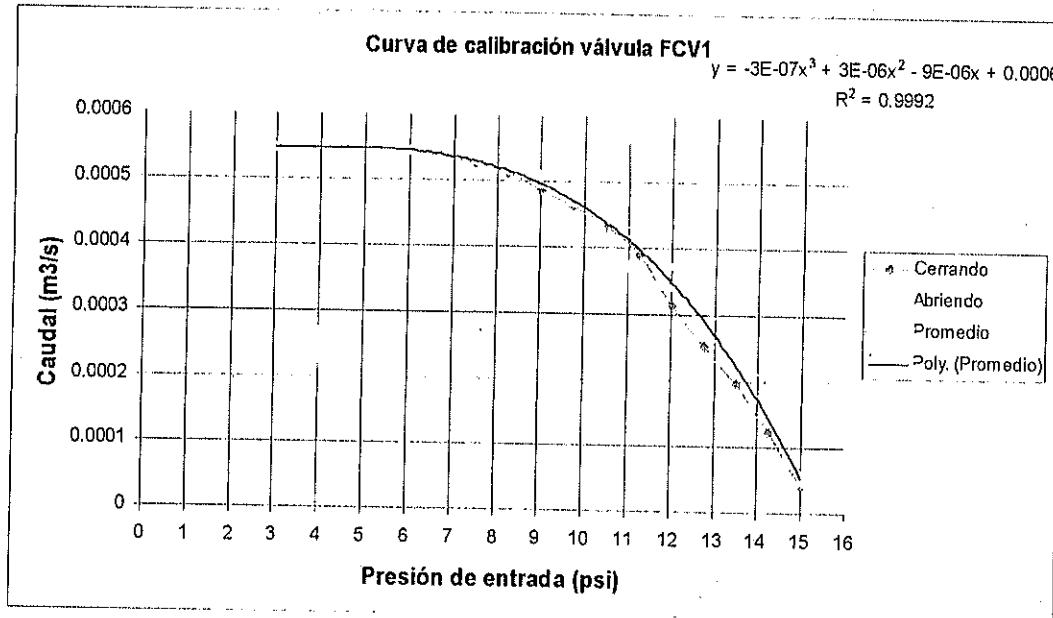


FIGURA 2.15. CURVA DE CALIBRACION VÁLVULA FCV1

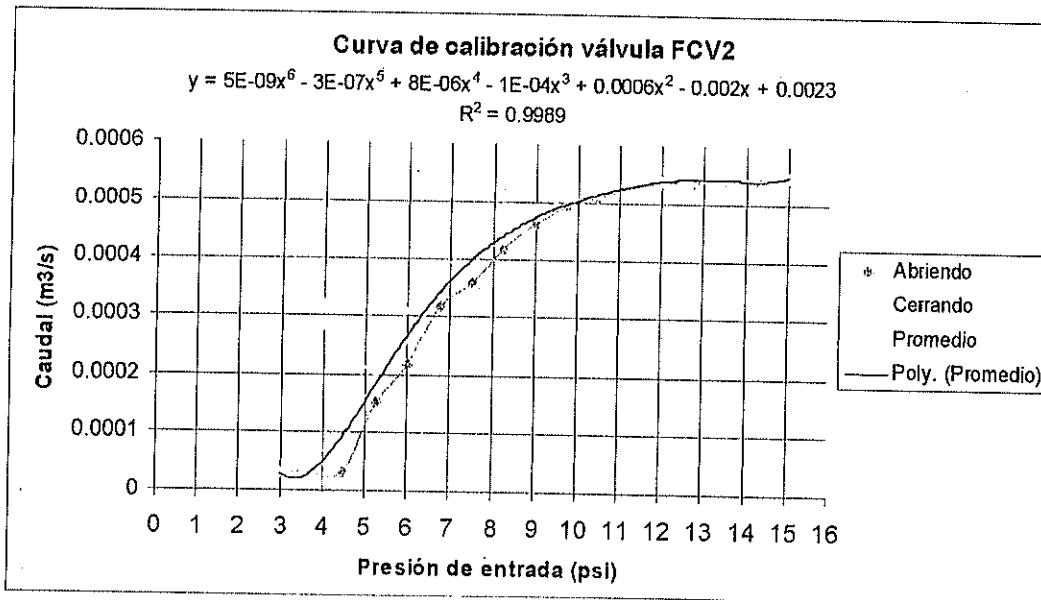


FIGURA 2.16. CURVA DE CALIBRACION VÁLVULA FCV2

## 5. Análisis de resultados

Las curvas de calibración presentadas muestran que la mayoría de los puntos de control obtienen una respuesta por parte de la válvula, lo peor que se puede esperar en estos casos es que la válvula reaccione o pase de todo caudal a nada de caudal es decir ON-OFF, la calibración de las válvulas deben permitir que un control lo más proporcional posible, debido a la forma del asiento del vástago de la válvula la respuesta de la válvula puede cambiar. Por la forma del a curva que refleja la válvula se determina que es una válvula de igual porcentaje y no lineal, todo esto debido al tipo de asiento de la válvula.

Las calibraciones de las válvulas de control no deben ser alteradas por error o desconocimiento, ya que han sido calibradas para que el sistema opere y pueda controlarse, el sistema se basa en la calibración de estas válvulas, aun cuanto el sistema es flexible, alterar la calibración de las válvulas podría descomponer al sistema de control del lazo de nivel y caudal.

# **CAPITULO 3**

## **3. INTERFASES Y EQUIPOS PARA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DIGITAL**

### **3.1. Equipos de Adquisición de Datos Field Point**

La interfase Field Point (Punto de campo) de National Instruments es un sistema modular que permite la comunicación entre la computadora y los procesos, es un sistema de entrada y salida de datos (I/O), la principal característica de este sistema es trabajar en el campo cerca de los procesos dejando el monitoreo y control en posiciones remotas.

Esta interfase convierte a la computadora en importante instrumento de análisis de datos, control y monitoreo, en tiempo real. Versiones más recientes de Field Point pueden incluso trabajar sin la necesidad de una

computadora, que se encargue de realizar el control. Otra de las ventajas de la interfase Field Point radica en su conectividad con otros módulos Field Point pudiendo construirse redes de trabajo industrial.

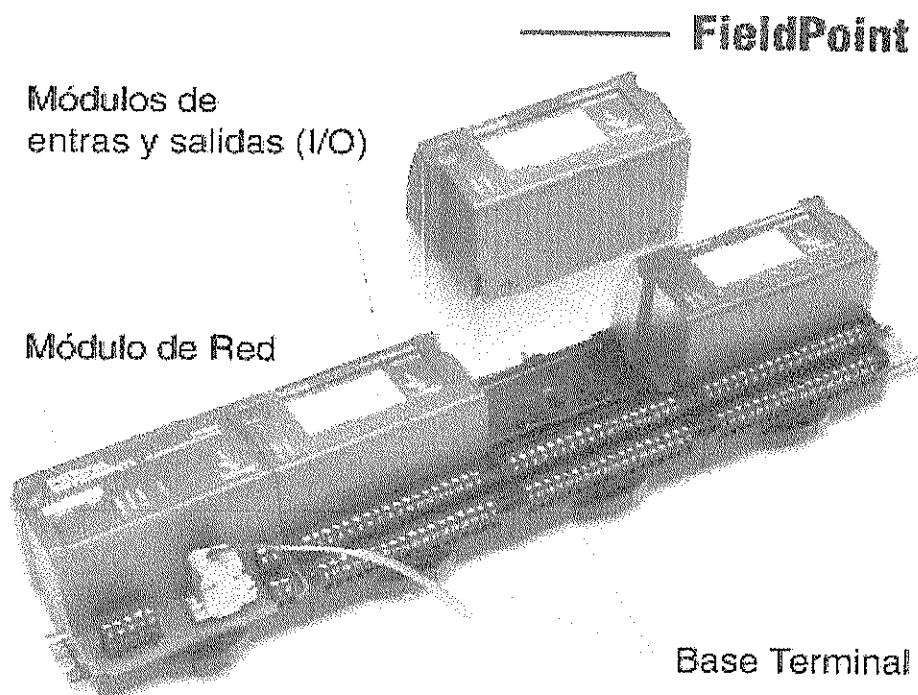


FIGURA 3.1. SISTEMA MODULAR FIELD POINT

El sistema Field Point cuenta con una gran variedad de módulos de entrada y salida (I/O), tanto analógicos como digitales, que permite efectuar conexiones con una gran gama de sensores para adquisición de datos, como termocuplas, RTD, sensores transductores eléctricos de nivel, presión, flujo, y asimismo con una gran gama de elementos de

control como transductores de corriente a presión válvulas de control, etc., mediante módulos de salidas analógicas y digitales.



FIGURA 3.2. REDES INDISTRIALES SISTEMA MODULAR FIELD POINT

La interfase modular Field Point cuenta con tres partes fundamentales, la primera es el módulo primario de comunicación que permite la comunicación entre la computadora y los demás módulos. La segunda parte consta de los módulos de adquisición o entradas y de los módulos de salidas análogas o digitales, la función de estos módulos es convertir las señales análogas de entrada como corriente y voltaje de los sensores en señales digitales, que la computadora interpreta, de igual manera pero en sentido contrario los módulos de salida reciben señales digitales de la computadora y los convierten en señales análogas de corriente para los actuadores.

La tercera parte consta de las bases terminales para conexión de cada módulo donde se realiza físicamente las conexiones con cada sensor, transductor o elemento de control.

Debido a que en la planta de procesos existen, solamente sensores transductores de corriente de 4-20 mA, se adquirió un módulo de entradas analógicas de corriente. De igual manera los elementos de control utilizan señales analógicas de corriente de 4-20 mA, por lo que se adquirió un módulo de salidas analógicas de corriente.

### 3.1.1. Descripción del Módulo FP-1000

El FP-1000 es el módulo primario de comunicación, se encarga de establecer un protocolo de comunicación entre la computadora y los demás módulos de entradas y salidas.

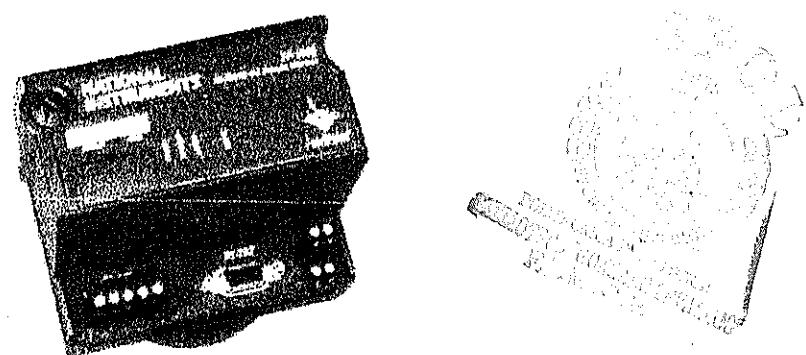


FIGURA 3.3. MÓDULO FIELD POINT FP-1000

Al módulo FP-1000 es capaz de soportar hasta nueve módulos de entradas y salidas por banco. El FP-1000 establece la comunicación con la computadora a través del protocolo del comunicación Optumux, físicamente se conecta mediante su puerto serial SR 232.

Además este módulo tiene un puerto aislado RS 485 el cual le permite formar redes industriales de trabajo al enlazarse hasta con veinticinco bancos, formados con módulos de comunicación FP-1001, estos módulos poseen solo puertos de enlace SR 485. Los bancos de Field Point enlazados con SR 485 pueden operar a distancias de 1200 m, mientras que un FP-1000 con su enlace serial SR 232 puede operar a 15 m de una PC.

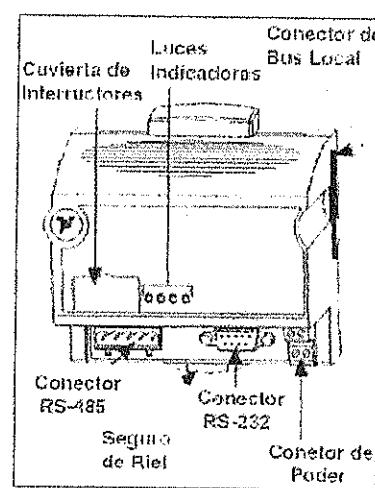


FIGURA 3.4. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO FP-1000

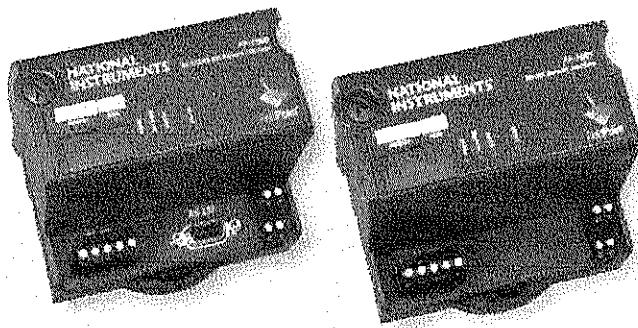


FIGURA 3.5. MÓDULO FIELD POINT FP-1000 Y FP-1001

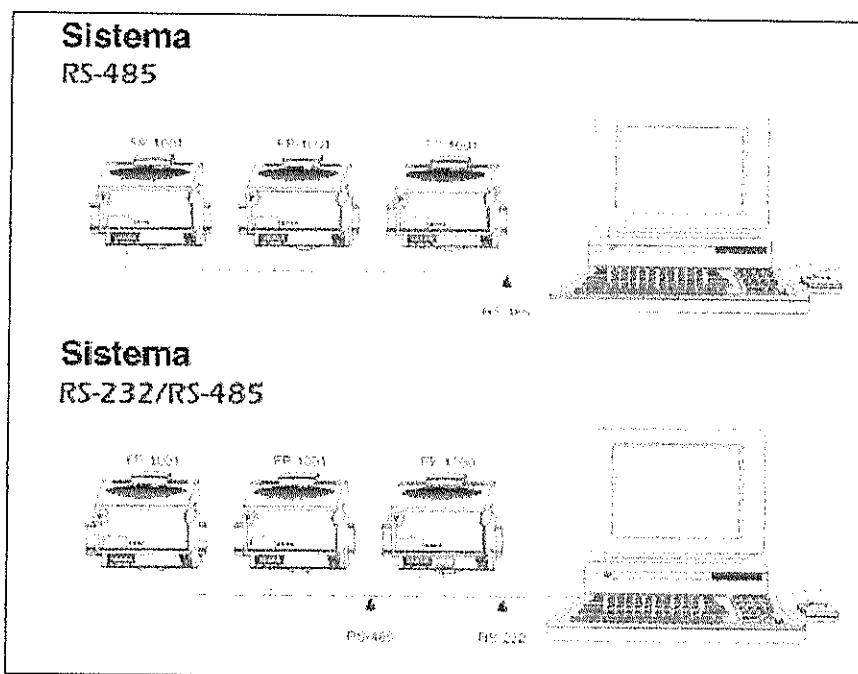


FIGURA 3.6. SISTEMAS DE CONEXIÓN RS-485 Y RS-232



## Especificaciones Técnicas del Módulo de Red FP-1000

A continuación se presentan las principales características que proporciona el fabricante.

### Red de trabajo

#### Interfase

FP-1000.....1 Puerto RS 232,

1 Puerto RS 485

Velocidad en Baudios.....300, 1200, 2400, 9600, 19200,

38400, 57600, 115200 b/s

(Selezionadle por interruptores).

Parámetros de comunicación.....Byte de inicio ,8 bytes de  
datos, 1 byte de parada, sin paridad.

Integridad.....Estándar Optumux.

Máxima distancia desde la PC a los bancos

FP-1000(SR 232).....15m.

FP-1001 (SR 485).....1200m.

Máximo número de I/O por banco.....9.

Máximo número de bancos

en una sola red de trabajo.....25.

Aislamiento en FP-1000 puerto RS 485.....2500 Vrms colapso

230Vrms operacional.

### Físicas

Luces indicadoras

Poder (Verde).....Indica que se encuentra encendido.

Red de trabajo (Amarillo).... Indica tráfico entre la PC y el módulo.

Acceso (Amarillo).....Indica acceso a algún módulo.

Estado (Rojo).....Indica condición de falla.

Dimensiones .....10.9 por 10.9 por 9.1 cm.

Peso.....238 g.

### Requerimientos de poder

Suministro de poder .....11-30 VDC.

Consumo total de

energía por banco.....900 mW + (I/O módulo \*1.15)

### Ambiente

Temperatura de operación.....-40°C a + 70°C.

Temperatura de almacenamiento.....-55°C a + 80°C.

Humedad relativa.....5% a 90% sin condensación.



## Instalación del Módulo FP-1000.

El sistema modular de Field Point fue diseñado para ser montado sobre un riel DIN estándar de 35mm, como se muestra en la Figura 3.7, para la instalación del módulo FP-1000 se recomiendan los siguientes pasos.

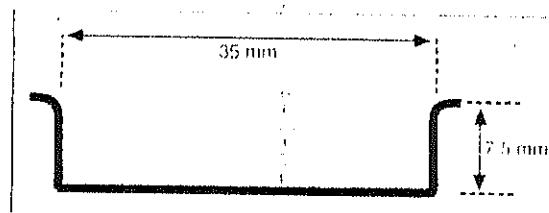


FIGURA 3.7. RIEL DIN ESTÁNDAR

- 1- Para la instalación sobre el riel el módulo FP-1000 cuenta con un seguro el cual debe ser desbloqueado antes de montar el módulo sobre el riel DIN.

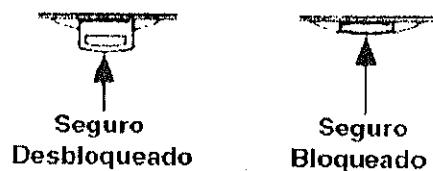


FIGURA 3.8. SEGURO PARA RIEL DIN

- 2- Colocar el módulo FP-1000 sobre el riel como lo muestra la Figura 3.9 y presionar.

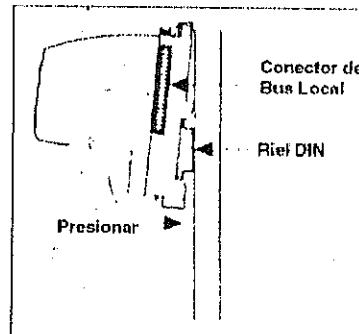


FIGURA 3.9. INSTALACIÓN DE FP-1000 EN EL RIEL DIN

- 3- Una vez montado el módulo FP-1000 sobre el riel DIN, bloquear el seguro para mantener la posición del módulo en el riel DIN.
  
- 4- Una vez asegurado el módulo de red FP-1000 se puede colocar las bases terminales, estas bases cuentan con un seguro, el cual debe de ser abierto antes de montarse sobre el riel DIN. Después de montar las bases terminales sobre el riel DIN, se procede a deslizar sobre el riel hasta que el bus local conector de la base se una firmemente con el conector del módulo de red FP-1000, en este momento la base terminal se encuentra conectada al módulo de red y se procede a bloquear el seguro del riel parar mantener su posición como se muestra en la Figura 3.10.

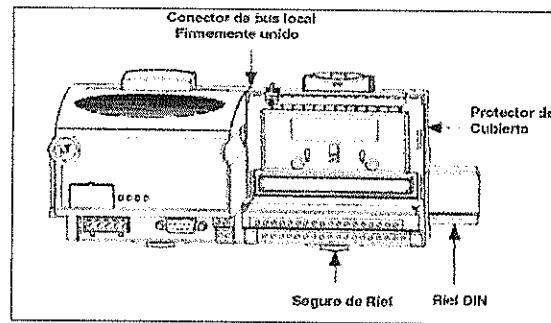


FIGURA 3.10. INSTALACIÓN DE LA BASE TERMINAL

### Suministro de Poder al Módulo de Red FP-1000

La interfase de Fiel Point requiere un suministro de 11-30 VDC, el módulo de red FP-1000 filtra, regula y suministra la energía a los módulos de entrada y salida, de este modo no requieren alimentación externa adicional para cada módulo. Para la conexión a la fuente de poder el módulo de red FP-1000 cuenta con un conector de cuatro puntos, separado en pares, este terminal se y su conexión se muestra en la Figura 3.11.

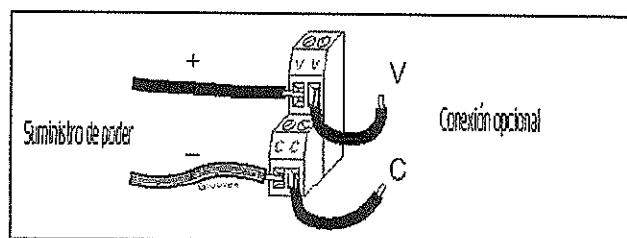


FIGURA 3.11. SUMINISTRO DE PODER DEL FP-1000

Para energizar la interfase Field Point solo debe conectar el positivo de la fuente al terminal marcado como V y el negativo de la fuente al terminal marcado como C, dejando el otro par para cualquier requerimiento opcional.

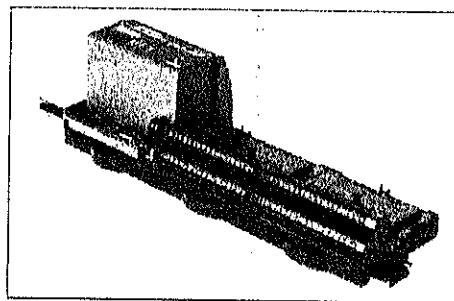


FIGURA 3.12. FP-1000 INSTALADO EN LAS BASES TERMINALES

### 3.1.2. Descripción del Módulo FP-AI-111

El FP-AI-111 es un módulo de entrada de corriente, cuenta con 16 canales de entrada para el sistema Field Point. Este módulo permite la instalación de una gran gama de sensores y trasmisores eléctrico para monitoreo y adquisición de datos.

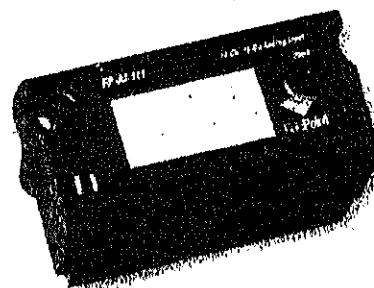


FIGURA 3.13. MÓDULO DE ENTRADAS DE CORRIENTE FP-AI-111

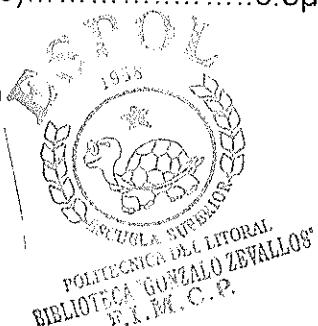
Se puede configurar cada canal individualmente vía software para obtener rangos de trabajo como de 0 - 20 mA, 4 – 20 mA o  $\pm 20$  mA. Con una resolución alta de 16 bytes es posible alta precisión en las calibraciones de los sensores, además cuenta con filtros que reducen los ruidos en las señales de entrada.

### **Especificaciones Técnicas del Módulo de Entradas de Corriente FP-AI-111**

A continuación se presentan las principales características que proporciona el fabricante.

#### **Entradas analógicas**

Número de canales de entrada.....	16 independientes.
ADC resolución.....	16 bytes 1 en 65536.
Filtros.....	Hz, 60 Hz, o 500 Hz seleccionable Por software para cada canal.
Protección de sobre voltaje.....	40 V.
Aislamiento.....	3000 Vrms.
Aislamiento de seguridad voltaje de operación.....	250 Vrms.
Impedancia en la entrada.....	100 $\Omega$ .
Ruido en la entrada (50 / 60 Hz de filtro).....	0.3 $\mu$ Arms.



Error de ganancia.....0.3% @ 25°C, 0.2% @ -40 a +70 °C.

### Físicas

Luces indicadoras

Poder (verde).....Indica que el módulo se encuentra encendido.

Listo (verde).....Indica que el módulo está configurado y listo.

Dimensiones incluyendo la base terminal.....9 por 10.9 por 9.1 cm.

Peso.....136 g.

### Requerimientos de poder

Del módulo de red .....350 mW.

### Ambiente

Temperatura de operación.....-40°C a + 70°C.

Temperatura de almacenamiento.....-55°C a + 80°C.

Humedad relativa.....5% a 90% sin condensación.

La fijación de los filtros para canal del módulo se realiza mediante software

CARACTERISTICAS	FILTRO		
	50 Hz	60 Hz	500 Hz
Tiempo de actualización	1.47 s	1.23 s	0.173 s
Ancho de banda de entrada (-3dB)	1.3 Hz	16 Hz	130 Hz

TABLA 17 FIJACIÓN DE FILTROS PARA EL MÓDULO FP-AI-111

## Instalación del Módulo FP-AI-111

El módulo FP-AI-111 se instala sobre la base terminal para Field Point (FP-TB-01). La instalación puede realizarse en caliente, es decir no se requiere desconectar la energía de los demás módulos al momento de la instalación, la alimentación del módulo se realiza a través de la base terminal. Para ubicar el módulo sobre su respectiva base terminal debe seguir estos pasos

- 1- Ubique la clavija de la base terminal la posición X, esta posición es utilizada para cualquier módulo.
- 2- Deslizar las ranuras de alineación del módulo FP-AI-111 en los carriles guías de la base terminal.
- 3- Presionar firmemente el módulo sobre la base terminal, una vez en posición el seguro se enclava para mantener la posición del módulo FP-AI-111.

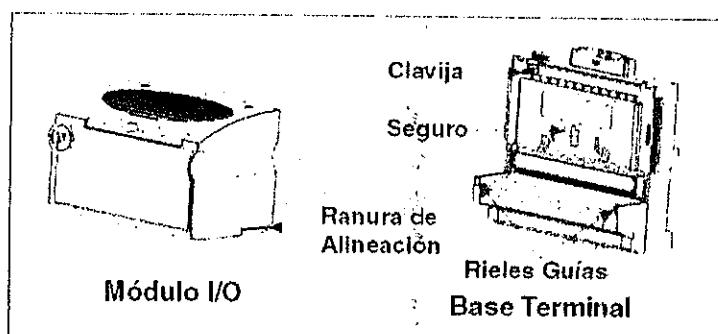


FIGURA 3.14. INSTALACIÓN DEL MÓDULO EN LA BASE TERMINAL

## Conexiones con el Módulo de Entrada de Corriente FP-AI-111

El módulo FP-AI-111 montado sobre la base terminal puede ser conectado a las señales de corriente en milí amperios, la base terminal FP-TB-1 provee de conexiones para cada uno de los 16 canales de entrada de corriente. Cada canal de entrada tiene tres conectores, para las siguientes señales, corriente de entrada (lin), poder (Vsup), y común (Com). Si se requiere se puede conectar poder para un dispositivo de campo en V y C de la base terminal. Si se requiere una fuente externa esta deberá de conectarse en las terminales Vsup y Com de cada canal.

En la Tabla 18 muestra las conexiones del FP-AI-111 para cada terminal de la base

CANAL	Número de terminal		
	lin	Vsup	Com
0	1	17	18
1	2	17	18
2	3	19	20
3	4	19	20
4	5	21	22
5	6	21	22
6	7	23	24
7	8	23	24
8	9	25	26
9	10	25	26
10	11	27	28
11	12	27	28
12	13	29	30
13	14	29	30
14	15	31	32
15	16	31	32

TABLA 18 TERMINALES ASIGNADAS AL FP-AI-111

El modo de instalación de cualquier sensor, trasmisores o fuente de corriente a los terminales de la base, se muestra en la Figura 3.15, además da el ejemplo de la instalación de una fuente de energía opcional, una fuente corriente alimentada en lazo con la fuente de energía opcional, y una fuente de corriente con su propia fuente externa de energía

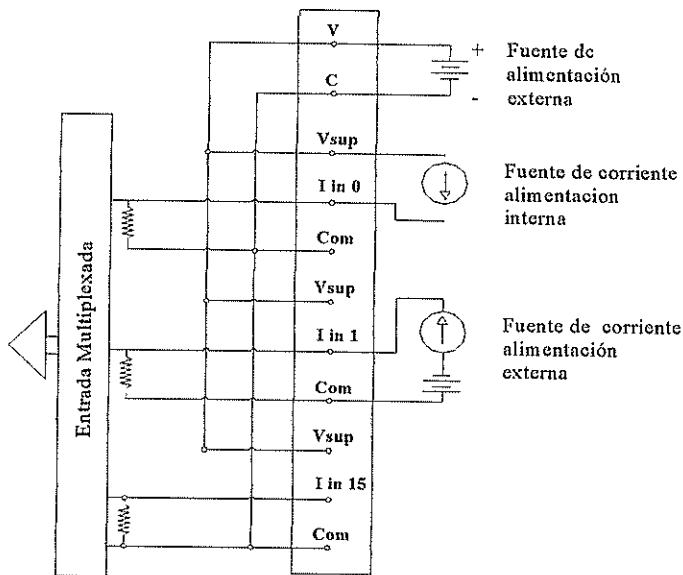
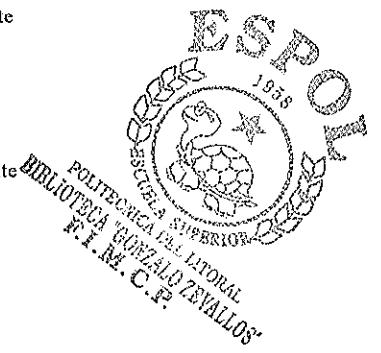


FIGURA 3.15. DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL MÓDULO FP-AI-111

### 3.1.3. Descripción del Módulo FP-AO-200

El FP-AO-200 es un módulo de salidas de corriente, cuenta con 8 canales de salida para el sistema Field Point. Este módulo permite la instalación de una gran gama de dispositivos que operan en el rango de 0-20 mA, 4-20 mA como, transductores I/P, actuadores



y válvulas de control. Se puede configurar cada canal individualmente vía software para obtener rangos de trabajo como de 0 - 20 mA, o 4 – 20 mA. Con una resolución alta de 12 bytes es posible alta precisión en las calibraciones de los transductores I/P y elementos de control. El módulo de salidas de corriente cuenta con luces indicadoras de falla en cada canal, se encienden si el lazo de corriente es interrumpido.

### **Especificaciones Técnicas del Módulo de Salidas de Corriente FP-A0-200**

A continuación se presentan las principales características que proporciona el fabricante.

#### **Salidas analógicas**

- Número de canales de salida.....8 independientes.  
Rango de salida.....0-20 mA o 4-20 mA.  
DAC resolución.....12 bytes.  
Fuente externa.....5 a 24 VDC nominal.  
Aislamiento .....3000 Vrms doble aislamiento.  
Manejador de carga resistiva.....1KΩ con fuente de 24 VDC.  
Protección.....Corto circuito y circuito abierto.

### **Físicas**

Luces indicadoras

Poder (verde).....Indica que el módulo se encuentra encendido.

Listo (verde).....Indica que el módulo esta configurado y listo.

Detección de apertura de circuito(red).....Indica falla por apertura

de circuito en cada canal.

Dimensiones con la base terminal.....10.9 por 10.9 por 9.1 cm.

Peso.....136 g.

### **Requerimientos de poder**

Del módulo de red .....350 mW.

### **Ambiente**

Temperatura de operación.....-40°C a + 70°C.

Temperatura de almacenamiento.....-55°C a + 80°C.

Humedad relativa.....5% a 90% sin condensación.

### **Instalación del Módulo FP-AI-111**

El módulo FP-AI-111 se instala sobre una base terminal para Field Point (FP-TB-01), la instalación puede realizarse en caliente, es decir no se requiere desconectar la energía de los demás módulos al momento de la instalación, la alimentación del módulo se realiza

a través de la base terminal. Para ubicar el módulo sobre su respectiva base terminal debe seguir estos pasos

- 1- Ubique la clavija de la base terminal la posición X, esta posición es utilizada para cualquier módulo.
- 2- Deslizar las ranuras de alineación del módulo FP-AO-200 en los carriles guías de la base terminal.
- 3- Presionar firmemente el módulo sobre la base terminal, una vez en posición el seguro se enclava para mantener la posición del módulo FP-AO-200.

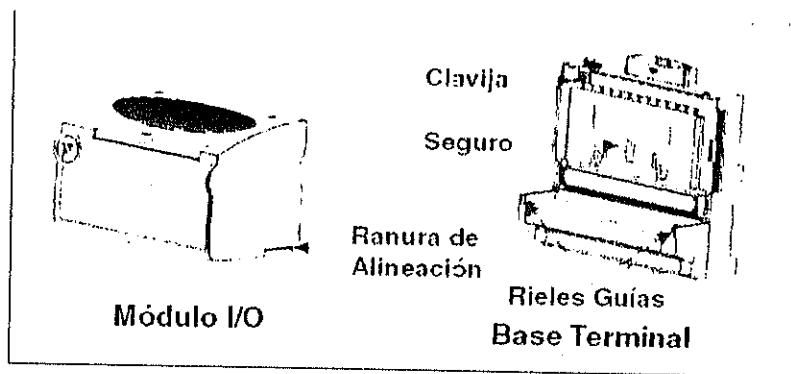


FIGURA 3.16. INSTALACIÓN DEL MÓDULO EN LA BASE TERMINAL

#### Conexiones con el Módulo de Salida de Corriente FP-AO-200

El módulo FP-AO-200 montado sobre la base terminal puede ser conectado a las a los elementos de control, emitiendo señales de corriente en miliamperios.

La base terminal FP-TB-1 provee de conexiones para cada uno de los 8 canales de salida de corriente. Cada canal de salida tiene tres conectores, para las siguientes señales, corriente de salida ( $I_{out}$ ), poder ( $V_{sup}$ ), y común (Com). Si se requiere se puede conectar poder para un dispositivo de campo en V y C de la base terminal. Si se requiere una fuente voltaje externa esta deberá de conectarse en las terminales  $V_{sup}$  y Com de cada canal. En la Tabla 19 muestra las conexiones del FP-AO-200 para cada terminal de la base.

CANAL	Número de terminal		
	$I_{in}$	$V_{sup}$	Com
0	1	17	2, 18
1	3	19	4, 20
2	5	21	6, 22
3	7	23	8, 24
4	9	25	10, 26
5	11	27	12, 28
6	13	29	14, 30
7	15	31	16, 32

TABLA 19 TERMINALES ASIGNADAS AL FP-AO-200

El modo de instalación de cualquier elemento de control o carga al circuito de corriente, en los terminales de la base, se muestra en la figura 3.17 además da el ejemplo de la instalación de una fuente

de energía opcional 5-24 VDC para alimentación del lazo de corriente.

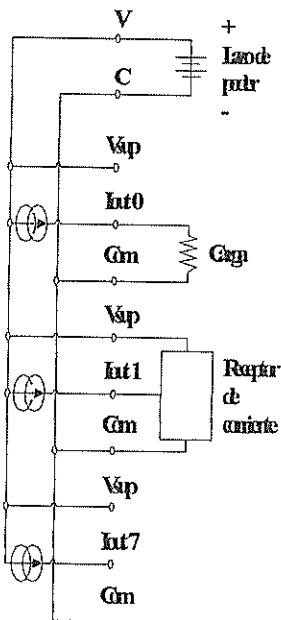


FIGURA 3.17. DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL MÓDULO FP-AO-200

### 3.1.4. Programa de Configuración Field Point Explorer

El Field Point Explorer es el programa que se encarga de la configuración de la interfase Field Point. Con el Field Point Explorer se puede configurar interactivamente, el tipo de red que utilizará la interfase Field Point, serial RS-232 o RS-485 y así como cada uno de los parámetros de los módulos de entrada salida (I/O).

El Field Point Explorer es un programa de fácil uso, fue creado bajo Windows, lo que garantiza un sistema de simple instalación y fácil mantenimiento.

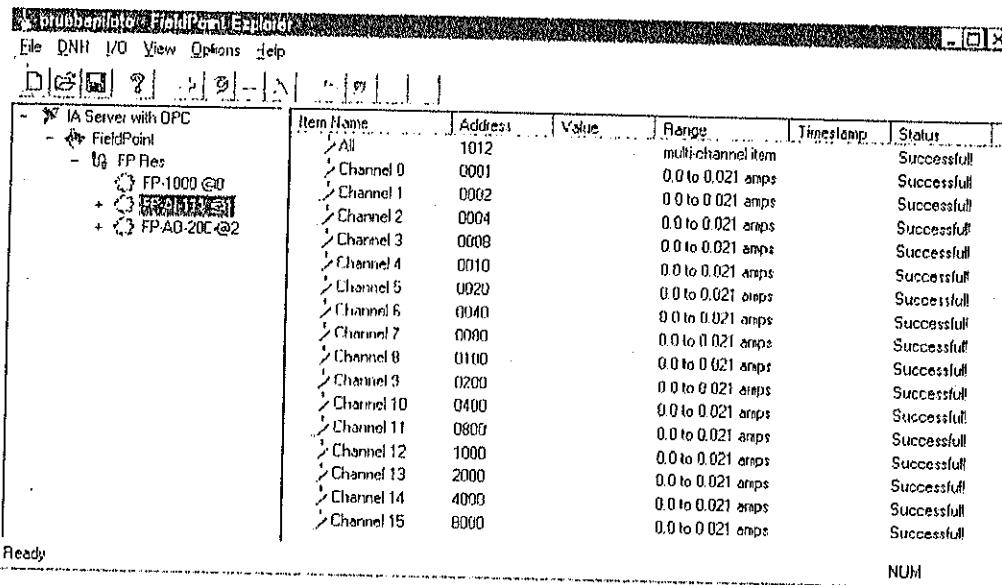


FIGURA 3.18. VENTANA PRINCIPAL DEL FIELD POINT EXPLORER

Field Point Explorer presenta una ventana de uso intuitivo para una configuración interactiva de la interfase Field Point, de los módulos de comunicación y así como de cada uno de los módulos de entrada salida (I/O). Cuando Field Point Explorer detecta la red, retorna la información de la configuración de todos los módulos Field Point de la red de trabajo.

Dar la configuración a cada módulo de la red es tan fácil como dar doble clip en el nombre del dispositivo y llenar una caja de dialogo.

Por ejemplo en un módulo de salida de corriente se pueden configurar los rangos de corriente máxima y mínima que saldrá por cada canal del módulo, a demás de monitorear sus variaciones.

Toda la información de la configuración se puede guardar dentro de la computadora como un archivo de extensión IAK.

Después de la configuración de la interfase Field Point, el Field Point Explorer puede exportar esta información a aplicaciones de programas como Lab View, para lograr esto dentro de la aplicación de Lab View se debe hacer referencia a la configuración guardada dentro del archivo IAK.

## Descripción de la Ventana Principal del Field Point Explorer

El Field Point Explorer ofrece al usuario, una rápida y ligera revisión de las aplicaciones. Es recomendable utilizar la capacidad del Field Point Explorer para verificar la comunicación con el módulo de red y los módulos de entrada salida (I/O) antes de desarrollar completamente la aplicación. La Figura 3.19 a continuación muestra las partes de la ventana del Field Point Explorer.

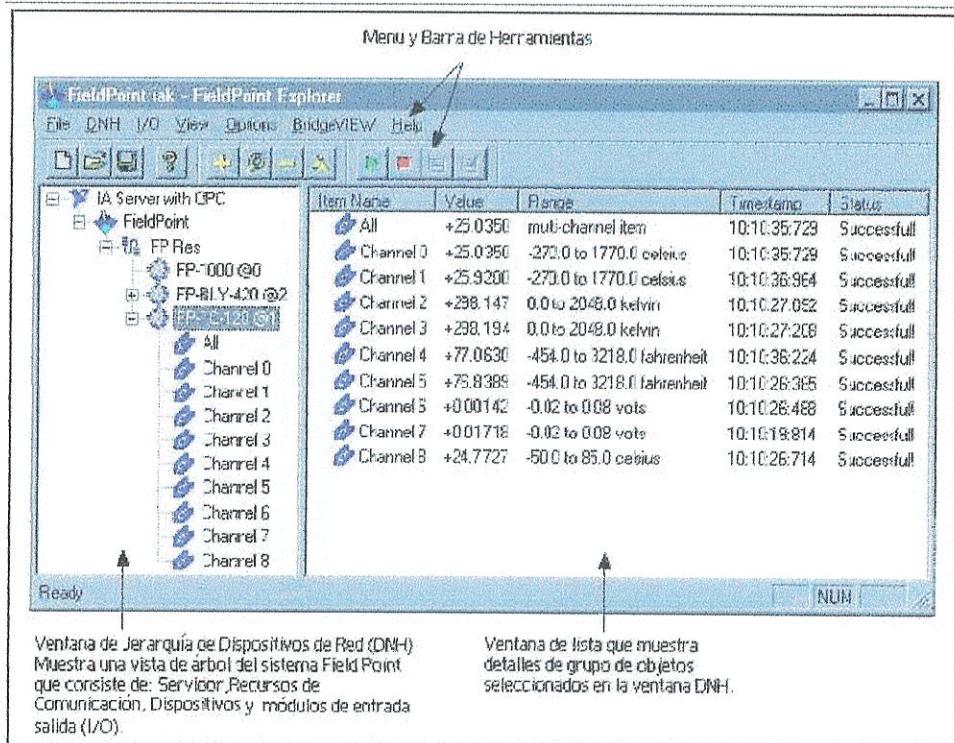


FIGURA 3.19. PARTES DE LA VENTANA DEL FIELD POINT EXPLORER

## **Configuración de la Interfase Field Point**

El Field Point Explorer hace fácil la configuración de la interfase Field Point y los módulos de Field Point. Antes de iniciar la configuración es recomendable cerciorarse que las luces indicadoras de poder (POWER) de la interfase estén iluminadas, tanto en el módulo principal de comunicación FT-1000, como en los módulos de entrada salida FP-AI-111 y FP-AO-200 adicional a esto las luces indicadoras de los módulos de entrada salida deben de indicar estar listos (READY).

Los pasos siguientes describen el proceso de configuración de los recursos de comunicación, los dispositivos, y las partes dentro de los dispositivos de la interfase Field Point.

### **Configuración de la Comunicación (comm resource)**

La configuración del puerto representa la senda a través de la que el servidor de Field Point accede a la interfase Field Point.

Normalmente, el recurso de comunicación establece un puerto COM de la computadora para la comunicación con la interfase a través de un conector serial RS-232 en la computadora.

Para agregar un recurso de comunicación en el Field Point Explorer se debe de pulsar el botón derecho del ratón en la palabra "Field Point" en la ventana de jerarquía de dispositivos de red (Device Network Hierarchy DNH) del Field Point Explorer y seleccionar "Agregue un recurso de comunicación a este servidor...".

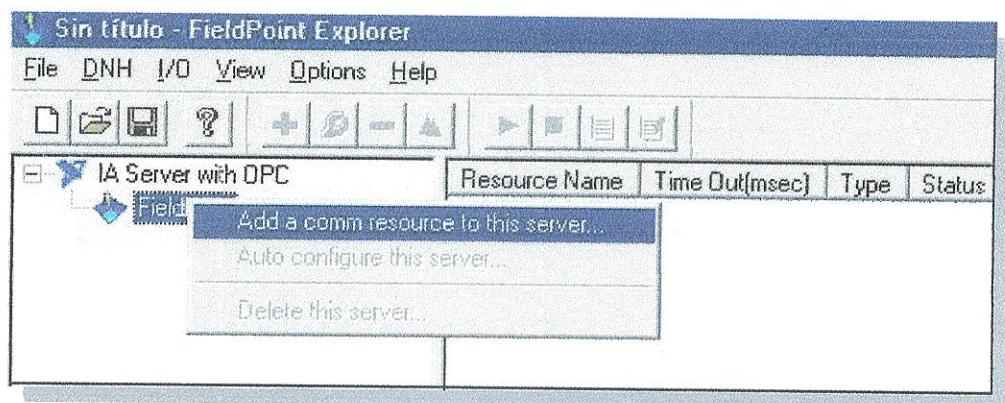


FIGURA 3.20. AÑADIR RECURSOS DE COMUNICACIÓN

Automáticamente se presenta una caja de dialogo con el nombre de configuración de los recursos de comunicación (Comm Resource Configuration), como se muestra en la Figura 3.21.

Dentro de esta caja de dialogo se puede configurar el nombre del recurso de comunicación, preconfigurado se carga como FP Res y

además el tipo de conexión con la interfase Fiel Point se puede seleccionar entre RS232/485 o Ethernet.

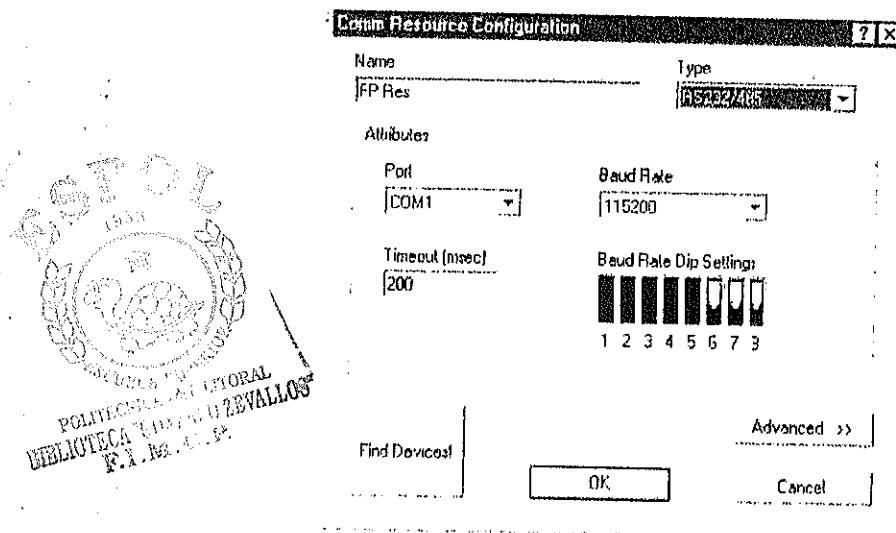


FIGURA 3.21. CONFIGURANDO LOS RECURSOS DE COMUNICACIÓN

La velocidad de comunicación (Baut Rate) también puede ser configurar, viene preconfigurado a la máxima velocidad 11520 baud, al cambiara la configuración de la velocidad de comunicación automáticamente cambia el gráfico de los interruptores, este gráfico coincide con la configuración manual de los interruptores en el módulo de comunicación FP-1000. También se debe seleccionar un puerto de comunicación COM de entre todos los que la computadora servidor, disponga, tomando en cuenta

seleccionar el puerto en donde físicamente se encuentre conectada la interfase Field Point.

Para terminar la configuración de los recursos de comunicación se debe detectar si la configuración esta bien efectuada para esto el Field Point Explorer cuenta con el botón encontrar dispositivos (Find Devices), esta función permite detectar la red en busca de la Interfase Field Point y de los módulos de entrada salida I/O.

La Figura 3.22 muestra el Field Point Explorer sondeando la red en busca de la interfase Field Point a través del puerto de comunicaciones COM seleccionado.

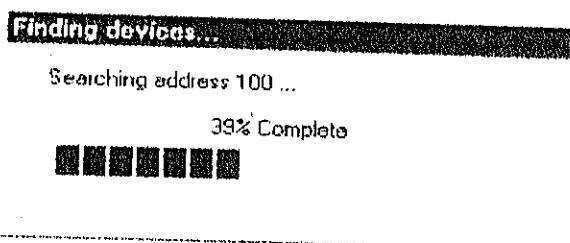


FIGURA 3.22. ENCONTRANDO DISPOSITIVOS

Si la búsqueda de los dispositivos es positiva entonces la configuración es aceptada caso contrario se produce un mensaje de error como se muestra en la Figura 3.23,

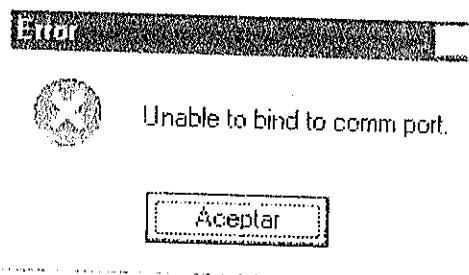


FIGURA 3.23. MENSAJE DE ERROR

Este indica que no se pudo enlazar al puerto COM especificado en la configuración, se deberá entonces cambiar el puerto COM y ensayar nuevamente la detección de la red.

Después de que los módulos de Field Point se encuentran, pulse el botón + delante de la señal al lado de FP Res en la ventana de DNH para extender la jerarquía de los dispositivos y desplegar los módulos encontrados en la red.

La jerarquía debe incluir todos los módulos que han conectado al puerto de comunicaciones para el caso de la planta de procesos solo trabaja con dos módulos de entrada salida I/O, el módulo de entrada de corriente FP-AI-111 y el módulo de salida de corriente el FP-AO-200 además del módulo de red o módulo de comunicación FP-1000.

La Figura 3.18 muestra un ejemplo de jerarquía de dispositivos extendida. El nombre predefinido para cada dispositivo incluye el código del modelo de cada dispositivo de Field Point, a continuación una @, seguido entonces de la dirección del módulo en la interfase Fiel Point, esta dirección indica la posición de izquierda a derecha de cada módulo en la red por ejemplo, "FP-1000 @0."

Para cada módulo de entrada salida I/O encontrado, se crean ítems I/O, que contienen los canales de cada módulo, además otro ítem I/O es creado para representar todos los canales colectivamente en un módulo. El último paso es configurar de cada uno de los módulos de entrada salida, para las condiciones y requerimientos de la planta de procesos. La totalidad de los sensores y transductores con los que cuenta la planta operan dentro del rango de las señales estándares de corriente análoga es decir de 4 mA a 20 mA. Para la configuración de los módulos de entraca salida I/O, en el caso del Módulo de Nivel y Caudal, se toman en cuenta únicamente los sensores y transductores I/P que operan con este proceso. Esta información es guardada en archivo extensión IAK que crea el Fiel Point Explorer, para su posterior uso al ligarlo con el programa generado en Lab View.



Para iniciar la configuración de cada módulo de entrada salida de Field Point se localiza en la ventana DNH, en la jerarquía el dispositivo a configurar, se lo selecciona con el ratón y con el botón derecho del ratón se accede al menú del dispositivo, se selecciona editar el dispositivo (Edit this Device) y automáticamente se muestra una caja de dialogo llamada configuración del dispositivo (device configuration) como se muestra en la Figura 3.24 dentro de esta se permite variar los rangos de corriente para cada canal del módulo.

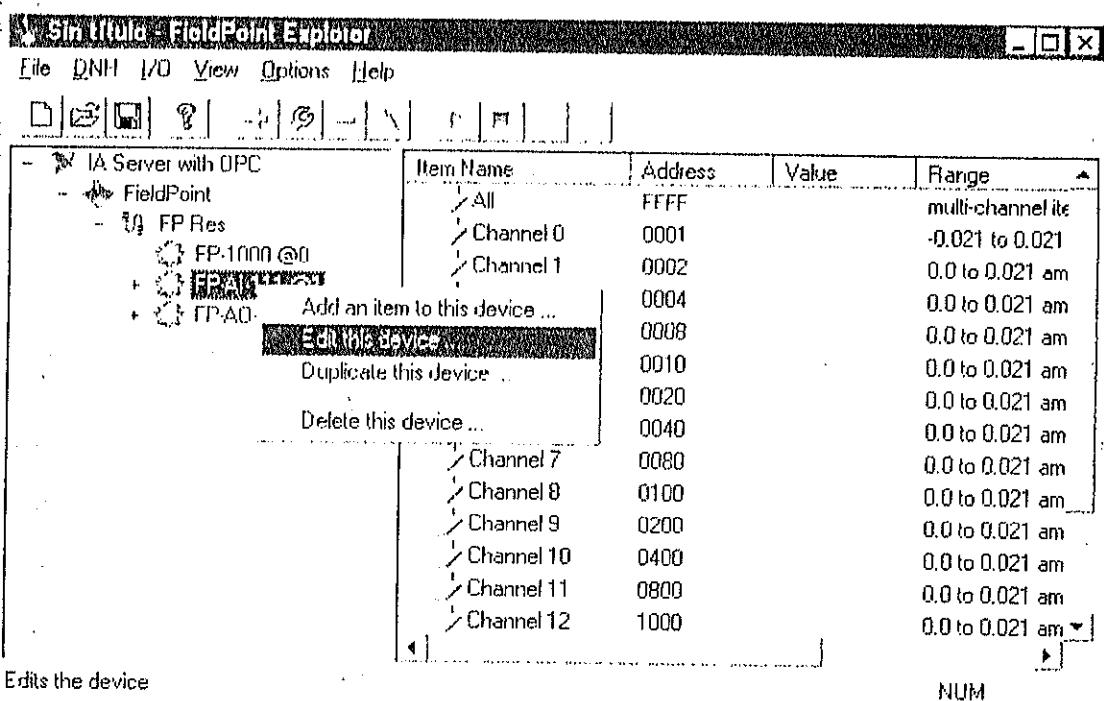


FIGURA 3.24. EDITAR DISPOSITIVO

## Configuración del Módulo FP-AI-111

Para la configuración del módulo de entrada de corriente FP-AI-111, en la ventana DNH seleccione el módulo y ejecute la opción de editar el dispositivo, automáticamente aparecerá la caja de dialogo Configuración de Dispositivo (Device Configuration) como se muestra en la Figura 3.25.

Dentro de esta caja de dialogo se presenta datos como el nombre del dispositivo el tipo de dispositivo la dirección de la posición en la internase Field Point.

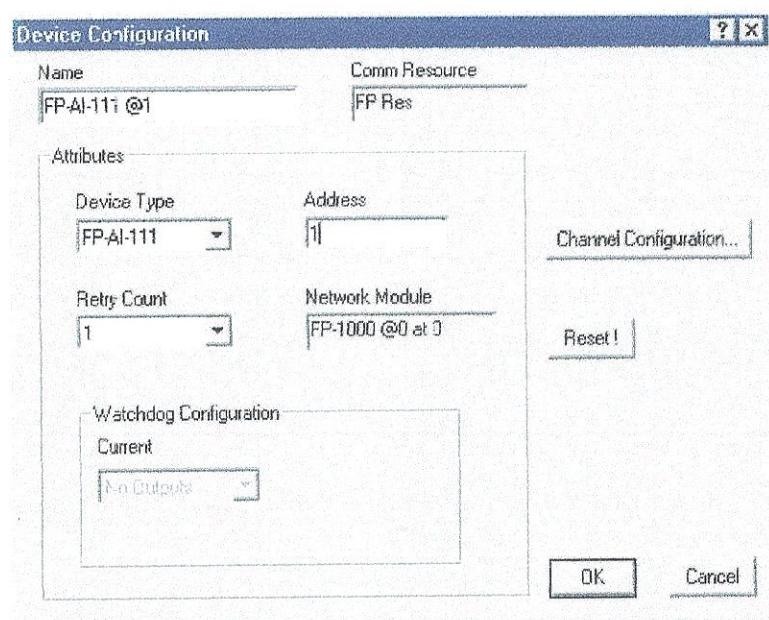


FIGURA 3.25. CONFIGURACIÓN DE DISPOSITIVO FP-AI-111

Dentro de esta caja de dialogo se presenta datos como el nombre del dispositivo, el recurso de comunicación FP Res en este caso , el tipo de dispositivo la dirección de la posición en la internase Field Point, también se pude de apreciar el tipo de módulo de red (Network Module).

Además encontramos el botón que nos lleva a la configuración de los canales (Channel Configuration) y el botón de receto que regresa la configuración a su estado original. Dentro de la opción de configuración de canales del módulo FP-AI-111 se presenta la ventana que muestra la Figura 3.26.

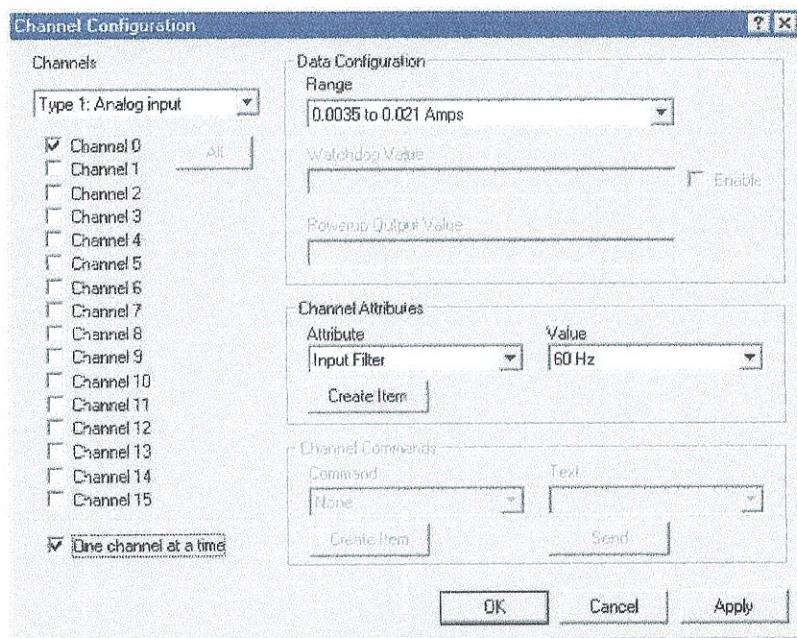


FIGURA 3.26. CONFIGURACION DE CANALES EN FP-AI-111

Esta ventana permite configurar todos los dieciséis canales que dispone el FP-AI-111 uno a uno o varios al mismo tiempo activando o desactivando la casilla de verificación (One Channel at a time) , dentro de la sección Configuración de Datos (Data Configuration) se puede cambiar el Rango (Range) de los amperios de entrada al módulo, para el caso de la planta de procesos todas las señales de entrada están dentro del rango de 0.00 a 0.021 Amps. Finalmente se aplican los cambios con el botón aplicar (Apply) y la configuración es aceptada.

### Configuración de ítems

Dentro de la ventana vista de lista en el Field Point Explorer se pueden monitorear cada uno de los dieciséis canales del módulo de entrada de corriente FP-AI-111, además del multicanal ALL, cuya configuración será de alta importancia para el desarrollo del sistema. Para iniciar el monitoreo de los canales se presiona el botón de **Inicio de monitoreo** (Star monitoring) en la barra de comandos, se lo pude detener de igual manera con el botón de **Parar monitoreo** (Stop monitoring) en la barra de comandos. Para configurar cada ítem, solo se requiere seleccionarlo y con el botón

derecho del ratón desplegar el menú y seleccionar **Editar este ítem** (Edit this item), como se muestra en la Figura 3.27 ,

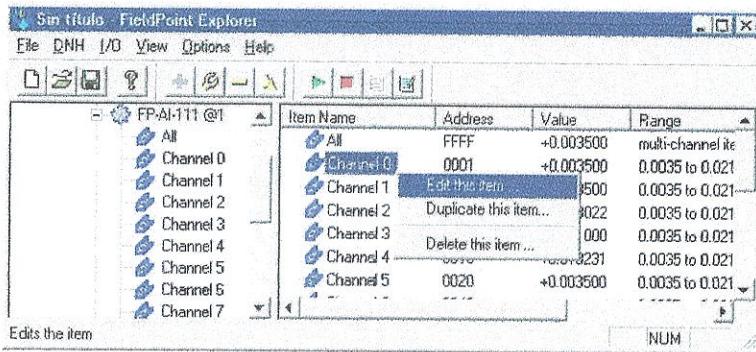


FIGURA 3.27. EDITAR ITEM EN FP-AI-111

Automáticamente aparece la ventana de **Configuración de Ítem** (Item configuration), como se muestra en la Figura 3.28.

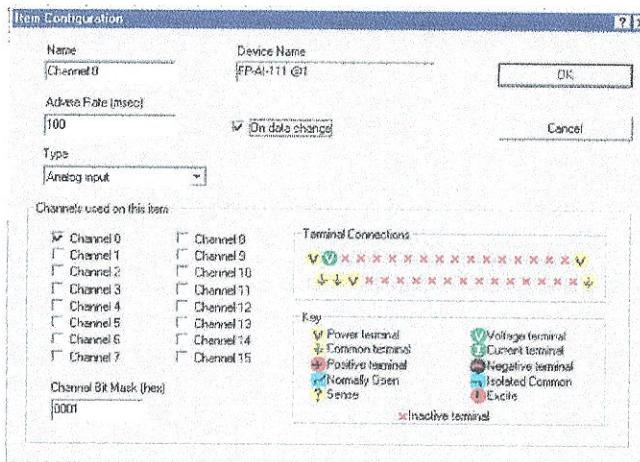


FIGURA 3.28. CONFIGURACION DE ITEM EN FP-AI-111

Dentro de la ventana de **Configuración de ítem** se puede cambiar el nombre del ítem, para que de este modo sea más reconocible a su aplicación. Para el desarrollo del sistema en la Planta de Procesos en el Módulo de Control de Nivel y Caudal que opera con tres señales de corriente provenientes de un sensor de caudal, un sensor de nivel y una señal de luz piloto de encendido de la bomba principal de la planta de procesos. Cada señal es conectada a un canal diferente en el módulo de entrada de corriente y pueden ser monitoreadas desde la ventana de vista de lista. Dentro de la programación en Lab View se hará referencia al archivo IAK que guarda la configuración de la internase y la información adquirida de cada sensor, pero para mayor facilidad en la programación de la interfase gráfica en Lab View se agruparon todas las señales en el ítem llamado ALL de este modo solo se hará referencia a un solo un ítem, en lugar de tres diferentes dentro de la programación en Lab View.

Al configurara este ítem para los tres canales de adquisición, la información de las señales se agrupan en forma matricial.

Los canales del FP-AI-111 utilizados para la Planta de Procesos en el módulo de Control de Nivel y Caudal para cada sensor son como se muestran en la tabla 20.

Sensor de caudal	Canal 1
Sensor de nivel	Canal 15
Luz Piloto de la bomba	Canal 12

TABLA 20 SELECCIÓN DE CANALES FP-AI-111

Para la configuración del ítem ALL, se realiza el procedimiento anterior y se selecciona en la casilla los canales antes mencionados en la tabla 20 el orden de menor a mayor es el orden en que esta información es guardada dentro de la matriz, para su posterior utilización en la programación en Lab View, después de cada cambio se recomienda guardar la configuración.

La Figura 3.28 muestra la configuración para el ítem ALL.

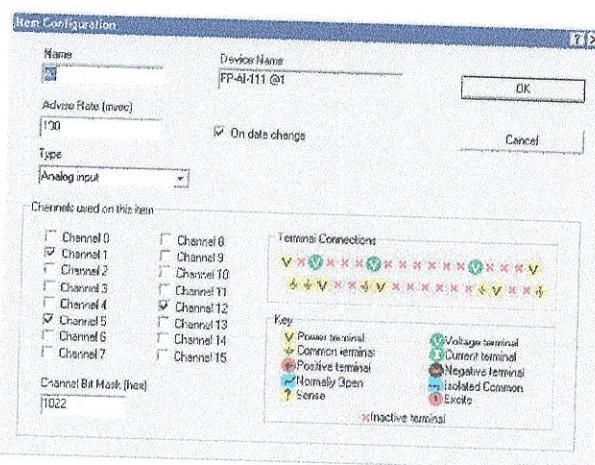


FIGURA 3.29. CONFIGURACION DEL ITEM ALL EN EL FP-AI-111

De este modo queda terminada la configuración del módulo de entrada de corriente FP-AI-111 a los requerimientos de la Planta de Procesos en el módulo de Control de Caudal y Nivel.

### Configuración del módulo FP-AO-200

Para la configuración del módulo de salida de corriente FP-AO-200, en la ventana DNH seleccione el módulo y ejecute la opción de editar el dispositivo, automáticamente aparecerá la caja de dialogo Configuración de Dispositivo (Device Configuration) como se muestra en la figura 3.30.

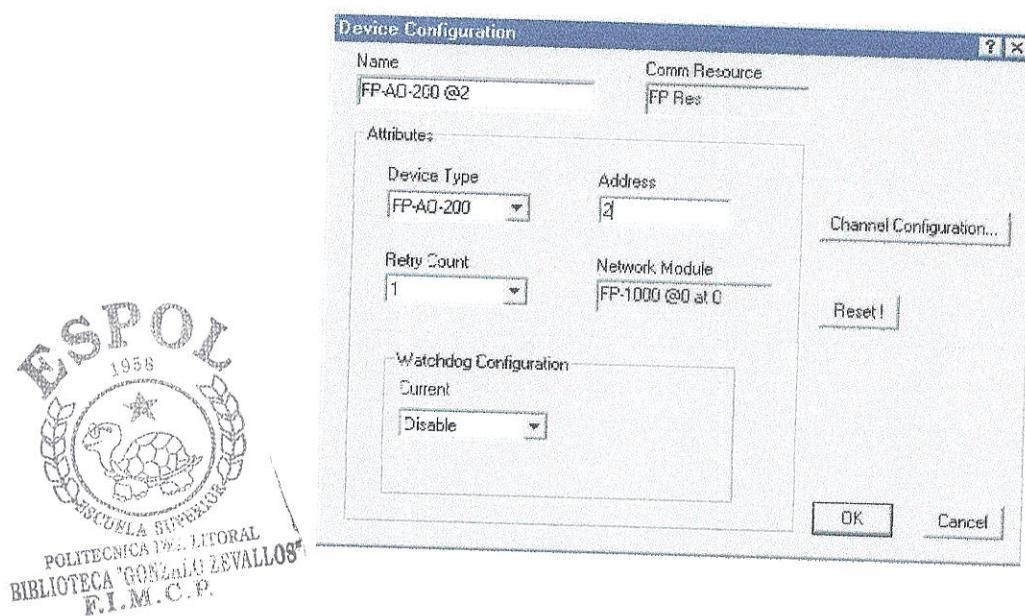


FIGURA 3.30. CONFIGURACIÓN DE DISPOSITIVO FP-AO-200

Dentro de esta caja de dialogo se presenta datos como el nombre del dispositivo el tipo de dispositivo, la dirección de la posición del módulo en la interfase Field Point, el nombre del recurso de comunicación FP Res , también especifica el nombre del módulo de red FP-1000 y su posición en la interfase, además encontramos el botón que nos lleva a la configuración de los canales (Channel Configuration). Dentro de la opción de configuración de canales del módulo FP-AI-111 se presenta la ventana que muestra la Figura 3.31.

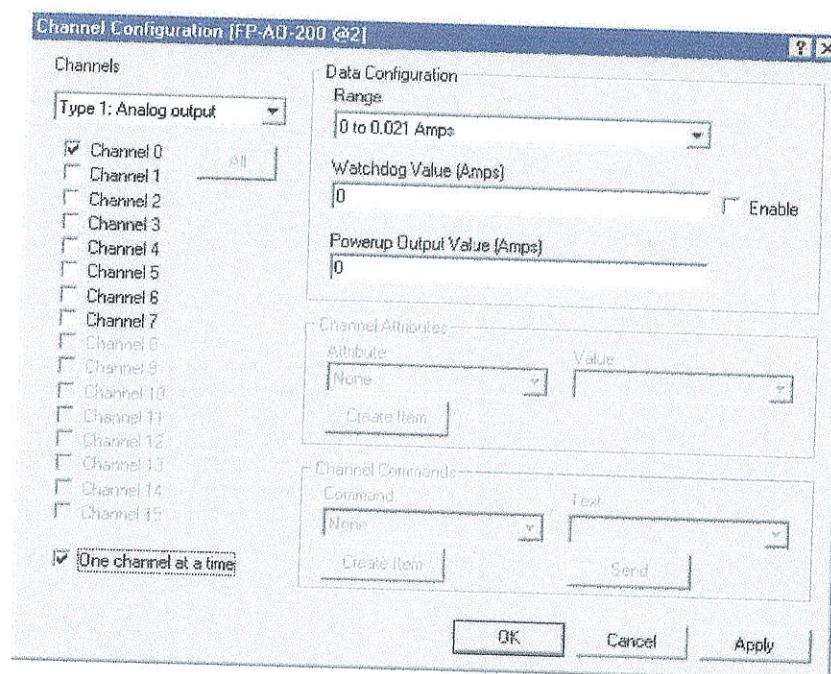


FIGURA 3. 31. CONFIGURACION DE CANALES EN FP-AO-200

Esta ventana permite configurar todos los ocho canales que dispone el FP-AO-200 uno a uno o varios al mismo tiempo activando o desactivando la casilla de verificación (One Channel at a time), dentro de la sección Configuración de Datos (Data Configuration) se puede cambiar el Rango (Range) de los amperios de salida del módulo, para el caso de la planta de procesos todas las señales de salida a los transductores de corriente a presión neumática, están dentro del rango de 0.000 a 0.021 Amps. Finalmente se aplican los cambios con el botón aplicar (Apply) y la configuración es aceptada.

### Configuración de ítems

Dentro de la ventana vista de lista en el Field Point Explorer se pueden monitorear cada uno de los ocho canales del módulo de salida de corriente FP-AO-200, además del multicanal ALL, cuya configuración será de alta importancia para el desarrollo del sistema. Para iniciar el monitoreo de los canales se presiona el botón de **Inicio de monitoreo** (Star monitoring) en la barra de comandos, se lo puede detener de igual manera con el botón de **Parar monitoreo** (Stop monitoring) en la barra de comandos. Para configurar cada ítem, solo se requiere seleccionarlo y con el botón

derecho del ratón desplegar el menú y seleccionar **Editar este ítem** (Edit this item), como se muestra en la Figura 3.32.

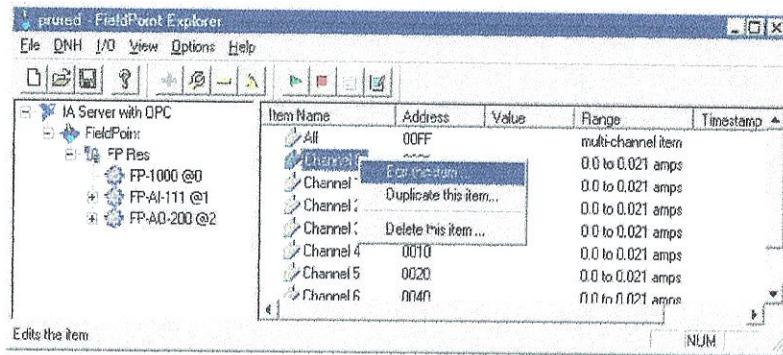


FIGURA 3.32. EDITAR ITEM EN FP-AO-200

Automáticamente aparece la ventana de **Configuración de ítem** (Item configuration), como se muestra en la Figura 3.33.

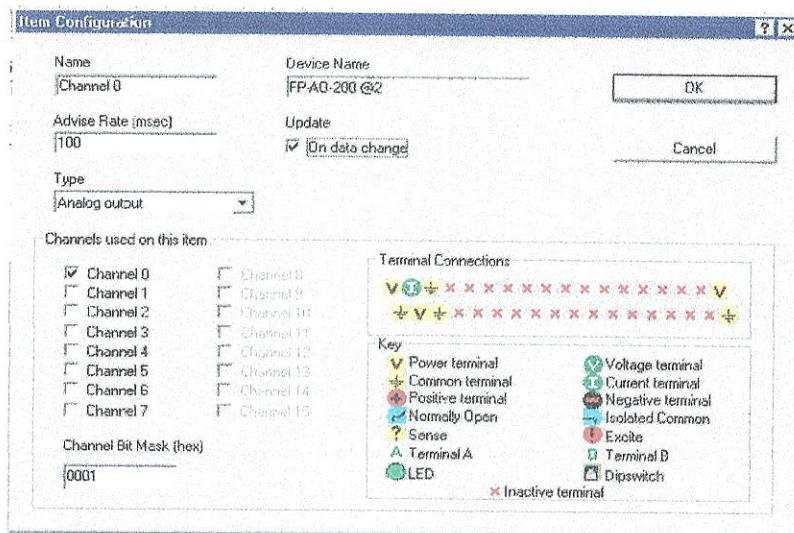


FIGURA 3.33. CONFIGURACION DE ITEM EN FP-AO-200

Dentro de la ventana de **Configuración de ítem** se puede cambiar el nombre del ítem, para que de este modo sea más reconocible a su aplicación. Además muestra el tipo de señal que sale del módulo, en este caso salida analógica de corriente (Analog Output).

También muestra las conexiones del ítem en la base terminal, y además una tabla que contiene simbología plenamente explicada de los terminales del módulo.

Para el desarrollo del sistema en la Planta de Procesos en el Módulo de Control de Nivel y Caudal se requiere operar dos válvulas de control neumáticas, estas dos válvulas son controladas por la computadora a través de transductores de corriente a presión I/P que convierte las señales de corriente de la computadora a señales neumáticas para el control de las válvulas

Cada señal es conectada a un canal diferente en el módulo de salida de corriente y pueden ser monitoreadas y además se pueden escribir valores de corriente a voluntad a cada salida independientemente desde la ventana de vista de lista, tan solo con dar clic con el ratón en la columna **Valor** (Value), en la fila del

canal que se deseé y se desplegará automáticamente la ventana

**Escribir Ítem (Item Write)** se muestra en la Figura 3.34.

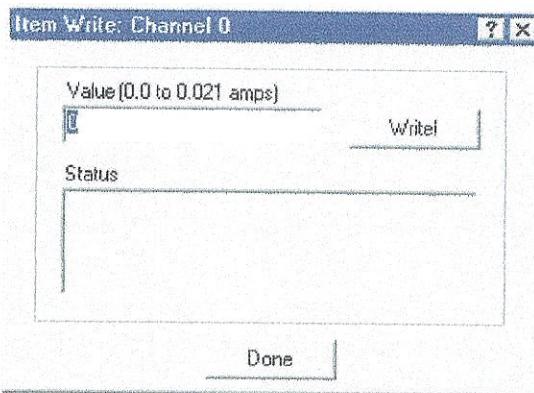


FIGURA 3.34. ESCRIBIR VALOR DE CORRIENTE EN UN íTEM  
EN FP-AO-200

Dentro de la programación en Lab View se hará referencia al archivo .IAK que guarda la configuración de la interfase y la información enviada a cada transductor I/P, pero para mayor facilidad en la programación de la interfase gráfica en Lab View se agruparon todas las señales en el ítem llamado ALL de este modo solo se hará referencia a un solo ítem, en lugar de dos diferentes dentro de la programación en Lab View. Al configurar este ítem para los dos canales de adquisición, la información de las señales se agrupan en forma matricial.

Los canales del FP-AO-200 utilizados para la Planta de Procesos en el módulo de Control de Nivel y Caudal para cada transductor I/P son como se muestran en la tabla 21.

Válvula neumática de control Normalmente Cerrada a transductor I/P	Canal 0
Válvula neumática de control Normalmente Abierta a transductor I/P	Canal 1

TABLA 21 SELECCIÓN DE CANALES FP-AO-200

Para la configuración del ítem ALL, se realiza el procedimiento anterior y se selecciona en la casilla los canales antes mencionados en la tabla 21 el orden de menor a mayor es el orden en que esta información es guardada dentro de la matriz, para su posterior utilización en la programación en Lab View, después de cada cambio se recomienda guardar la configuración. La Figura 3.34 muestra la configuración para el ítem ALL en ella se puede apreciar la selección de los canales que forman parte de este ítem el canal 0 y el canal 1, también se puede apreciar el tipo de módulo , en este caso el módulo de salidas analógicas de

corriente FP-AO-200. De este modo queda terminada la configuración del módulo de salida de corriente FP-AO-200, a los requerimientos de la Planta de Procesos en el módulo de Control de Caudal y Nivel.

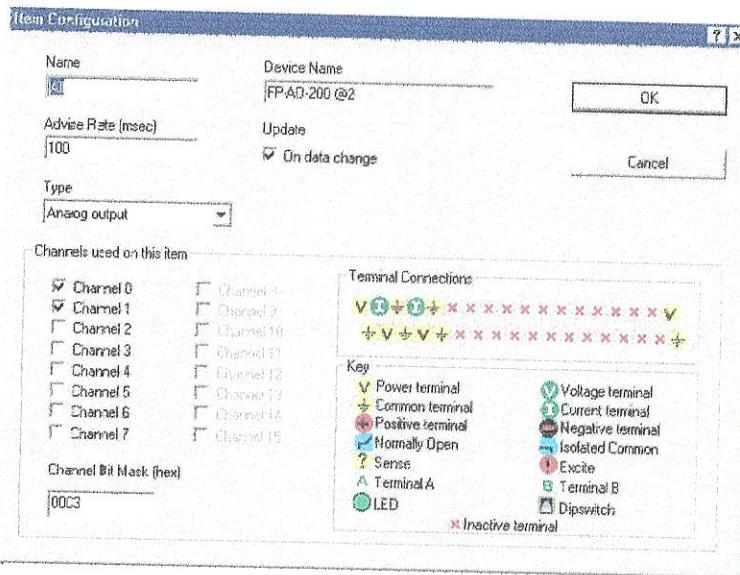


FIGURA 3.34. CONFIGURACION DEL ITEM ALL EN EL FP-AO-200

De este modo queda terminada la configuración del módulo de salida de corriente FP-AO-200, a los requerimientos de la Planta de Procesos en el módulo de Control de Caudal y Nivel. Solo restaría guardar la configuración de la interfase en el disco duro, para esto se crea un archivo de nombre pruebanivel-caudal.IAK, y se graba en el directorio raíz del disco duro, C:\pruebanivel-

caudal.IAK, tanto la ubicación como nombre de este archivo son de vital importancia para la programación en Lab VIEW, debido a que se debe de hacer referencia a este archivo en el momento que se desee adquirir o enviar señales de corriente análoga a través de la interfase Field Point al Módulo de Control de Nivel y Caudal.

### **3.2 Interfase Gráfica de Programación Lab VIEW**

Lab VIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje poderoso de instrumentación y análisis para PCs que corre bajo varios sistemas operativos incluyendo Microsoft Windows. Lab VIEW se distingue de la naturaleza secuencial de los lenguajes tradicionales de programación y provee un ambiente de programación gráfico con todas las herramientas necesarias para la adquisición, análisis y presentación de datos. Con este lenguaje gráfico de programación llamado "G", se puede programar utilizando una notación de diagramas de bloques, que es la notación de diseño natural para los ingenieros y científicos. Después de que se ha creado el programa con diagrama de bloques, Lab VIEW lo compila en código de máquina. Lab VIEW integra la adquisición, el análisis y la presentación de datos en un solo sistema. Para adquirir datos y controlar instrumentos, Lab VIEW tiene funciones de RS-232 / 485, VISA (Virtual Instrument



Software Architecture), y también soporta tarjetas insertables de adquisición de datos, DAQ. Existen librerías de instrumentos que contienen manejadores para cientos de instrumentos y simplifican las aplicaciones de control de instrumentos.

Para análisis de datos, la extensa librería de análisis contiene funciones para generación de señales, filtros de procesamiento de señales, ventanas, estadística, regresión, álgebra lineal y aritmética de arreglos.

### 3.2.1. Descripción de la programación en Lab VIEW

Los programas en Lab VIEW son llamados instrumentos virtuales (VIs). Los VIs tiene tres partes principales: El panel frontal, el diagrama de bloques y el icono conector.

El panel frontal permite dar valores de entrada y ver los valores de salida del diagrama de bloques del VI. Dado que el panel frontal es análogo al panel frontal de un instrumento, las entradas son llamadas controles y las salidas son llamadas indicadores. Se puede utilizar una gran variedad de controles e indicadores como perillas, interruptores, botones gráficas, etc. Los controles e indicadores ayudan para que el panel frontal se fácil de entender y a que sus elementos se identifiquen rápidamente. A continuación la Figura 3.35 muestra un ejemplo de panel frontal.

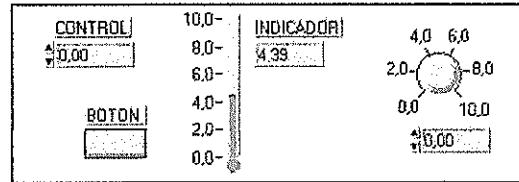


FIGURA 3.35. EJEMPLO DE CONTROLES E INDICADORES

Cada panel frontal es acompañado de un diagrama de bloques que es el programa del VI. Se puede construir diagramas de bloques utilizando el lenguaje de programación gráfica G. Se puede pensar que el diagrama de bloques es el código fuente de su programa.

Los componentes del diagrama de bloques representan los nodos del programa: por ejemplo, ciclos For, estructuras Case, y funciones aritméticas . Los componentes se “conectan” para definir el flujo de datos dentro del diagrama de bloques, a continuación se muestra un diagrama de bloques en la Figura 3.36.

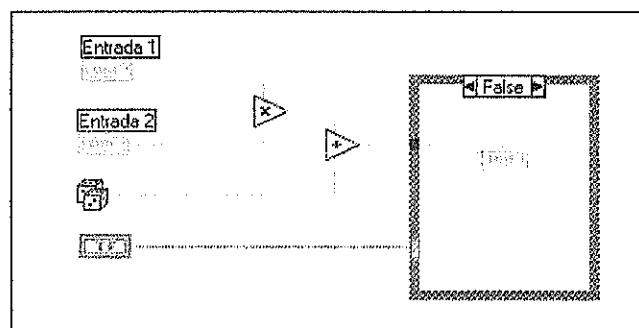


FIGURA 3.36. DIAGRAMA DE BLOQUES

Para convertir un VI en un objeto (subVI) se utiliza el icono/conector. Un subVI se puede utilizar como una "subrutina" dentro de los diagramas de bloques de otros VIs.

El icono representa gráficamente al VI dentro del diagrama de bloques y lo diferencia de otros VIs. El conector de terminales determina en donde se deben alambrar las entradas y salidas del icono. Las terminales son análogas a los parámetros de una subrutina y corresponden y corresponde a los controles e indicadores del panel frontal del VI. A continuación la Figura 3.37 muestra un ejemplo de de un icono y conector de un VI. Usualmente el conector permanece escondido debajo del icono hasta que usted elige verlo.

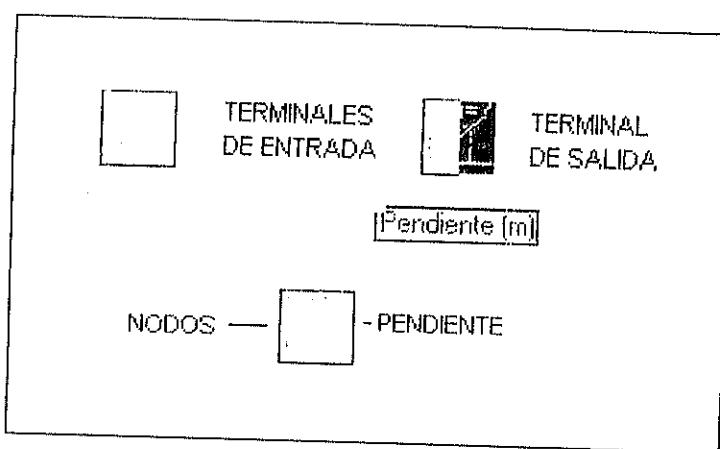


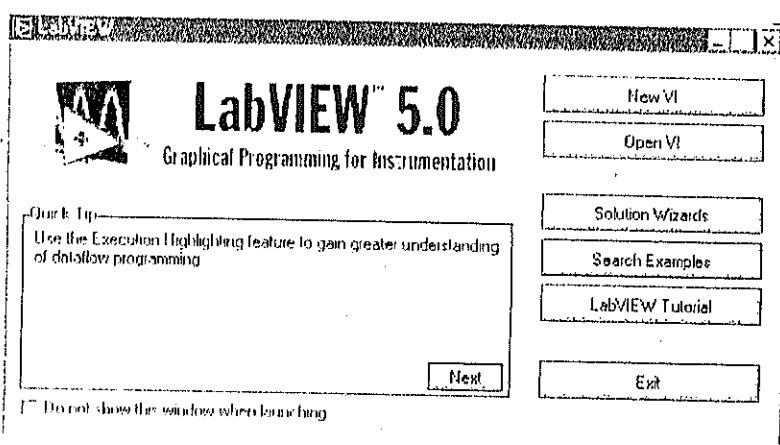
FIGURA 3.37. ICONO CONECTOR

El poder de Lab VIEW reside en la naturaleza jerárquica de un VI.

Después de crear un VI, se puede utilizarlo como un subVI en el diagrama de bloques de un VI de nivel más alto. No existe límite en el número de jerarquías.

### **La Ventana de Inicio de Lab VIEW**

La siguiente ventana de inicio de Lab VIEW aparece al oprimir el botón del mause sobre el icono de Lab VIEW, Figura 3.38.



**FIGURA 3.38. VENTANA DE INICIO DE LAB VIEW**

**New VI** : crea un VI nuevo.

**Open VI**: Abre un VI existente.

**DAQ Solucion Wizard** : Ejecuta una utilería interactiva que permite crear aplicaciones de adquisición de datos.

**Lab VIEW Tutorial** : Abre un tutorial interactivo y se presenta la información de modo verbal.

**Exit:** Termina la ejecución de Lab VIEW.

A continuación se explicara las dos ventanas de un VI nuevo.

### **Ventanas de Panel Frontal y Diagrama de Bloques**

Al seleccionar **New VI** en la ventana de inicio de Lab VIEW, una nueva ventana de panel sin título aparece en la pantalla. La ventana del panel despliega el panel frontal del VI; esta es una de las dos ventanas que se utilizan en Lab VIEW para construir un VI. La otra ventana, la ventana de diagrama, contiene el diagrama de bloques. Los paneles frontales y el diagrama de bloques están constituidos por una colección de objetos gráficos que son los elementos programables de Lab VIEW.

Los paneles frontales contienen varios tipos de controles e indicadores. Los diagramas de bloques consisten en terminales que corresponden a los controles e indicadores del panel frontal, así como constantes, funciones, SubVIs, estructuras, y cables que transportan datos de un objeto a otro. Cada indicar o control



utilizado en el panel frontal se corresponde con un terminal en la ventana de diagrama de bloques, desde la cual se pueden cablear estos terminales para dirigir la información como entradas en el caso de los terminales de un control o como salidas para el caso de los terminales un indicador.

La Figura 3.39 muestra un panel frontal y programa asociado. En el panel frontal se aprecian elementos tales como interruptores, perillas y gráficas de barrido, mientras en el diagrama de bloques entramos estructuras, funciones randomicas y funciones de control de tiempo.

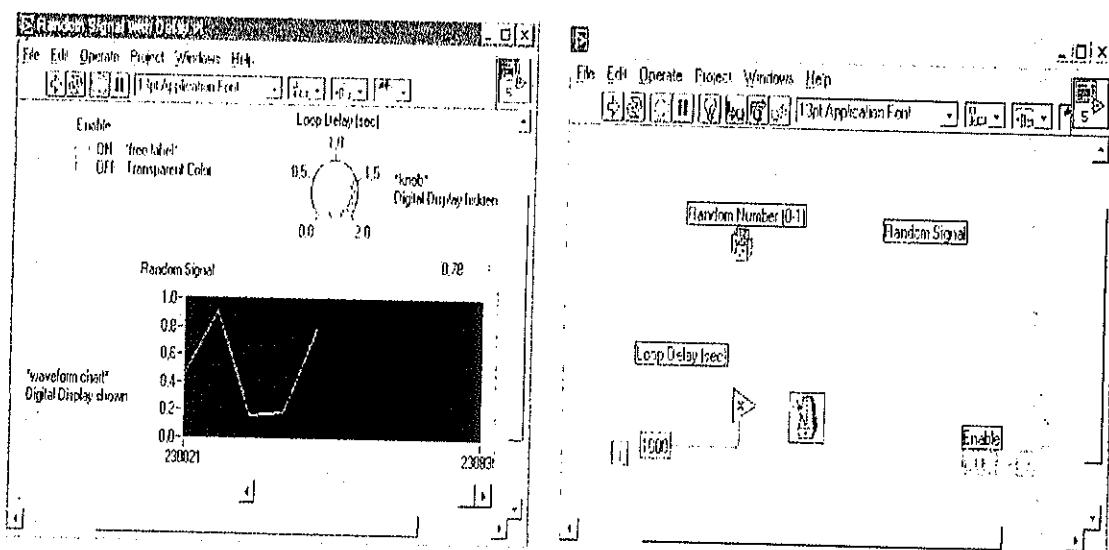
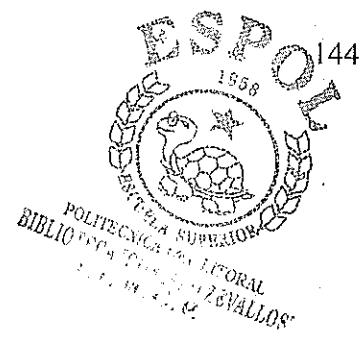


FIGURA 3.39. PANEL FRONTAL Y DIAGRAMA DE BLOQUES



### 3.2.2. Definición de Íconos.

Dentro de esta sección se dará a conocer las barras de herramientas con que cuentan tanto el panel frontal como el diagrama de bloques además de las paletas de herramientas, funciones y controles.

Cada una de estas paletas y barras de herramientas contienen iconos que representan las funciones, esta información se requiere para comprender el funcionamiento y la programación en LabVIEW.

#### Barra de Herramientas del Panel Frontal

Las ventanas de panel y de diagrama contienen barras de herramientas con botones de comandos e indicadores de estado que se utilizan para controlar el VI, dependiendo si está trabajando en la ventana de panel frontal o en la de diagramas. Estas dos barras son similares.

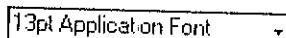
La Figura 3.40 muestra la barra que aparece en la parte superior del panel frontal.



FIGURA 3.40. BARRA DE HERRAMIENTA DEL PANEL FRONTAL.

- ☒ El botón de Ejecución. Para correr el VI, oprima el botón de ejecución con el botón izquierdo del mause , cuando el VI se está ejecutando, el botón cambia a ☒
- ☒ El botón de Ejecución roto. Este botón reemplaza al botón de Ejecución e indica que el VI no se puede compilar porque tiene errores. Para encontrar las causas del error oprima el botón izquierdo del mause sobre este botón automáticamente aparece una ventana con una lista de errores.
- ☒ El botón de Abortar la Ejecución aparece mientras el VI se esta ejecutando. Oprima el botón izquierdo del mause sobre este botón para parar la ejecución del VI.
- ☒ El botón de Ejecución Continua . Oprima este botón con el botón izquierdo de mause para ejecutar el VI repetidamente.
- ☒ Mientras se encuentra en modo de Ejecución continua, el icono cambia como se muestra y solo basta oprimirlo para deshabilitar la función.

 El botón de Pausa/Continuar. Este botón hace una pausa en la ejecución del VI. Para continuar desde el modo de Pausa oprima el botón otra vez, y el VI continuara la ejecución.

 13pt Application Font El Anillo de Fuentes. Este anillo permite seleccionar opciones de texto, incluyendo tipos de fuente, tamaño y color.

 El Anillo de Alineación. Se puede usar la herramienta de Posicionamiento para seleccionar los elementos que deseen alinear, después se elige las opciones de alineación, incluyendo vertical, esquinas superiores, izquierda etc., para dos o mas objetos.

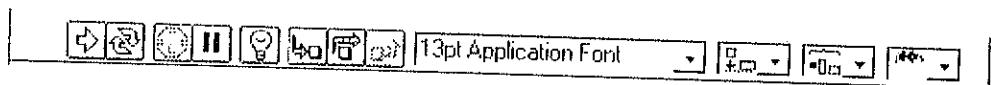
 El Anillo de Distribución. Se puede usar la herramienta de Posicionamiento para seleccionar los elementos que deseen alinear, después se elige las opciones de distribución, espacios, compresión etc., para dos o más objetos.

 El Anillo de Reordenación, este anillo se utiliza cuando varios objetos se encuentran empalmados, y se requiere definir que objeto esta al frente o atrás de otro objeto. Seleccione uno de

los objetos utilizando la herramienta de posicionamiento y después seleccione alguna de las siguientes opciones: Mover Adelante, Mover Atrás , Mover al Frente, Mover al Fondo.

### **Barra de Herramientas del Diagrama de Bloques.**

La barra de herramientas del diagrama de bloques contiene casi los mismos botones de la barra de herramientas del panel frontal, pero además contiene cuatro herramientas útiles para depuración.



**FIGURA 3.41. BARRA DE HERRAMIENTAS DEL DIAGRAMA DE BLOQUES**

El botón de animación de Ejecución. Presione este botón con el botón izquierdo del mouse para animar la ejecución.

Cuando se activa esta función el ícono cambia a iluminado. Este modo permite ver el flujo de datos a través del diagrama de bloques.

El botón de Pasar Sobre. Oprima este botón con el botón izquierdo del mouse para habilitar el modo paso a paso, este modo permite parar en cada uno de los modos del VI.



Este modo hace que los nodos parpadeen para denotar que están listos para ejecutarse. Presione en el botón de Pasar Sobre con el botón izquierdo del mouse si desea saltar un ciclo, subVI, etc. Al saltar el nodo este no se ejecuta paso a paso.



El botón Entrar A. Al presionar este botón permite entrar al ciclo, subVI, etc. De este modo esta lista para hacer ejecución paso a paso dentro del nodo.



El botón de Salir De. Al presionar este botón permite salir de un ciclo, subVI, etc. Así se completa la ejecución paso a paso de ese nodo y se puede ir al siguiente nodo.

### **Paleta de Herramientas**

Se puede crear, modificar, y depurar VIs utilizando las herramientas localizadas en la paleta flotante de herramientas. Si la paleta de herramientas no está visible, seleccione la opción de **Show Tool Palette** enseñar la Paleta de Herramientas del menú de **Windows**

para desplegar la paleta. Después de haber seleccionado la herramienta de este menú, el cursor del mouse toma esa forma.

Ponga cualquier herramienta de la paleta **Tools** sobre un subVI o icono de una función, para desplegar información sobre ese subVI o

función en la ventana de ayuda. Primero debe seleccionar la opción de **Show Help** en el menú **Help**. La Figura 3.42 muestra la paleta flotante de herramientas.

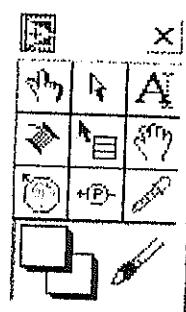


FIGURA 3.42. PALETA DE HERRAMIENTAS

A continuación se detallara cada uno de los botones de la paleta flotante de herramientas

 **Herramienta de Operación.** Se puede utilizar la herramienta de operación para manipular los controles del panel frontal.

 **Herramienta de Posicionamiento.** Se puede utilizar la herramienta de posicionamiento para seleccionar, mover o redimensionar objetos.

 **Herramienta de Etiquetado.** Se usa la herramienta de etiquetado para escribir texto en etiquetas.

 **Herramienta de Cableado.** Se usa la herramienta de

cableado para cablear objetos en el diagrama de bloques.

 **Herramienta de Pop-up.** Se usa esta herramienta para tener acceso al menú pop-up de un objeto al oprimir el botón derecho del mouse.

 **Herramienta de Deslizamiento.** Se usa esta herramienta para deslizarse a través de las ventanas sin usar las barras de desplazamiento.

 **Herramienta de Puntos de Detención.** Se usa esta herramienta para poner puntos de ruptura en un VIs, funciones y estructuras.

 **Herramienta de Pruebas.** Se usa esta herramienta para poner pruebas en los cables del diagrama de bloques.

 **Herramienta de Copiado de Color.** Se usa la herramienta de copiado de color para copiar colores e insertarlos con la herramienta de color.

 **Herramienta de Color.** Se usa la herramienta de color para colorear un objeto. Esta herramienta también despliega el color del fondo y del primer plano del objeto.

## Paleta de Funciones y Controles

Las paletas de funciones y controles consisten en iconos de alto nivel que representan las subpaletas dando acceso a un gran rango de objetos que están disponibles para crear un VI. Se puede acceder a las paletas al oprimir el botón del mouse sobre un ícono de alto nivel. Para convertir la subpaleta en una paleta flotante para que permanezca en la pantalla, presione la tachuela de la esquina superior derecha de la subpaleta.

## Paleta de Controles

Se puede añadir controles e indicadores al panel frontal utilizando la paleta de Controles. Cada opción de la paleta despliega una subpaleta con los controles e indicadores disponibles para esa selección. Si la paleta de controles no está visible, se puede abrir seleccionando Enseñar Paleta de Control (**Show controls Palette**) en el menú Windows. La paleta también se puede acceder al oprimir el botón derecho del mouse en una área abierta de la ventana del panel frontal. Una vez que la paleta aparece en la pantalla, se puede hacer que esta se convierta en una paleta flotante presionando la tachuela que se encuentra en la esquina

superior izquierda de la paleta. La paleta de controles únicamente está disponible cuando la ventana del panel frontal está activa. La Figura 3.43 muestra la paleta de controles.

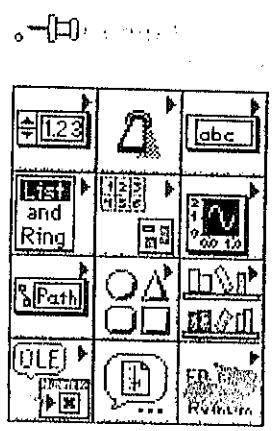


FIGURA 3.43. PALETA DE CONTROLES

A continuación se explicara cada una de las subpaletas que contiene la paleta de controles.



**Subpaleta Numeric (Numérica).** Consiste en indicadores y controles de datos numéricos.



**Subpaleta Boolean (Booleana).** Consiste en indicadores y controles para valores booleanos.



**Subpaleta String (Cadena de Caracteres).** Consiste en controles e indicadores para cadena de caracteres y tabas.



**Subpaleta Listin & Ring (Lista y Anillos).** Consiste en los

controles e indicadores de menús de anillos y las listas de texto.



**Subpaleta Array & Cluster (Arreglos y Clusters).** Consiste en los controles e indicadores que agrupan conjuntos de tipos de datos.



**Subpaleta Graph (Gráficos).** Consiste en indicadores para graficar datos.



**Subpaleta Paths & Refnums (Rutas y Refnums).** Consiste en los controles e indicadores para rutas de archivos y refnums.



**Subpaleta Decoration (Decoración).** Consiste en objetos gráficos que permiten decorar y modificar los objetos del panel frontal.



**Subpaleta User Controls (Controles de Usuario).** Almacena los controles creados por el usuario.



**Subpaleta Active X.** Consiste en controles e indicadores que permiten tener la capacidad de ser un Contenedor ActiveX.



**Subpaleta Select a Control (Selección de Control).** Despliega una ventana de dialogo que permite utilizar controles creados por el usuario.



**Subpaleta Field Point.** Contiene los controles e indicadores de la interfase Field Point.



## Paleta de Funciones

Los diagramas de bloques se construyen utilizando la paleta de funciones. Cada opción de la paleta despliega una subpaleta con los iconos de alto nivel. Si la paleta de funciones no esta visible, se puede abrir seleccionando la opción Mostrar Paleta de Funciones (**Show Function Palette**) del menú de Windows. La Paleta de Funciones también se puede accesar al presionar el botón derecho del mouse sobre un área abierta de la ventana de diagrama. Para convertir la paleta de funciones en una paleta flotante presione la tachuela que esta en la esquina superior de la subpaleta. La paleta de funciones únicamente está disponible cuando la ventana del diagrama se activa. La Figura 3.44 muestra la paleta de funciones.

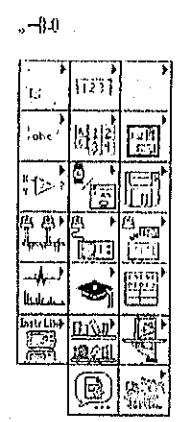


FIGURA 3.44. PALETA DE FUNCIONES

A continuación se presentaran cada una de las subpaletas de la paleta de funciones.



**Subpaleta Structures (Estructuras).** Contiene estructuras de control del programa tales como Ciclo For.



**Subpaleta Numeric (Numérico).** Contiene funciones aritméticas, trigonométricas, logarítmicas y numéricas.



**Subpaleta Boolean (Booleana).** Contiene funciones lógicas y bocleanas.



**Subpaleta String (Cadena de Caracteres).** Contiene funciones para manipular cadena de caracteres.



**Subpaleta Array (Arreglos).** Contiene funciones para procesar arreglos.



**Subpaleta Cluster.** Contiene funciones para procesar agrupamientos.



**Subpaleta Comparisom (Comparación).** Contiene funciones para comparar números, booleanos y cadena de caracteres.



Contiene funciones para ventanas de dialogo, control de tiempo y manejo de errores.



**Subpaleta File I/O (Manejo de Archivos).** Contiene funciones y VIs para manejo de archivos.





**Subpaleta Communication (Comunicacion).** Contiene VIs para implementar TCP, DDE, Eventos Apple y Ole.



**Subpaleta Instrument I/O (Instrumentos)** Contiene VIs para establecer comunicación con instrumentos que usan GPIB, VISE, o comunicación de serie.



**Subpaleta Data Acquisition (Adquisición de datos)** Contiene VIs que adquieren y generan en tiempo real datos analógicos y digitales a demás contiene operaciones de conteo.



**Subpaleta Análisis** contiene VIs para el procesamiento de señales digitales, filtros, funciones de probabilidad y estadística, el álgebra lineal, operaciones de arreglos, y a demás VIs que realizan métodos numéricos.



**Subpaleta Tutorial** Los VIs Tutelares provee ejemplos que se pueden usar mientras esta trabajando a través de el LabView Usuario Manual.



**Subpaleta Advanced (Avanzadas)** Contiene VIs para funciones de alta especialidad a demás manipulación de datos y funciones para manejo del puerto LPT.



**Subpaleta Instruments Drivers (manejadores de instrumentos)** Contiene un grupo de VIs manejadores para instrumentos tanto de National Instruments como de otros fabricantes.



**Subpaleta User Libraries (Librerías del Usuario)** Esta paleta permite incorporar VIs al directorio User.lib para tener más rápido acceso a los VIs más utilizados.



**Subpaleta Application Control (Control de Aplicaciones)** Esta paleta incluye la funciones de ayuda, funciones de menú, impresión de VIs, y VI Servidor VIs.



**Función Select A VI... (Seleccionar un VI)** La función Seleccionar un VI... le permite seleccionar cualquier VI usando una caja de diálogo para incorporarlo en un diagrama de bloques.



**Subpaleta Field Point.** Contiene VIs para comunicación con la interfase Field Point.

### 3.2.3. Definición de Sub Rutinas (Sub VIs)

La clave para crear aplicaciones en Lab View e entender y utilizar la naturaleza jerárquica del VI. Esto es, una vez que un VI es creado, éste se puede utilizar como un subVI en el diagrama de bloques de un VI de un nivel más alto. Si un diagrama de bloques tiene muchos iconos, se puede agruparlos en un VI de bajo nivel para mantener la simplicidad del diagrama de bloques. Este procedimiento modular hace que las aplicaciones sean fáciles de depurar, entender, y mantener. Para convertir un VI en subVI el paso más importante es crear el ícono conector el cual permite ver el subVI dentro del diagrama de bloques como un ícono el cual solo restaría cablear para que funcione como una sub rutina dentro del VI de mas alto nivel. Todo VI tiene un ícono predeterminado que es desplegado en la esquina superior derecha de la ventana de diagrama y de panel. El ícono predeterminado a los VIs es el logo de Lab View y un número que indica cuantos VIs nuevos se encuentran abiertos. El editor de íconos se utiliza para diseñar el ícono al prender y apagar sus diferentes píxeles. Para activar el Editor de Íconos, oprima el botón derecho del mouse sobre la esquina superior derecha de la ventana del panel y seleccione **Edit Icon** como lo muestra la Figura 3.45.

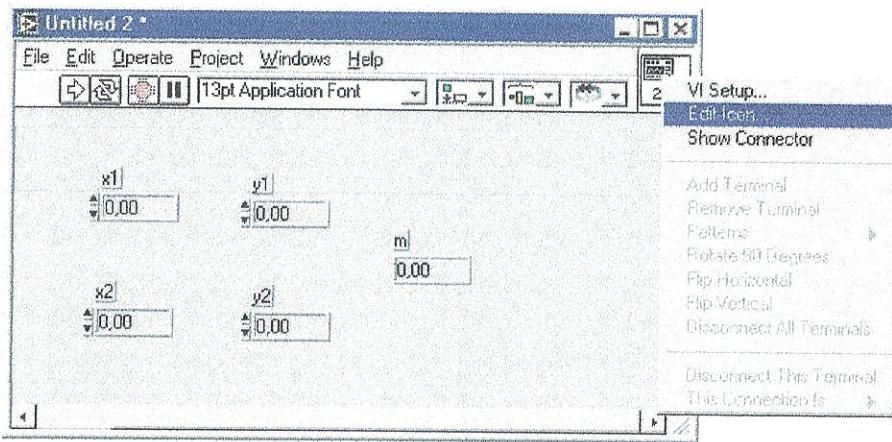


FIGURA 3.45. EDICION DE ICONO CONECTOR

Al seleccionar esta opción aparecerá la ventana de edición de ícono, esta ventana cuenta con herramientas para dibujar y elaborar un ícono que represente el subVI, con el propósito de que sea fácilmente reconocible, la Figura 3.46 muestra la ventana de edición de ícono.

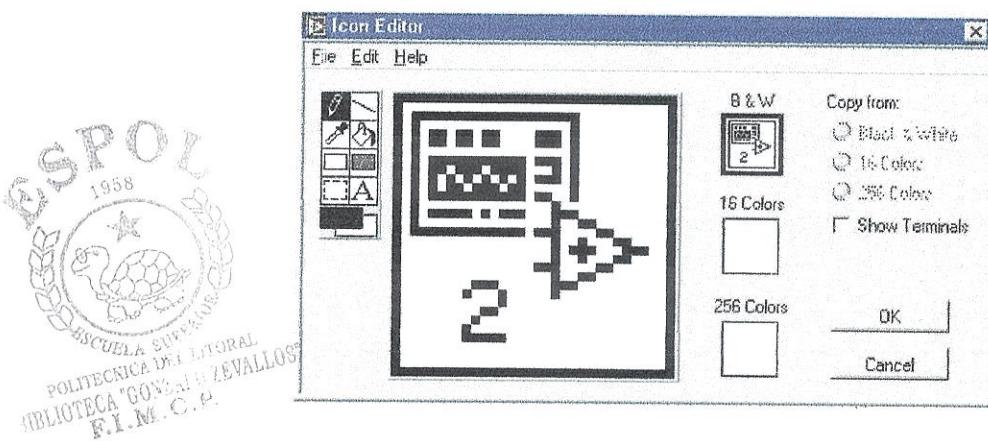


FIGURA 3.46. VENTANA DE EDICIÓN DE ICONO CONECTOR

Después de la edición de ícono para el subVI este reemplaza al ícono que se encuentra en la esquina superior derecha de la ventana del panel frontal. Para terminar la creación de un subVI es necesario inciar en el ícono cuales son las entradas y las salidas de datos al ícono del subVI, para esto Lab View selecciona el patrón apropiado para las conexiones, al desplegar el menú del ícono de la esquina superior derecha , seleccionando la opción Show Conector, se muestra el patrón de conexiones, se localizan las entradas a la izquierda del ícono y las salidas a la derecha, existen tantas entradas como controles en el panel frontal del subVI y tantas salidas como indicadores en el panel frontal del subVI. La Figura 3.47 muestra el ícono conector, cada casilla corresponde a una conexión, para indicar cual casilla corresponde a cada control se utiliza la herramienta de

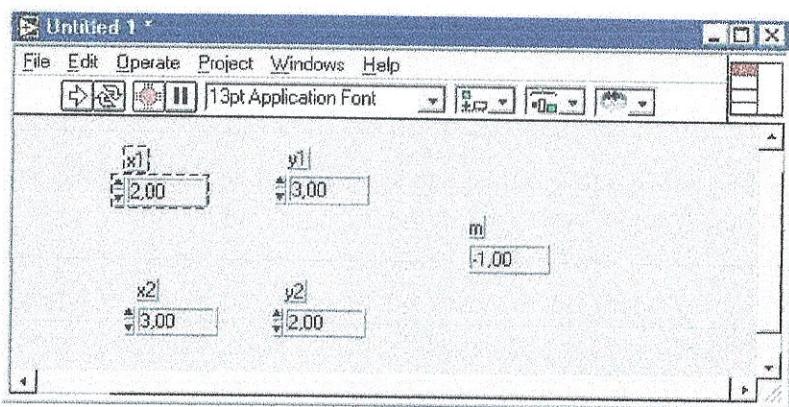


FIGURA 3.47. CABLEADO DE ICONO CONECTOR

cableado, con el mouse se selecciona una casilla en el ícono conector y se cablea con su correspondiente control o indicador. Para finalizar este proceso solo resta grabar el subVI, de este modo queda listo para ser usado dentro de cualquier VI.

### **3.2.4. Descripción de ciclos For, While, Case, Sequence**

Las estructuras controlan el flujo de datos de un VI. Lab View tiene cuatro estructuras que controlan el flujo de un programa: el Ciclo While, el Ciclo For, la estructura Case, y la estructura de Secuencia.

#### **Ciclo While.**

Un Ciclo While repite una parte del código del diagrama de bloques múltiples veces. Para poner un Ciclo While en el diagrama de bloques es necesario seleccionarlo de la subpaleta Estructuras (Structures) de la paleta de Funciones. El VI repite el código dentro del Ciclo While hasta que el valor Booleano pasado a la terminal condicional (una terminal de entrada) sea FALSO. El VI revisa la terminal condicional al final de cada iteración; por lo tanto el Ciclo While siempre se ejecuta una vez. La terminal de iteración es una

terminal numérica de salida que contiene el número de veces que el ciclo se ha ejecutado, comenzando desde cero. En otras palabras se ejecuta el ciclo hasta que la condición se verdadera. La Figura 3.48 muestra la estructura del Ciclo While.

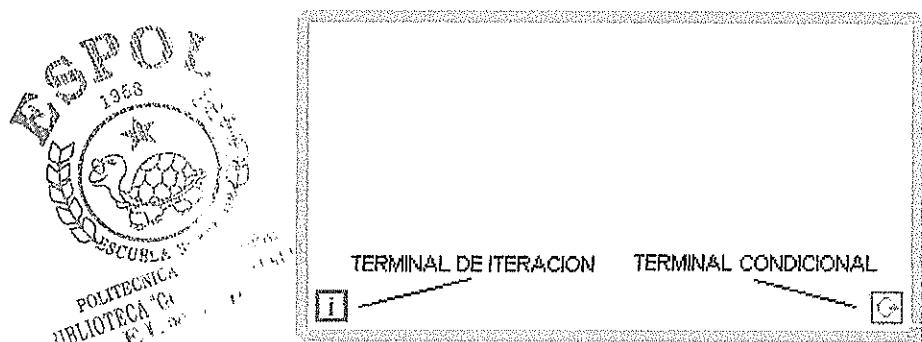


FIGURA 3.48. CICLO WHILE

### Ciclo For

Un Ciclo For repite parte del código del diagrama de bloques un número predeterminado de veces. Para utilizar un Ciclo For, hay que seleccionarlo de la subpaleta estructuras (Structures) de la paleta Funciones, y después encerrar el código que se va a repetir dentro de los límites del Ciclo For .

El Ciclo For cuenta con dos terminales: la terminal de cuenta especifica el número de veces que se va a repetir el ciclo, esta es una terminal de entrada y la terminal de iteración contiene el

número de veces que se ha ejecutado el ciclo, esta es una terminal de salida. La diferencia entre Ciclo For y Ciclo While es que el Ciclo For se ejecuta un número predeterminado de veces, un Ciclo While deja de repetir el código que está encerrado dentro de sus límites únicamente si el valor de la terminal condicional es Falso. La Figura 3.49 muestra un Ciclo For con una terminal de cuenta cableada a una constante de cien.

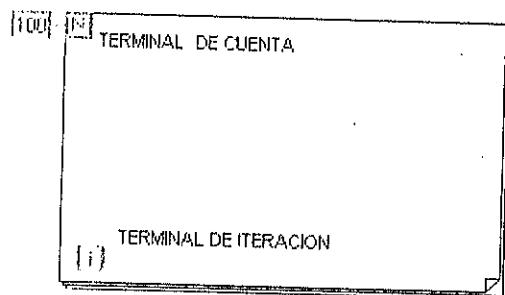


FIGURA 3.49. CICLO FOR

### Estructura Case

La estructura case se parece a una baraja de naipes en donde solo se puede ver una carta o un caso a la vez, cada caso contiene un subdiagrama. Solo mente se puede ejecutar un caso y su ejecución depende del valor conectado a la terminal de selección. La terminal de selección puede ser numérica o booleana. Si el tipo de dato es

booleano la estructura se basa en un caso verdadero y en uno falso, si el tipo de dato es numérico la estructura puede contar hasta con  $2^{31}$  casos. Para colocar una estructura Case en la ventana de diagrama de bloques, selecciónela de la subpaleta Estructuras (Structures) de la paleta de Funciones, se puede encerrar nodos con la estructura o se puede arrastrar nodos hacia el interior de ésta. La Figura 3.50 muestra la estructura Case en el diagrama de bloques.

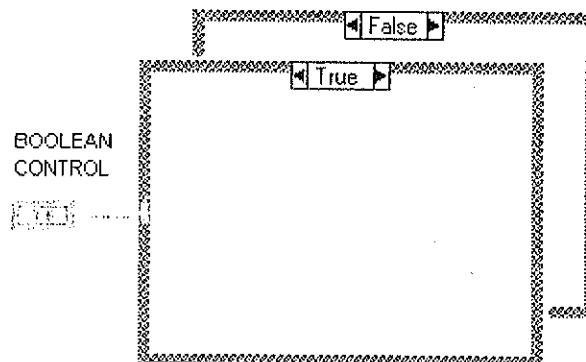


FIGURA 3.50. ESTRUCTURA CASE

### Estructura Sequence

La estructura de secuencia se asemeja a un rollo de película, ejecuta los diagramas dentro de los marcos en una secuencia establecida. En programación basada en flujo de datos, un nodo se

ejecuta cuando toda la información se encuentra disponible en sus entradas, pero en ocasiones es necesario ejecutar un nodo antes que otro. El diagrama que va a ser ejecutado primero se coloca dentro del Marco 0 (0...X), el segundo diagrama que va ser ejecutado se coloca dentro del Marco 1 (1..X), y así sucesivamente, solo un marco es visible a la vez. Para colocar una estructura de Secuencia en la ventana de diagrama de bloques, selecciónela de la subpaleta Estructuras (Structures) de la paleta de Funciones.

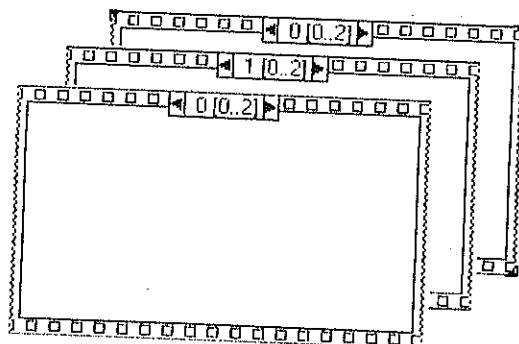


FIGURA 3.51. ESTRUCTURA DE SECUENCIA

### 3.2.5. Gráficas de barrido

La gráfica de barrido se encuentran en la subpaleta Graph de la paleta de Controles. Existen varios tipos diferentes de gráficas de

barrido pero las más importantes son: Waveform Chart, Waveform Graph.

### Waveform Chart

Este tipo de gráfica de barrido es un indicador numérico especial que despliega una o más trazos. Ésta permite ser conectada directamente a un salida escalar, muestra la variación de los datos a medida que estos son generados. Este tipo de gráfica de barrido permite graficar más de una onda a la vez, para agrupar los datos se requiere al función empaquetadura (Bundle) colocada directamente antes del indicador del gráfico, y recibe las múltiples señales a graficar. La Figura 3.52 muestra un programa con tres constantes graficándose a la vez .

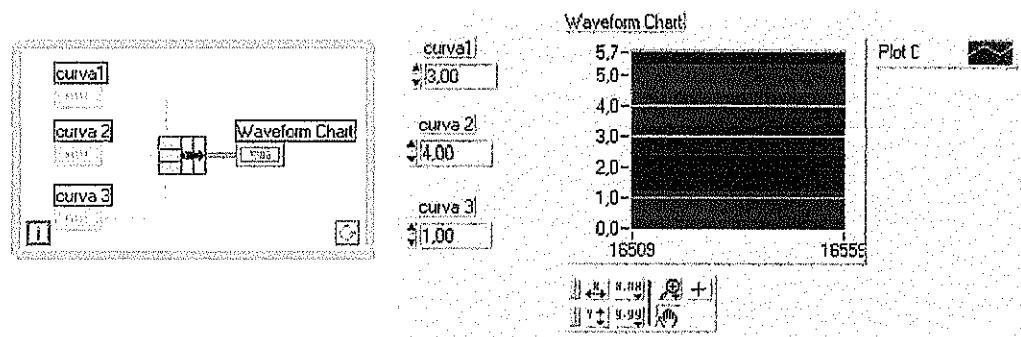
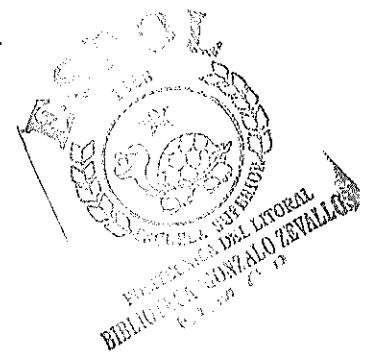


FIGURA 3.52. WAVEFORM CHART



## Waveform Graph

Este tipo de gráfica es seleccionada cuando los trazos que se requiere graficar son de tipo matricial es decir están dentro de un arreglo, éste tipo de gráfica también puede desplegar más de un trazo pero para esto se requiere de una función que agrupe los trazos, este tipo de funciones se encuentra dentro de la paleta de Funciones en la subpaleta Cluster, la función Bundle permite agrupar dos o más arreglos para una gráfica.

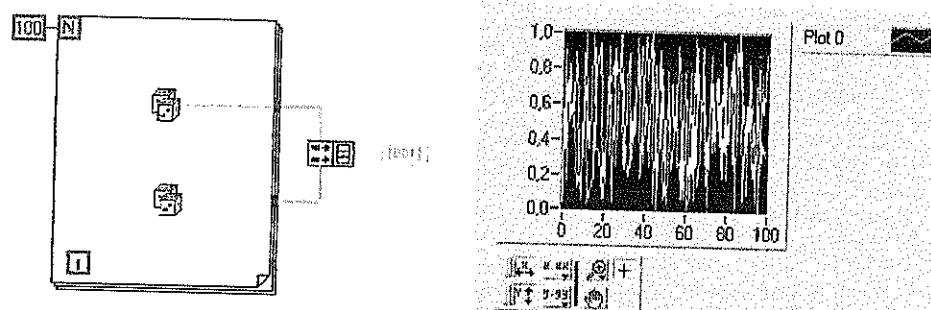


FIGURA 3.53. WAVEFORM GRAPH

### 3.2.6. Arreglos

Un arreglo es una colección de datos del mismo tipo. Un arreglo tiene una o más dimensiones y hasta  $2^{31}$  elementos si la memoria lo permite. Los arreglos en Lab VIEW pueden ser de cualquier tipo,

sin embargo, no se puede tener arreglos de arreglos o arreglos de gráficas de barrido. Los elementos de un arreglo se pueden accesar por medio de su índice. El índice se encuentra en el rango de 0 a  $N-1$ , en donde  $N$  es el número de elementos del arreglo. Para la creación de un arreglo se puede introducir los datos dentro del arreglo de modo manual es decir cargar los datos de uno en uno o incluso se puede cargar datos utilizando un Ciclo For o un Ciclo While ya que estos pueden indexar y acumular datos en sus bordes. Esta capacidad es conocida como auto indexando un arreglo en su borde. Cada interacción crea el siguiente elemento del arreglo. Una vez que el ciclo se ha completado, el arreglo se pasa al indicador. Observe que el cable se hace más grueso fuera del ciclo, esto se debe a que se convierte en un arreglo fuera del ciclo. Para crear un arreglo de dos dimensiones se puede utilizar un doble ciclo For uno dentro de otro, el ciclo For externo crea los elementos de los renglones y el ciclo For interno crea los elementos de las columnas.

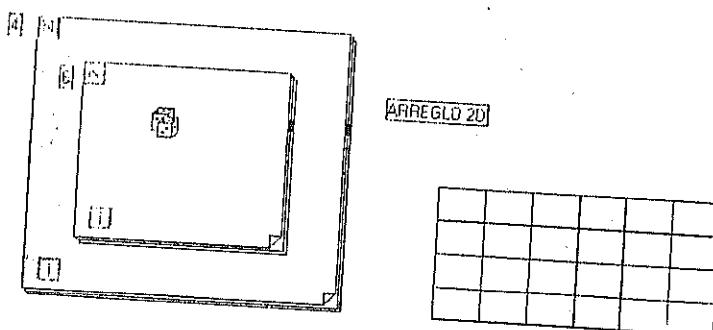


FIGURA 3.54. ARREGLOS

### **3.3. Circuitos Auxiliares de Control**

Para la ejecución del proyecto de automatización en la Planta de Procesos se crearon dispositivos, que proporcionan la capacidad activación y desactivación de algunas de las funciones de la planta, a través de la computadora. Esta nueva interfase fue creada para que tanto la bomba principal que se encarga de enviar agua a toda la planta, como del calentador de agua del módulo de temperatura sean operados desde la computadora que controla los procesos. La principal aplicación de esta interfase en el módulo de control de nivel y caudal es la operación de la bomba principal.

#### **3.3.1. Circuito de encendido y apagado de bomba**

La creación de la interfase para el control obedece al interés de modernizar y automatizar la mayor parte de las funciones de la Planta de Procesos, la interfase Field Point a pesar de contar con la capacidad de ejecutar las funciones de la nueva interfase no se la utilizó con este propósito con el fin de no agotar su capacidad para futuros usos en la Planta de Procesos. La interfase opera mediante el puerto paralelo LPT1 de la computadora, y es comandada a través del programa de control del módulo de

Caudal y Nivel. Se encuentra instalada en el interior del panel principal de control de la Planta de Procesos, opera de modo dual con los controles instalados para la bomba en el panel principal de control, es decir que es posible

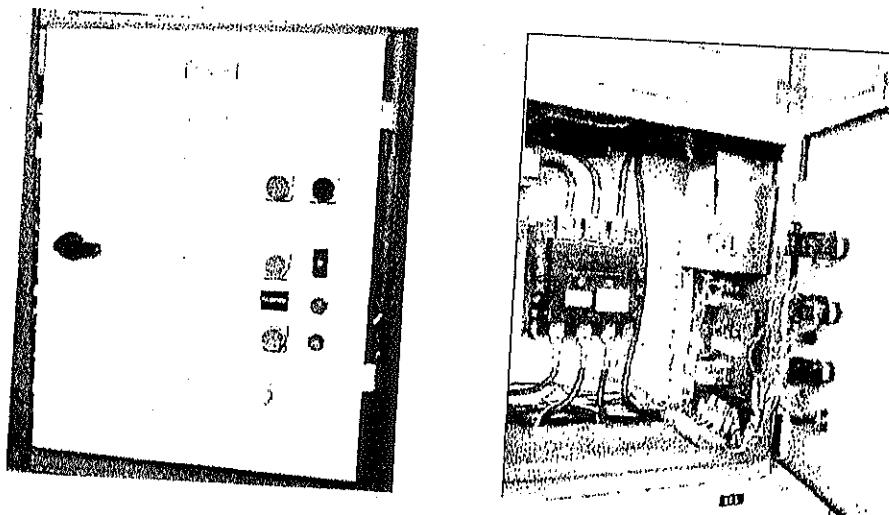


FIGURA 3.55. PANEL PRINCIPAL DE CONTROL

activar la bomba tanto desde el panel principal de control como desde la computadora y de igual modo es posible desactivar la bomba principal tanto desde el panel de control como desde la computadora a través de la del puerto paralelo LPT1 y la interfase. Cuando la bomba es activada una señal de corriente es enviada desde la interfase del panel principal de control hacia la interfase Field Point en donde son interpretadas y en el programa de control del módulo de Nivel y Caudal un indicador en forma de luz pilota se enciende, indicando que la bomba principal está operando.

La Figura 3.56 muestra el diagrama unifilar de control de encendido de bomba y calentador, en este diagrama se presenta los pulsadores de encendido y apagado de bomba y calentador, en paralelo con los contactos de relé activados por la computadora a través del puerto LPT1, esto

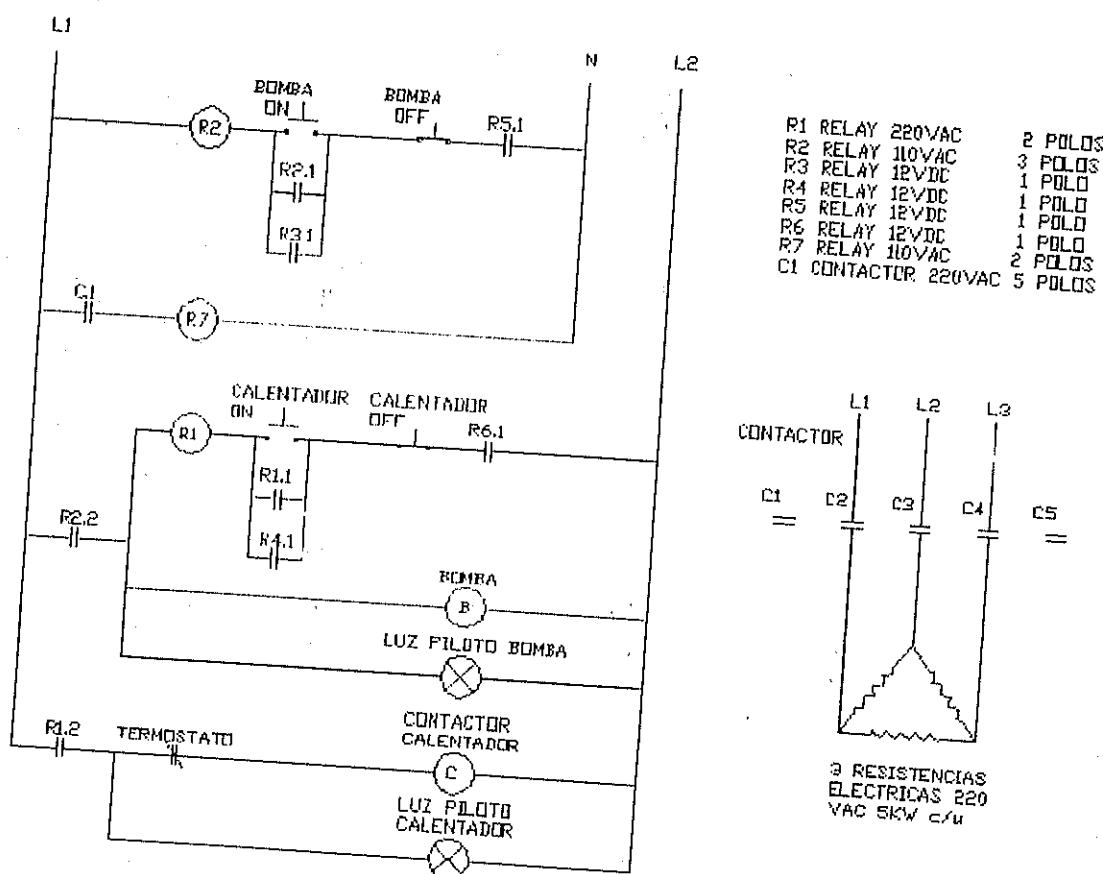


FIGURA 3.56. CIRCUITO UNIFILAR DE ACTIVACION DE BOMBA Y CALENTADOR DEL PANEL DE CONTROL DE LA PLANTA DE PROCESOS

permite activar y desactivar bomba y calentador tanto desde la computadora como desde el panel de control. Las resistencia eléctricas del calentador, fueron construidas para operar siempre inmersas en agua de lo contrario, al estar expuestas al aire fuera del agua su temperatura se eleva y terminan fundiéndose. Por seguridad las resistencias eléctricas del calentador no pueden ser encendidas sin antes haber encendido la bomba, con esto se asegura la presencia de agua dentro del calentador. La Figura 3.57 muestra la circuitería interna de la tarjeta impresa de la interfase, este circuito es de control para los relés que encienden el circuito de potencia para control de la bomba y calentador.

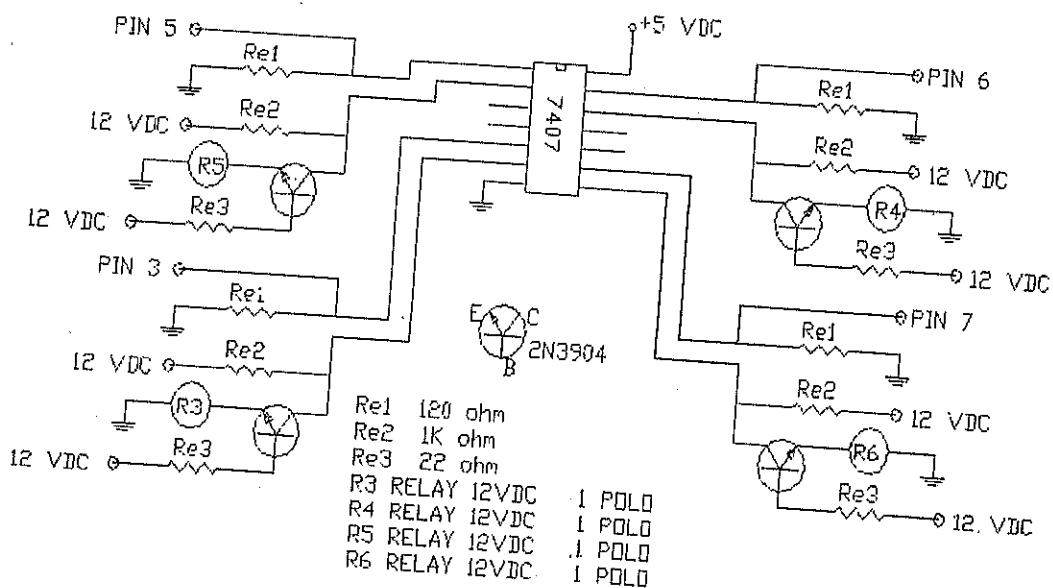


FIGURA 3.57. CIRCUITO DE ACTIVACION DE RELES DE CONTROL A TRAVES DEL PUERTO LPT1

La Figura 3.58 muestra un diagrama esquemático de la tarjeta de la interfase y las conexiones como se encuentran en el panel de control, esta tarjeta integra tanto el circuito de control a través del puerto LPT1 como el circuito de potencia para la activación y desactivación de la bomba y calentador.

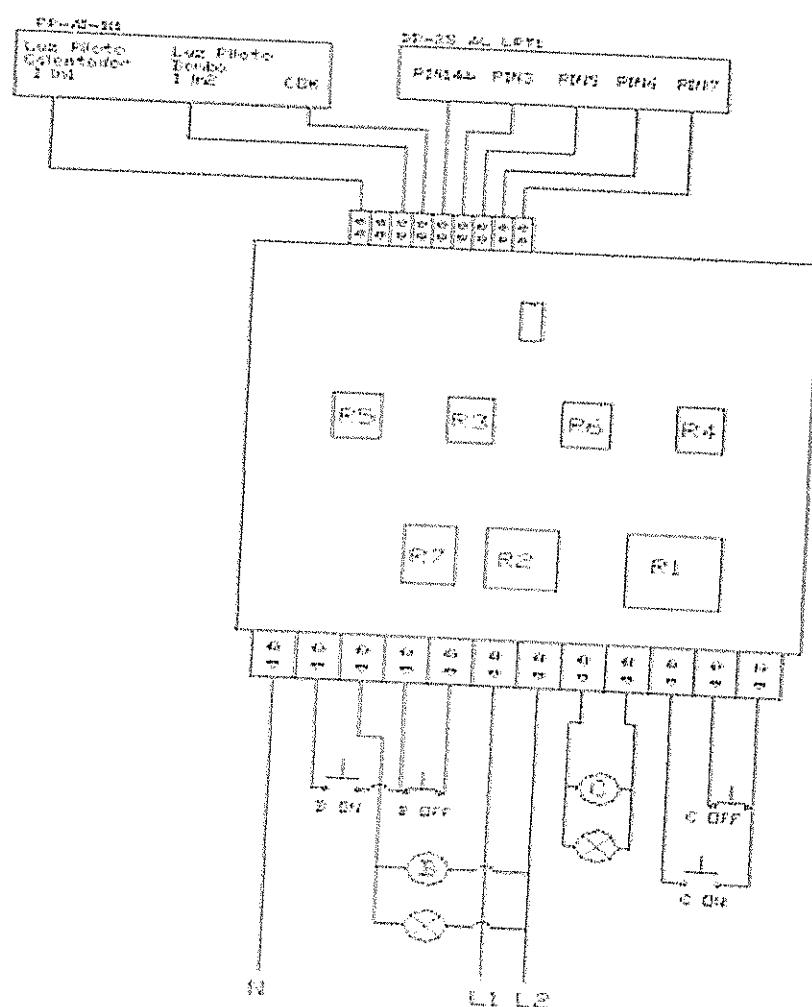


FIGURA 3.58. DIAGRAMA DE CONEXIONES A LA TARJETA DE LA INTERFASE DE CONTROL DE ENCENDIDO DE BOMBA Y CALENTADOR

### Caja de la Interfase Field Point

Esta parte del equipo fue construida para ofrecer seguridad y protección contra el medio a la interfase Field Point, fue construido en aluminio y cuenta con una compuerta de acrílico transparente que permite la inspección de la interfase sin necesidad de abrir la compuerta.

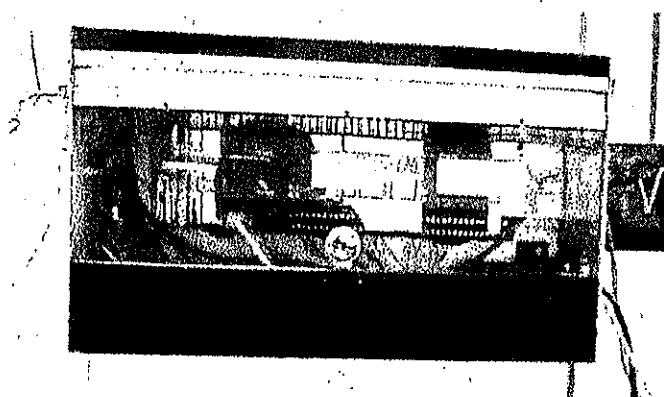


FIGURA 3.59. CAJA DE LA INTERFASE FIELD POINT

La caja de la interfase cuenta con dos conectores DB 25, uno para el módulo de control de caudal y nivel y otro para el módulo de control de temperatura de la Planta de Procesos, a través de estos conectores viajan tanto las señales de los sensores como las señales para control de los actuadores, estos conectores permiten conectarse de modo rápido y seguro a la planta de procesos.

En el interior de la caja de la interfase Field Point, se encuentra la fuente de alimentación tanto para la interfase como para los sensores y actuadores de la planta, además de una tarjeta que contiene toda la circuitería impresa para los sensores y actuadores también cuenta con fusibles para protección en caso de una sobre corriente, en el módulo de entradas de corriente FP-AI-111, estos fusibles son de 100 mA. De la caja de la interfase Field Point únicamente salen dos cables para ser conectados a la computadora un cable con conector serial SR-232 el cual comunica la interfase Field Point con la computadora a través del puerto serial y un cable con conector DB-25 al puerto paralelo de la computadora , este permite el control del panel principal y operar tanto bomba como calentador.

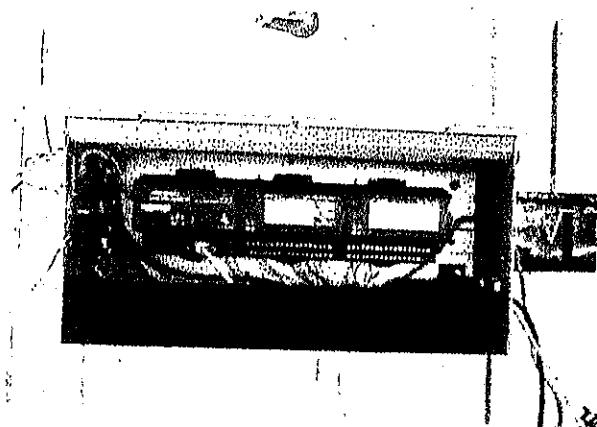


FIGURA 3.60. CAJA DE LA INTERFASE FIELD POINT

El diagrama de la Figura 3.61 muestra las conexiones en el interior de la caja de la interfase Field Point desde los conectores de cada módulo, pasando por la tarjeta de fusibles hasta las conexiones en las borneras de las bases terminales de los módulos Field Point tanto de entrada como de salida de corriente.

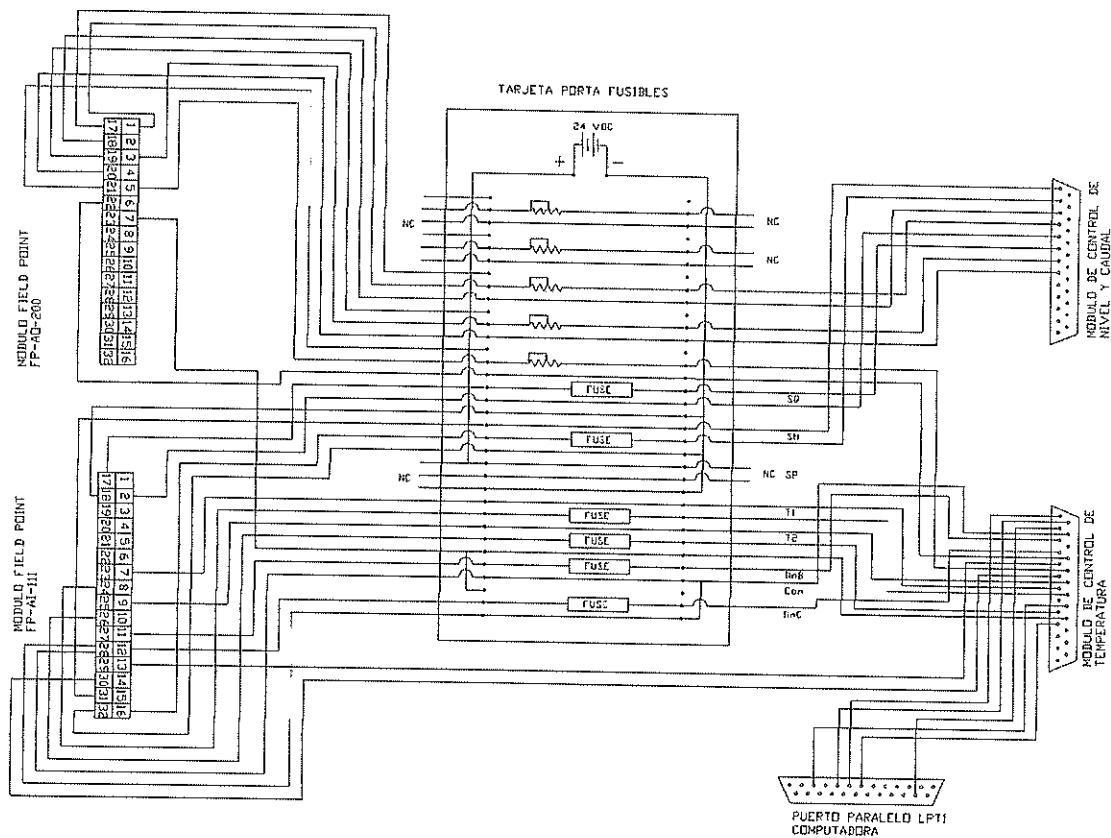
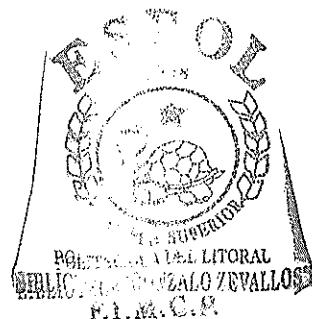


FIGURA 3.61. DIAGRAMA DE CONEXIONES EN INTERIOR DE LA INTERFASE FIELD POINT



# **CAPITULO 4**

## **4. DESARROLLO DE PROGRAMA PARA EL CONTROL DIGITAL.**

### **4.1. Teoría de controladores por retroalimentación.**

Los sistemas de control pueden clasificarse en sistemas que tienen retroalimentación y aquellos que no la tienen.

**Sistema con retroalimentación o de lazo cerrado.**- la variable controlada (también llamada salida o respuesta), es comparada con la variable de referencia (también llamada entrada, mando u orden) y cualquier diferencia que exista entre ambas (el error), es usada para reducir esta última. En términos más simples, un sistema de control retroalimentado compara lo que se está obteniendo con lo que se necesita y usa cualquier diferencia a fin de poner en correspondencia la entrada con la salida.

**Sistema de control sin retroalimentación o control de lazo abierto.** - la variable controlada no tiene efecto sobre la acción de control, es decir en un sistema de control de lazo abierto la salida no se realimenta.

La teoría que se presenta a continuación es válido tanto para los controladores neumáticos, electrónicos como para la mayoría de los que se basan en microprocesadores. Como apoyo para la compresión de esta teoría se describen algunos controladores utilizados en la industria, enfatizando el significado físico de sus parámetros para la compresión de su funcionamiento.

El controlador es el "cerebro" del circuito de control., el controlador es el dispositivo que toma la decisión en el sistema de control y, para hacerlo, el controlador:

1. Compara la señal del proceso que llega del transmisor, la variable que se controla, contra el punto de control y
  
2. Envía la señal apropiada a la válvula de control, o cualquier otro elemento final de control, para mantener la variable que se controla en el punto de control.

En la Figura 4.1 se muestran diferentes tipos de controladores, nótense las diferentes perillas, selectores y botones con los que se hace el ajuste del punto de control, la lectura de la variable que se controla, el cambio entre el modo manual y automático y el ajuste y lectura de la señal de salida del controlador; en la mayoría de los controladores estos selectores se encuentran en el panel frontal, para facilitar la operación.

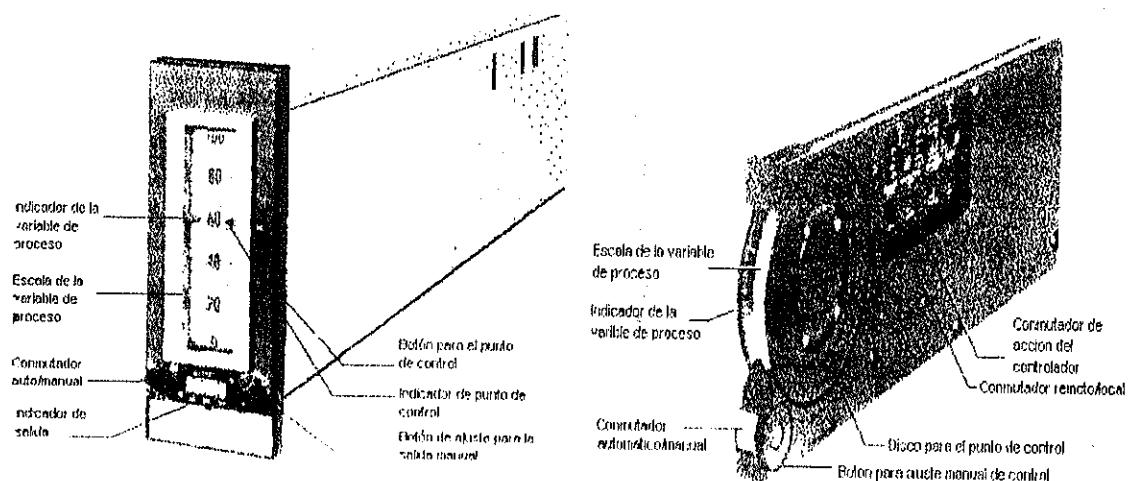


FIGURA 4.1. CONTROLADORES DE PROCESOS TAYLOR Y FISHER

Un selector interesante es el auto/manual, con éste se determina el modo de operación del controlador. Cuando el selector está en la posición auto (automático), el controlador decide y emite la señal apropiada hacia el elemento final de control, para mantener la variable que se controla en el

punto de control; cuando el selector está en la posición manual, el controlador cesa de decidir y "congela" su salida, entonces el operador o ingeniero puede cambiar manualmente la salida del controlador mediante el disco, rueda o botón de salida manual; en esta modalidad el controlador sólo proporciona un medio conveniente y caro para ajustar el elemento final de control. En la modalidad de automático la salida manual no tiene ningún efecto, únicamente el punto de control tiene influencia sobre la salida. En la modalidad manual el punto de control no tiene ninguna influencia sobre la salida del controlador, solamente la salida manual tiene influencia sobre la salida. Si un controlador se pone en manual, no hay mucha necesidad de tenerlo; solamente cuando el controlador está en automático es cuando se obtienen los beneficios del control automático de proceso.

En las Figuras 4.2 se muestra también el panel lateral del controlador; en la mayoría de los controladores los paneles laterales son similares. Una de las opciones en este panel es la elección entre la operación remota o local del punto de control; si el punto de control lo controla el personal de operación desde el frente del panel, entonces se elige la opción local; esto se logra generalmente mediante el accionamiento de una perilla o un interruptor. Si el punto de fijación lo controla otro dispositivo, controlador, relevador, computadora o algo semejante, entonces se elige la opción

remota; cuando la perilla o selector se posiciona en remoto, la perilla de punto de control ubicada en el frente del panel no tiene ningún efecto sobre el punto de control del controlador; en este caso el controlador espera que el punto de control le llegue en forma de una señal desde otro dispositivo, y dicha señal generalmente se conecta al panel posterior del controlador.

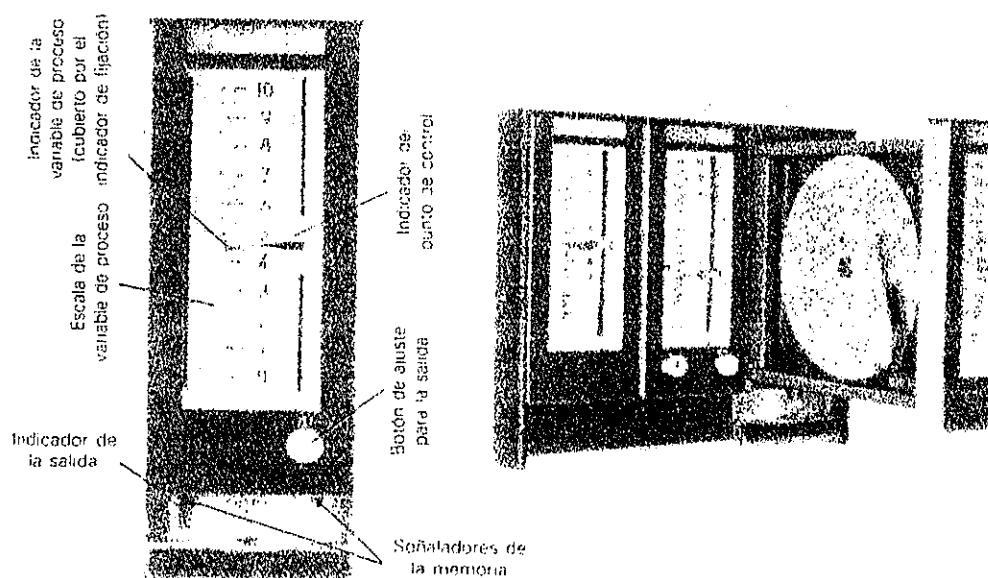


FIGURA 4.2. CONTROLADORES DE PROCESOS FOXBORO CO.

A continuación se verán algunas otras opciones de los controladores, se incluyen diferentes tipos de controladores, a la vez que se hace énfasis en el significado físico de sus parámetros.

## Funcionamiento de los controladores

Considérese el circuito de control del intercambiador de calor que se muestra en la Figura 4.3; si la temperatura del fluido sobrepasa el punto de control, el controlador debe cerrar la válvula de vapor. Puesto que la válvula es de aire para abrir (AA), se debe reducir la señal de salida del controlador (presión de aire o corriente) (ver las flechas en la figura).

Para tomar esta decisión el controlador debe estar en acción inversa. Algunos fabricantes designan tal acción como decremento; es decir, cuando hay un incremento en la señal que entra al controlador, entonces se presenta un decremento en la señal que sale del mismo.

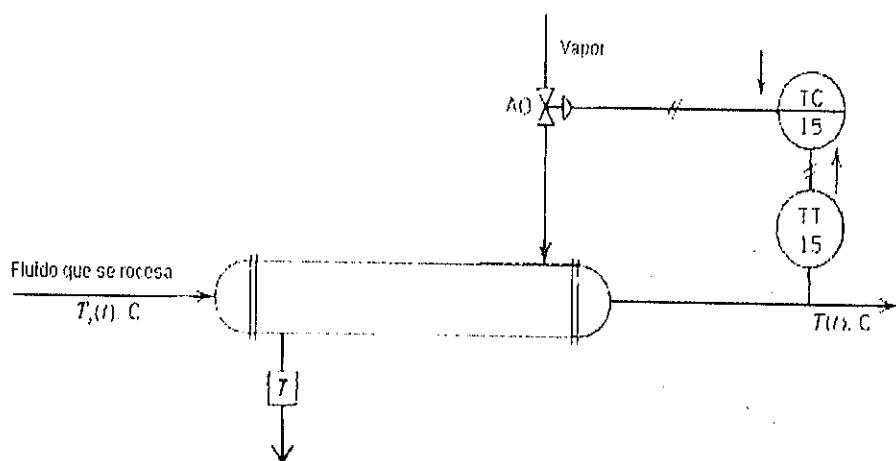


FIGURA 4.3. CIRCUITO DE CONTROL PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR

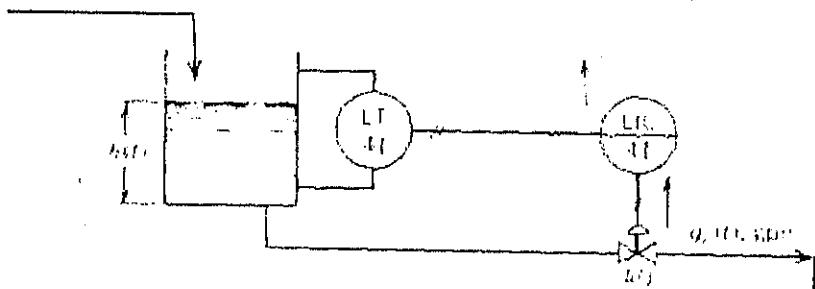
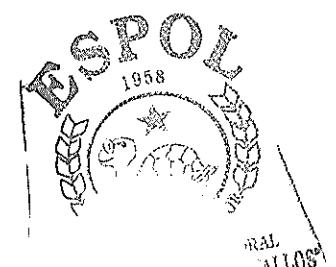


FIGURA 4.4. CIRCUITO PARA CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO.

Considérese ahora el circuito de control de nivel que se muestra en la Figura 4.4, si el nivel del líquido rebasa el punto de fijación, el controlador debe abrir la válvula para que el nivel regrese al punto de control. Puesto que la válvula es de aire para abrir (AA), el controlador debe incrementar su señal de salida (ver las flechas en la figura) y, para tomar esta decisión, el controlador se debe colocar en acción directa. Algunos fabricantes denominan a esta acción incremento; es decir, cuando hay un incremento en la señal que entra al controlador entonces existe un incremento en la señal de salida del mismo. En resumen, para determinar la acción del controlador, el ingeniero debe conocer:

1. Los requerimientos de control del proceso y
2. La acción de la válvula de control u otro elemento final de control.



Ambas cosas se deben tomar en cuenta. Tal vez el lector se pregunte cuál es la acción correcta del controlador de nivel si se utiliza una válvula de aire para cerrar (AC), o si el nivel se controla con el flujo de entrada en lugar del flujo de salida.

En el primer caso cambia la acción de la válvula de control; mientras que, en el segundo, cambian los requerimientos de control del proceso.

La acción del controlador se determina generalmente mediante un interruptor en el panel lateral de los controladores neumáticos o electrónicos.

#### **4.1.1. Tipos de controladores por retroalimentación**

La manera en que los controladores por retroalimentación toman una decisión para mantener el punto de control, es mediante el cálculo de la salida con base en la diferencia entre la variable que se controla y el punto de control. En esta sección se abordarán los tipos más comunes de controladores, por medio del estudio de las ecuaciones con que se describe su operación.

**Controlador proporcional (P).** El controlador proporcional es el tipo más simple de controlador, con excepción del controlador de dos estados, el cual no se estudia aquí; la ecuación con que se describe su funcionamiento es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c (r(t) - c(t)) \quad (4-1)$$

O

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) \quad (4-2)$$

donde:

$m(t)$  = salida del controlador, psig o mA

$r(t)$  = punto de control, psig o mA

$c(t)$  = variable que se controla, psig o mA; ésta es la señal que llega del transmisor.

$e(t)$  = señal de error, psi o mA; ésta es la diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.

$K_c$  = ganancia del controlador,  $\frac{\text{psi}}{\text{psi}}$  o  $\frac{\text{mA}}{\text{mA}}$

$\bar{m}$  = valor base, psig o mA. El significado de este valor es la salida del controlador cuando el error es cero; generalmente se fija durante la calibración del controlador, en el medio de la escala, 9 psig o 12 mA

Puesto que los rangos de entrada y salida son los mismos (3-15 psig o 4-20 mA), algunas veces las señales de entrada y salida, así como el punto de control se expresan en porcentaje o fracción de rango. Es interesante notar que la ecuación (4-1) es para un controlador de acción inversa; si la variable que se controla,  $c(t)$ , se incrementa en un valor superior al punto de control,  $r(t)$ , el error se vuelve negativo y, como se ve en la ecuación, la salida del controlador,  $m(t)$ , decrece. La manera común con que se designa matemáticamente un controlador de acción directa es haciendo negativa la ganancia del controlador,  $K_c$ ; sin embargo, se debe recordar que en los controladores industriales no hay ganancias negativas, sino únicamente positivas, lo cual se resuelve con el selector inverso/directo. La  $K_c$  negativa se utiliza cuando se hace el análisis matemático de un sistema de control en el que se requiere un controlador de acción directa. En las ecuaciones (4-1) y (4-2) se ve que la salida del controlador es proporcional al error entre el punto de control y la variable que se controla; la proporcionalidad la da la ganancia del controlador,  $K_c$ , con esta ganancia o sensibilidad del controlador se determina cuánto se modifica la salida del controlador con un cierto cambio de error. Esto se ilustra gráficamente en la Figura 4.5.

Los controladores que son únicamente proporcionales tienen la ventaja de que sólo cuentan con un parámetro de ajuste,  $K_c$ , sin embargo, adolecen de una gran desventaja, operan con una DESVIACIÓN, o "error de estado estacionario" en la variable que se controla A fin de apreciar dicha desviación gráficamente, considérese el circuito de control de nivel que se muestra en la Figura 4.4; supóngase que las condiciones de operación de diseño son  $q_i = q_o = 150 \text{ gpm}$  y  $h = 6 \text{ pies}$ ; supóngase también que, para que pasen 150 gpm por la válvula de salida la presión de aire sobre ésta debe ser de 9 psig. Si el flujo de entrada se incrementa,  $q_i$ , la respuesta del sistema con un controlador proporcional

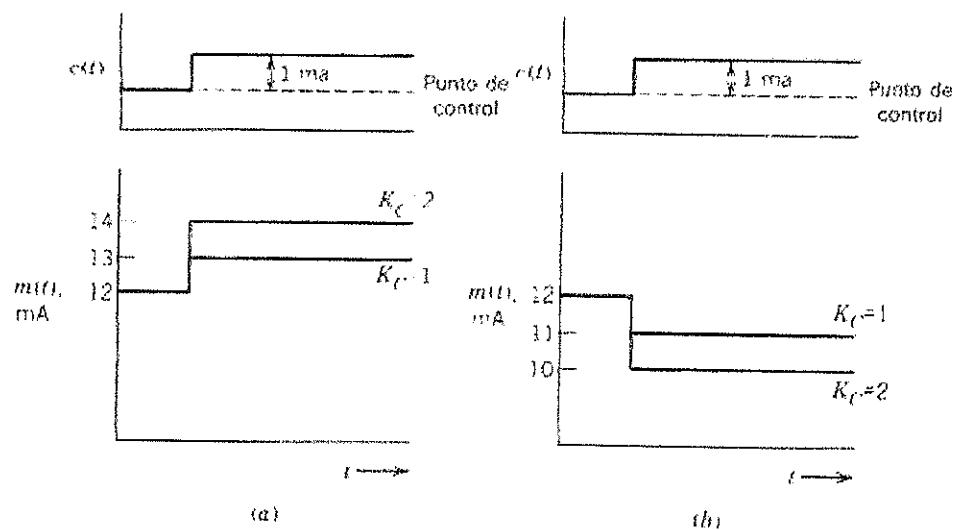


FIGURA 4.5. EFECTO DE LA GANANCIA DEL CONTROLADOR SOBRE LA SALIDA DEL CONTROLADOR. (A) CONTROLADOR DE ACCIÓN DIRECTA, (B) CONTROLADOR DE ACCIÓN INVERSA

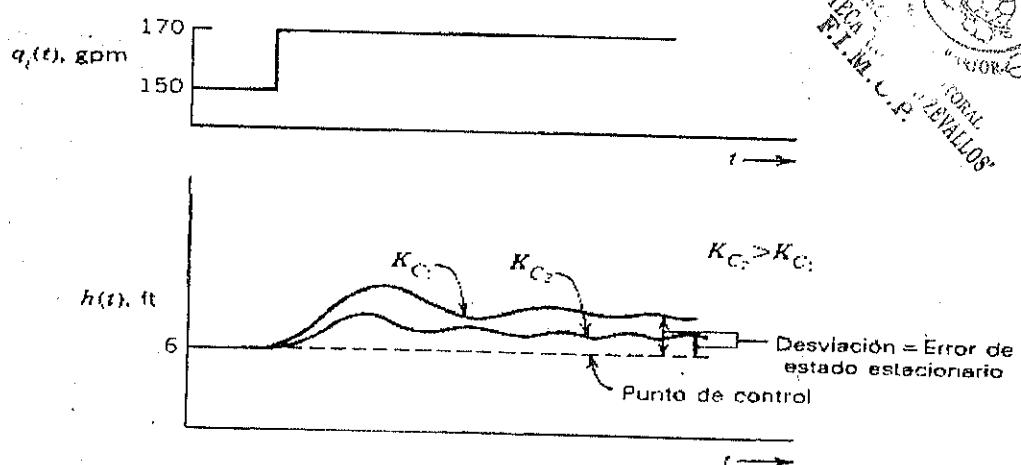
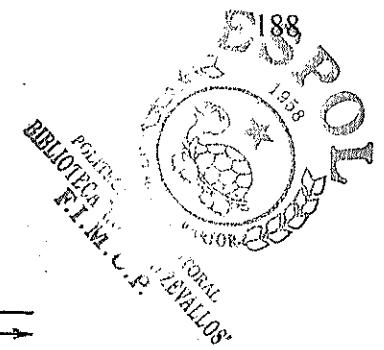


FIGURA 4.6. RESPUESTA DEL SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO.

es como se ve en la Figura 4.6. El controlador lleva de nuevo a la variable a su valor estacionario pero este valor no es el punto de control requerido; la diferencia entre el punto de control y el valor de estado estacionario de la variable que se controla es la desviación. En la Figura 4.6 se muestran dos curvas de respuesta que corresponden a dos diferentes valores del parámetro de ajuste  $K_c$ . En la figura se aprecia que cuanto mayor es el valor de  $K_c$ , tanto menor es la desviación, pero la respuesta del proceso se hace más oscilatoria; sin embargo, para la mayoría de los procesos existe un valor máximo de  $K_c$ , más allá del cual el proceso se hace inestable. Existen métodos matemáticos de calcular el valor máximo de la ganancia, el cual se conoce como la ganancia última,  $K_{cu}$ .

A continuación se explica de manera simple por qué existe la desviación, considérese el mismo sistema de control de nivel de líquido que aparece en la Figura 4.3, con las condiciones de operación que se dieron anteriormente. Se debe recordar que el controlador proporcional, con acción directa ( $-K_c$ ), resuelve la siguiente ecuación:

$$m(t) = 9 + (-K_c) e(t) \quad (4-3)$$

Supóngase ahora que el flujo de entrada se incrementa a 170 gpm; cuando esto sucede, el nivel del líquido aumenta y el controlador debe, a su vez, incrementar su salida para abrir la válvula y bajar el nivel. Para alcanzar una operación estacionaria el flujo de salida,  $q_0$ , debe ser ahora de 170 gpm y, para que pase este nuevo flujo, se debe abrir la válvula de salida más que cuando pasaban 150 gpm; puesto que la válvula es de aire para abrir, supóngase que la nueva presión sobre la válvula debe ser de 10 psig; es decir, la salida del controlador,  $m(t)$ , debe ser de 10 psig. En la ecuación (4-3) se observa que la única manera de que la salida del controlador sea de 10 psig, es que el segundo término del miembro de la derecha tenga un valor de +1 psig y, para que esto se cumpla, el término de error,  $e(t)$ , no puede ser cero en el estado estacionario; este error de estado estacionario es la

desviación. Nótese que el error negativo significa que la variable que se controla es mayor que el punto de control. El nivel real, en pies, se puede calcular a partir de la calibración del transmisor de nivel.

En este ejemplo se debe hacer énfasis en dos puntos: Primero, la magnitud del término de desviación depende del valor de la ganancia del controlador, puesto que el término total debe tener un valor de +1, entonces:

<u>-K<sub>c</sub></u>	<u>-e(<math>\infty</math>) (desviación)</u>
1	1
2	0.5
3	0.25

Como se mencionó anteriormente, cuanto mayor es la ganancia, tanto menor es la desviación; se debe recordar que arriba de cierta  $K_c$ , la mayoría de los procesos se vuelven inestables, sin embargo, esto no lo muestra la ecuación del controlador.

Segundo, y como resumen de este ejemplo, tal parece que todo lo que los controladores proporcionales logran es alcanzar una condición de operación de estado estacionario; la cantidad de

alejamiento del punto de operación, o desviación, depende de la ganancia del controlador.

Muchos fabricantes de controladores no utilizan el término ganancia para designar la cantidad de sensibilidad del controlador, sino que utilizan el término Banda Proporcional, PB. La relación entre la ganancia y la banda proporcional se expresa mediante

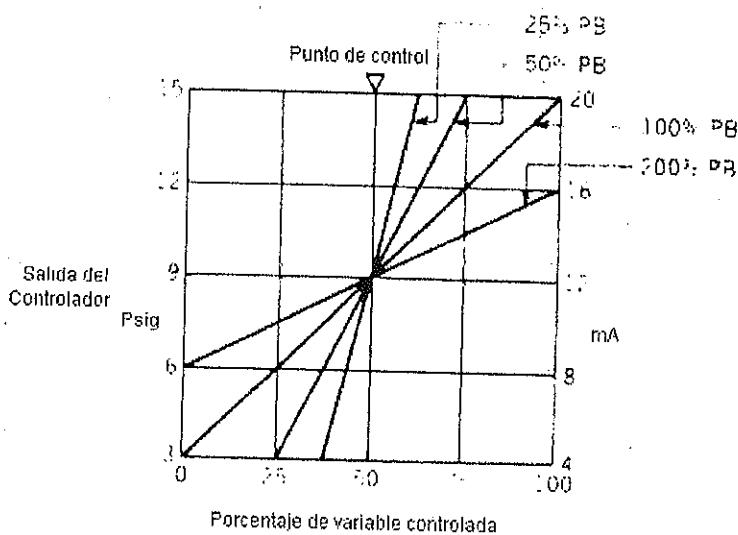
$$PB = \frac{100}{K_e} \quad (4.4)$$

y, en consecuencia, la ecuación con que se describe al controlador proporcional, se escribe ahora de la siguiente forma:

$$m(t) = m + \frac{100}{PB} (r(t) - c(t)) \quad (4-5)$$

O

$$m(t) = \bar{m} + \frac{100}{PB} e(t) \quad (4-6)$$



		Salida del controlador		
		3 psig 4 mA	9 psig 12 mA	15 psig 20 mA
PB	100%	100 C	200 C	300 C
PB	50%	150 C	200 C	250 C
PB	= 25%	175 C	200 C	225 C
PB	200%	200 C	—	—

FIGURA 4.7. DEFINICIÓN DE BANDA PROPORCIONAL.

Se utiliza el término "100" porque la PB se conoce generalmente como "porcentaje de banda proporcional".

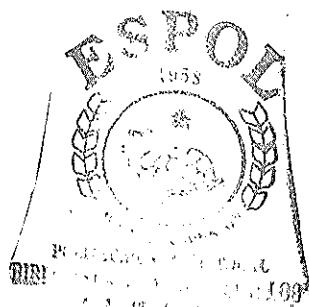
En la ecuación (4.4) se aprecia un hecho bastante importante: una ganancia,  $K_c$ , grande es lo mismo que una banda proporcional baja o estrecha; y una ganancia baja es lo mismo que una banda

proporcional grande o ancha. Esto quiere decir que, antes de empezar a ajustar la perilla del controlador, se debe saber si en el controlador se utiliza ganancia o banda proporcional.

A continuación se ofrece otra definición de banda proporcional: la banda proporcional se refiere al error (expresado en porcentaje de rango de la variable que se controla) que se requiere para llevar la salida del controlador del valor más bajo hasta el más alto.

Considérese el circuito de control del intercambiador de calor que se muestra en la Figura 5-8; la escala del transmisor de temperatura va de 100°C a 300°C y el punto de control del controlador está en 200°C. En la Figura 4.7 se explica gráficamente la definición de PB; en ella se ve que una PB del 100% significa que, cuando la variable que se controla varía en rango un 100%, la salida del controlador varía 100% en rango; una PB de 50% significa que, cuando la variable que se controla varía un 50% en rango, la salida del controlador varía en rango 100%.

También se debe notar que, en un controlador proporcional con PB del 200%, la salida del controlador no se mueve sobre el rango completo; una PB del 200% significa muy poca ganancia o sensibilidad a los errores.



Para obtener la función de transferencia del controlador proporcional, la ecuación (4-1) se puede escribir como

$$m(t) - \bar{m} = K_c (e(t) - 0)$$

Se definen las dos siguientes variables de desviación:

$$M(t) = m(t) - \bar{m} \quad (4-7)$$

$$E(t) = e(t) - 0 \quad (4-8)$$

Entonces:

$$M(t) = K_c E(t)$$

Se obtiene la transformada de Laplace, y de ahí resulta la siguiente función de transferencia:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \quad (4-9)$$

Para resumir brevemente, los controladores proporcionales son los más simples, con la ventaja de que sólo tienen un parámetro de ajuste,  $K_c$  o PB; la desventaja de los mismos es que operan con una desviación en la variable que se controla, en algunos procesos, por ejemplo, un tanque de mezclado, esto puede no

tener mayor consecuencia. En los casos en que el proceso se controla dentro de una banda del punto de control, los controladores proporcionales son suficientes; sin embargo, en los procesos en que el control debe estar en el punto de control, los controladores proporcionales no proporcionan un control satisfactorio.

**Controlador proporcional-integral (PI).** La mayoría de los procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control, y en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación. Esta nueva inteligencia o nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste y en consecuencia, el controlador se convierte en un controlador proporcional-integral (PI). La siguiente es su ecuación descriptiva:

$$m(t) = \bar{m} + K_c [r(t) - c(t)] + \frac{K_c}{\tau_i} \int [r(t) - c(t)] dt \quad (4-10)$$

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int e(t) dt \quad (4-11)$$

donde  $\tau_I$  = tiempo de integración o reajuste minutos/repetición.

Por lo tanto, el controlador PI tiene dos parámetros,  $K_c$  y,  $\tau_I$  que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

Para entender el significado físico del tiempo de reajuste,  $\tau_I$ , considérese el ejemplo hipotético que se muestra en la figura 5-13, donde  $\tau_I$  es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional y, en consecuencia, las unidades son minutos/repetición. Tanto menor es el valor de  $\tau_I$ , cuanto más pronunciada es la curva de respuesta, lo cual significa que la respuesta del controlador se hace más rápida. Otra manera de explicar

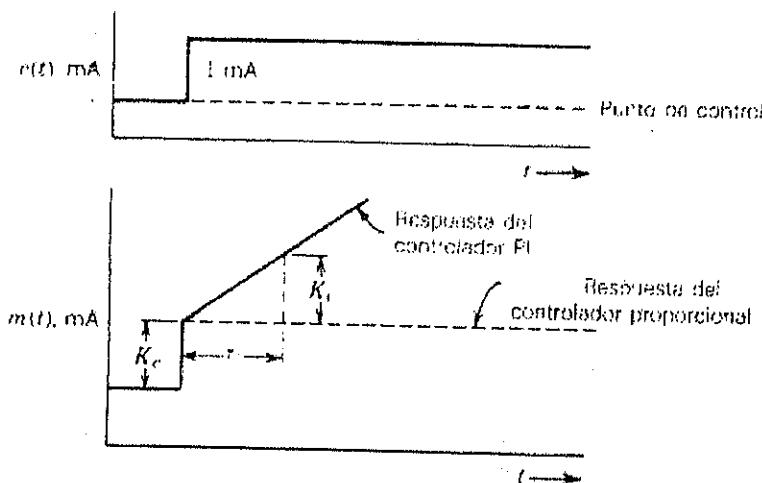


FIGURA 4.8. RESPUESTA DE UN CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL (PI) (ACCIÓN DIRECTA) A UN CAMBIO ESCALÓN EN EL ERROR.

esto es mediante la observación de la ecuación (4-11), tanto menor es el valor de  $\tau_I$ , cuanto mayor es el término delante de la integral,  $K_c / \tau_I$ , y, en consecuencia, se le da mayor peso a la acción integral o de reajuste. De la ecuación (4-11) también se nota que, mientras está presente el término de error, el controlador se mantiene cambiando su respuesta y, por lo tanto, integrando el error, para eliminarlo; recuérdese que integración también quiere decir sumatoria.

Ahora se recurre nuevamente al sistema de control de nivel de líquido que se utilizó para explicar por qué ocurre la desviación. Como se dijo, cuando el flujo de entrada se incrementa a 170 gpm, el flujo de salida se debe incrementar a 170 gpm para alcanzar una condición final de operación de estado estacionario; para que pasen 170 gpm por la válvula de salida se necesita una señal de aire de 10 psig, y la única manera de que la salida de un controlador proporcional sea de 10 psig se logra mediante la conservación del término de error. En un controlador PI, mientras el error está presente, el controlador, se mantiene integrándolo y, por lo tanto, añadiéndolo a su salida hasta que el error desaparece; cuando éste es el caso, la salida del controlador se expresa mediante

$$m(t) = \bar{m} + \frac{K_e}{\tau_i} \left( \int_0^t dt \right)$$

El hecho de que el error sea cero no significa que el término con la integral sea cero, esto significa que el controlador integra una función de valor cero; o, mejor aún, "añade cero" a su salida, con lo cual ésta se mantiene constante. Para el proceso de nivel de líquido el término con la integral

$$\frac{K_e}{\tau_i} \left( \int_0^t dt \right)$$

tiene un valor de 1 psig y, por lo tanto, la salida del controlador es de 10 psig, sin ningún error. Lo anterior es una explicación breve de por qué con la acción de reajuste se elimina la desviación; en el capítulo 6 esto se prueba nuevamente desde un punto de vista más riguroso.

Algunos fabricantes no utilizan el término de tiempo de reajuste  $\tau$  para su parámetro de ajuste, sino que utilizan lo que se conoce como rapidez de reajuste  $\tau_i^R$ . La relación entre estos dos parámetros es

$$\tau_i^R = \frac{1}{\tau_i} \text{ repeticiones/min} \quad (4-12)$$

Por lo tanto, antes de ajustar el parámetro de integración se debe saber si en el controlador se utiliza tiempo de reajuste o rapidez de reajuste, que son recíprocos y, en consecuencia, sus efectos son opuestos.

A continuación se muestran las ecuaciones con que algunos fabricantes describen la operación de sus controladores PI, lo cual refuerza el comentario de que "se debe saber con quién se juega, antes de empezar a jugar".

#### Foxboro Co

$$m(t) = \bar{m} + \frac{100}{PB} e(t) + \frac{100}{PB \tau_i} \int e(t) dt \quad (4-13)$$

#### Fisher Controls

$$m(t) = \bar{m} + \frac{100}{PB} e(t) + \frac{100 \tau_i^R}{PB} \int e(t) dt \quad (4-14)$$

#### Taylor Co Honeywell, Inc

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c \tau_i^R \int e(t) dt \quad (4-15)$$

Es interesante apuntar que, cuando Honeywell desarrolló su controlador con base en microprocesadores, el TDC2000, transformó el controlador PI en el que se describe con la ecuación (4-11). Por otro lado, cuando Fisher Controls desarrolló su sistema de control con base en microprocesadores, el PROVOX, cambió

su ecuación para PI, ecuación (4-14), por la ecuación (4-15). La Instrument Society of América (ISA) propone como norma la ecuación (4-11), la cual se utilizará en este libro; lo importante es recordar las relaciones entre ganancia y banda proporcional, y tiempo de reajuste y rapidez de reajuste.

Para obtener la función de transferencia del controlador PI, la ecuación (4-11) se escribe como sigue:

$$m(t) - \bar{m} = K_c(e(t) - 0) + \frac{K_c}{\tau_i} \int (e(t) - 0) dt$$

Se utilizan las mismas definiciones de variables de desviación que se dan en las ecuaciones (4-7) y (4-8), se obtiene la transformada de Laplace y se reordena para obtener

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (4-16)$$

En resumen, los controladores proporcionales-integracionales tienen dos parámetros de ajuste: la ganancia o banda proporcional y el tiempo de reajuste o rapidez de reajuste; la ventaja de este

controlador es que la acción de integración o de reajuste elimina la desviación. Probablemente el 75% de los controladores en servicio son de este tipo.

**Controlador proporcional-integral-derivativo (PID).** Algunas veces se añade otro modo de control al controlador PI, este nuevo modo de control es la acción derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación o preactuación; tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, su derivada. La ecuación descriptiva es la siguiente:

$$m(t) = m + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_D \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4-17)$$

donde  $\tau_D$  = rapidez de derivación en minutos.

Por lo tanto, el controlador **PID** tiene tres parámetros,  $K_c$  o PB,  $\tau_I$  o  $\tau_I^R$  y  $\tau_D$ , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio. Nótese que sólo existe un parámetro para ajuste de derivación,  $\tau_D$ , el cual tiene las mismas unidades, minutos, para todos los fabricantes.



Como se acaba de mencionar, con la acción derivativa se da al controlador la capacidad de anticipar hacia dónde se dirige el proceso, es decir, "ver hacia adelante", mediante el cálculo de la derivada del error. La cantidad de "anticipación" se decide mediante el valor del parámetro de ajuste,  $\tau_D$ .

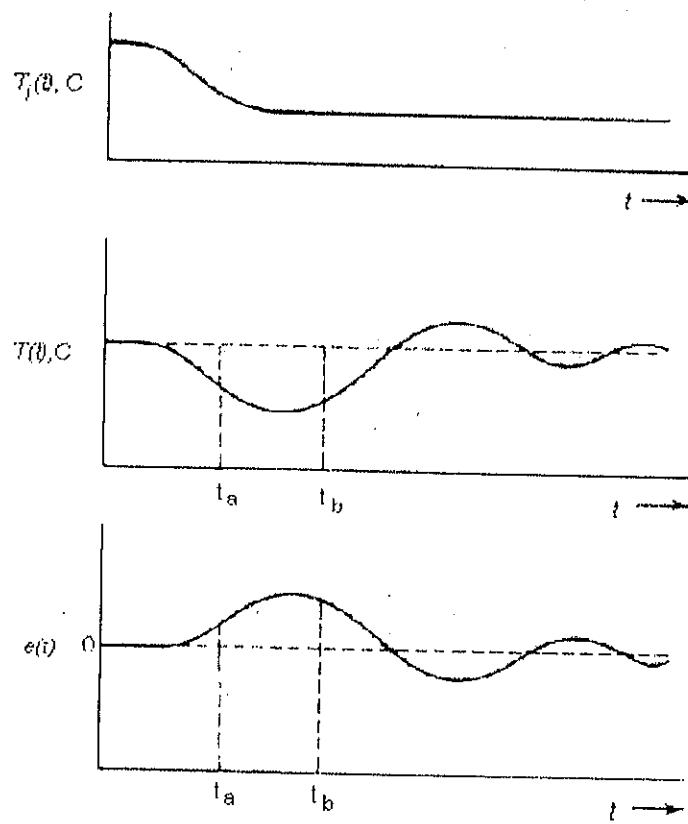


FIGURA 4.9. CONTROL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

A continuación se utiliza el intercambiador de calor que se muestra en la Figura 4.3 para aclarar el significado de "anticipar hacia dónde se dirige el proceso". Si se supone que la temperatura de entrada al procesó disminuye cierta cantidad y la temperatura de salida empieza a bajar de manera correspondiente, como se muestra en la Figura 4.9, en el tiempo  $t_a$  la cantidad de error es positiva y puede ser pequeña; en consecuencia, la cantidad de corrección de control que suministra el modo proporcional e integral es pequeña, sin embargo, la derivada de dicho error, la pendiente de la curva de error, es grande y positiva, lo que hace que la corrección proporcionada por el modo derivativo sea grande. Mediante al observación de la derivada del error, el controlador sabe que la variable que se controla se aleja con rapidez del punto de control y, en consecuencia, utiliza este hecho para ayudar en el control. En el tiempo  $t_b$ , el error aún es positivo y mayor que antes; la cantidad de corrección de control que suministran los modos proporcional e integral también es más grande que antes y se añade aún a la salida del controlador para abrir más la válvula de vapor; sin embargo, en ese momento la derivada del error es negativa, lo cual significa que el error empieza a decrecer; es decir, la variable que se controla empieza a bajar al punto de control y,



nuevamente, con la utilización de este hecho, en el modo derivativo se comienza a substraer de los otros dos modos, ya que se reconoce que el error disminuye. Al hacer esto, se toma más tiempo para que el proceso regrese al punto de control, pero disminuyen el sobreceso y las oscilaciones alrededor del punto de control. Los controladores **PID** se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas. Ejemplos típicos de ello son los circuitos de temperatura y los de concentración.

Los procesos en que las constantes de tiempo son cortas (capacitancia pequeña) son rápidos y susceptibles al ruido del proceso, son característicos de este tipo de proceso los circuitos de control de flujo y los circuitos para controlar la presión en corrientes de líquidos. Considérese el registro de flujo que se ilustra en la Figura 4.10; la aplicación del modo derivativo sólo da como resultado la amplificación del ruido, porque la derivada del ruido, que cambia rápidamente, es un valor grande. Los procesos donde la constante de tiempo es larga (capacitancia grande) son generalmente amortiguados y, en consecuencia, menos susceptibles al ruido; sin embargo, se debe estar alerta, ya que se puede tener un proceso con constante de tiempo larga, por ejemplo, un circuito de temperatura, en el que el transmisor sea

ruidoso, en cuyo caso se debe reparar el transmisor antes de utilizar el controlador PID.

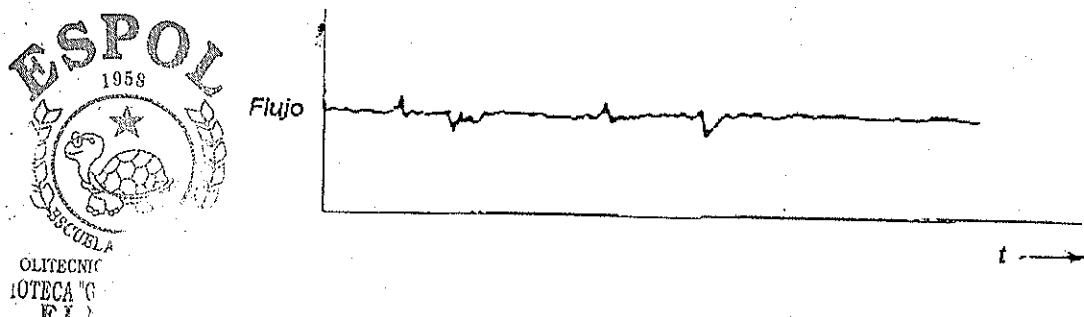


FIGURA 4.10. REGISTRO DE UN CIRCUITO DE FLUJO

La función de transferencia de un controlador PID "ideal" se obtiene a partir de la ecuación (4-17); la cual se reordena como sigue:

$$m(t) = m + K_c[r(t) - c(t)] + \frac{K_c}{\tau_I} \int [r(t) - c(t)] dt + K_c \tau_D \frac{de[r(t) - c(t)]}{dt}$$

Se usan las mismas definiciones de variables de desviación que aparecen en las ecuaciones (4-7) y (4-8), se obtiene la transformada de Laplace y se reordena para obtener:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (4-18)$$

Esta función de transferencia se conoce como "ideal" porque en la práctica es imposible implantar el cálculo de la derivada, por lo

cual se hace una aproximación mediante la utilización de un adelanto/retardo, de lo que resulta la función de transferencia "real":

$$\frac{M(S)}{E(S)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i S} \right) \left( \frac{\tau_D S + 1}{\alpha \tau_D S + 1} \right) \quad (4-19)$$

Los valores típicos de  $\alpha$  están entre 0.05 y 0.1.

En resumen, los controladores **PID** tienen tres parámetros ce ajuste: la ganancia o banda proporcional, el tiempo de reajuste o rapidez de reajuste y la rapidez derivativa. La rapidez derivativa se da siempre en minutos. Los controladores **PID** se recomiendan para circuitos con constante de tiempo larga en los que no hay ruido. La ventaja del modo derivativo es que proporciona la capacidad de "ver hacia dónde se dirige el proceso".

**Controlador proporcional derivativo (PD).** Este controlador se utiliza en los procesos donde es posible utilizar un controlador proporcional, pero se desea cierta cantidad de "anticipación".

La ecuación descriptiva es

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4-20)$$

y la función de transferencia "ideal" es

$$\frac{M(S)}{E(S)} = K_c(1 + \tau_D S) \quad (4-21)$$

Una desventaja del controlador **PD** es que opera con una desviación en la variable que se controla; la desviación solamente se puede eliminar con la acción de integración, sin embargo, un controlador **PD** puede soportar mayor ganancia, de lo que resulta una menor desviación que cuando se utiliza un controlador únicamente proporcional en el mismo circuito.

**Controladores digitales y otros comentarlos.** Como se mencionó anteriormente, la ecuación (4-19) es la función de transferencia para los controladores industriales analógicos, sin embargo, la ecuación de los controladores digitales es la forma discreta de la ecuación (4-17). Los métodos para ajustar los controladores digitales no son muy diferentes de los que se utilizan para ajustar los controladores analógicos, lo cual se vera durante las prácticas de ajuste de controlador para los controladores instalados en la planta de procesos de la FIMCP.



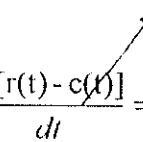
Antes de concluir esta sección son pertinentes algunos otros comentarios. En la ecuación (4-17) se ve que, en cualquier momento en que cambia el parámetro  $K_c$ , esto afecta las acciones de integración y derivación, ya que  $\tau_I$  y  $\tau_D$  se dividen o multiplican por dicho parámetro; esto significa que, si únicamente se desea cambiar la acción proporcional pero no la cantidad de reajuste o anticipación, entonces también se deben cambiar los parámetros  $\tau_I$  y  $\tau_D$  para adaptarlos al cambio  $K_c$ . Todos los controladores analógicos son de este tipo, y algunas veces se les conoce como "controladores interactivos"; la mayoría de los controladores con base en microprocesadores también son del mismo tipo; sin embargo, existen algunos en los que se evita este problema mediante la substitución del término  $K_c / \tau_I$  por el término único  $K_I$  y el término  $K_c \tau_D$  por  $K_D$ , lo cual quiere decir que los tres parámetros de ajuste son  $K_I$ ,  $K_D$  y  $K_c$ .

El comentario final se relaciona con la acción derivativa. La forma típica para cambiar el punto de control del controlador es la introducción de un cambio, se muestra en la Figura 4.11a; cuando esto ocurre, también se introduce un cambio del error en escalón, como se ilustra en la Figura 4.11b; y, puesto que el controlador toma la derivada del error, ésta produce un cambio súbito en la

salida del controlador, como se ve en la Figura 4.11c; el cambio en la salida del controlador es innecesario y, posiblemente, va en detrimento de la operación del proceso. Para sortear este problema se ha propuesto la utilización de la derivada de la variable que se controla, pero

$$-\frac{dc(t)}{dt}$$

con signo contrario en un punto de control permanece constante, como se puede ver mediante lo siguiente:

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{d[r(t) - c(t)]}{dt} = \frac{dr(t)}{dt} - \frac{dc(t)}{dt}$$


En el momento en que se introduce el cambio en el punto de control la "nueva" derivada no ocasiona un cambio súbito, inmediatamente después el comportamiento vuelve a ser el mismo de antes.

Esta opción se ofrece en algunos controladores analógicos y en los que tienen como base microprocesadores, y se conoce como derivada sobre la variable que se controla.



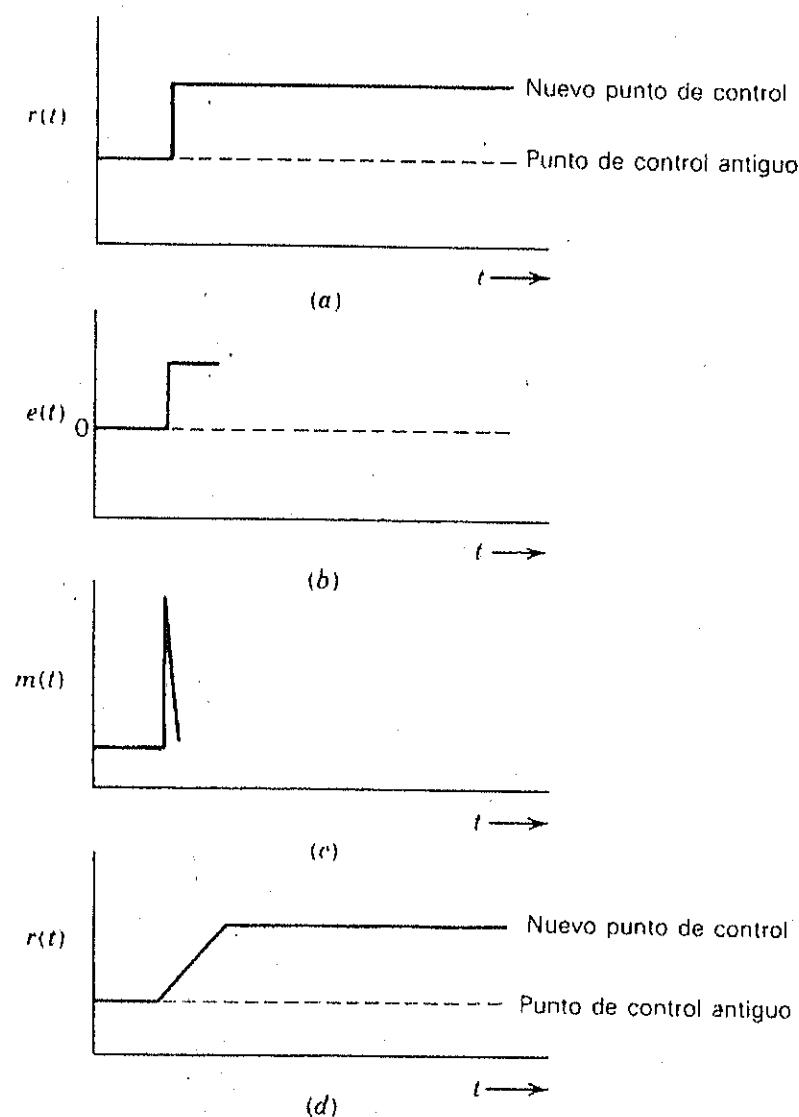
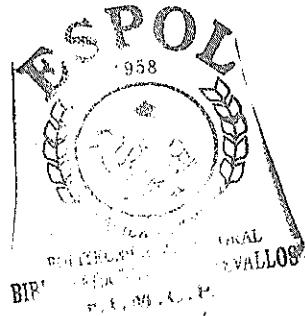


FIGURA 4.11. EFECTOS DE LOS CAMBIOS DE CONTROL

Otra posibilidad para evitar el problema de derivación se consigue fácilmente mediante la utilización de controladores digitales; en esta opción se cambia el punto de control en forma de rampa; aun cuando el operador lo cambia en escalón, como se observa en la



### Reajuste excesivo

Un problema real e importante en el control de proceso es el reajuste excesivo y puede ocurrir en cualquier momento cuando el controlador tiene el modo integral de control. Para explicar este problema se utiliza el circuito de control del intercambiador de calor que se muestra en la Figura 4.3.

Supóngase que la temperatura de entrada al proceso desciende en una cantidad significativa; este disturbio provoca que baje la temperatura de salida del proceso y, a su vez, el controlador (PI o PID) hace que la válvula de vapor se abra; puesto que la válvula es de aire para abrir, la señal neumática del controlador se incrementa hasta que, a causa de la acción de reajuste, la temperatura de salida se iguala con el punto de control que se desea.

Supóngase que en el esfuerzo por reestablecer la ubicación de la variable que se controla en el punto de control, se integra hasta 15 psig en el controlador, punto en el cual la válvula de vapor está completamente abierta y, por lo tanto, el circuito de control, ya no

puede hacer más; esencialmente el proceso está fuera de control, lo cual se ilustra en la Figura 4.12.

En la figura se muestra que, cuando la válvula está completamente abierta, la variable que se controla (temperatura de salida) aún no llega al punto de control y, puesto que todavía existe el error, el controlador trata de corregirlo mediante un mayor incremento (integración del error) en su presión de salida, aun cuando la válvula no se puede abrir más allá de 15 psig.

En efecto, la salida del controlador se puede integrar hasta la presión de suministro, la cual es generalmente de casi 20 psig; en este punto ya no se puede incrementar la salida del controlador, debido a que la salida está saturada, tal estado del sistema también se muestra en la Figura 4.12.

La saturación se debe a la acción de integración (reajuste) del controlador; mientras el error esté presente, el controlador continuará cambiando su salida. Dicho estado de saturación se conoce como "reajuste excesivo".



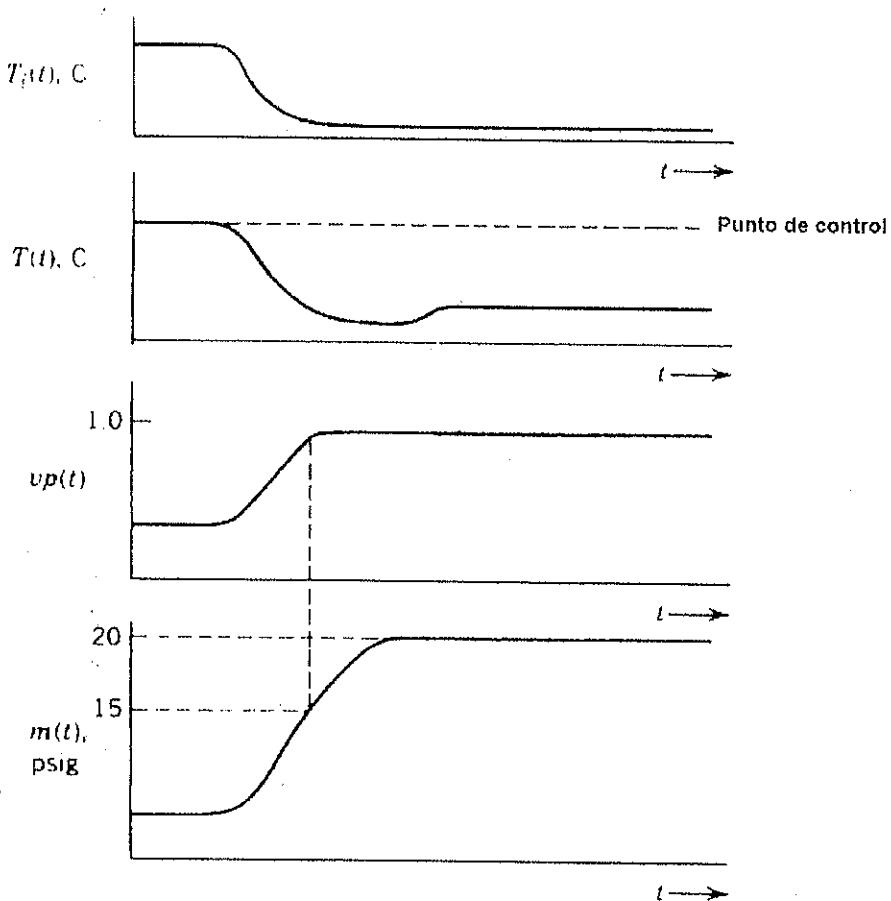


FIGURA 4.12: RESPUESTA DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Si ahora se supone que la temperatura de entrada sube nuevamente, la temperatura de salida del proceso, a su vez, empezará a incrementarse, como se muestra también en la Figura 4.13, donde se aprecia que la temperatura de salida alcanza y pasa el punto de control y la válvula permanece completamente

abierta, aunque, de hecho, debería estar cerrándose, la razón de que no se cierre es porque el controlador debe integrar hacia abajo; desde 20 a 15 psig, antes de que empiece a cerrar la válvula, pero en el momento en que eso sucede, la temperatura de salida ha sobrepasado el punto de control en una cantidad considerable.

Como se mencionó anteriormente, este problema de reajuste excesivo puede ocurrir en cualquier momento en que esté presente la integración en el controlador, y se puede evitar si el controlador se pone en manual tan pronto como su salida alcanza 15 psig, ya que así se detiene la integración; el controlador puede volver a ponerse en automático cuando la temperatura empieza a descender. La desventaja de esta operación es que requiere la atención del operador; sin embargo, la mayoría de los controladores que hay a la venta tienen "protección contra reajuste excesivo", con la cual se detiene la integración automáticamente cuando el controlador alcanza 15 psig (20 mA) o 3 psig (4 mA). Puesto que esta protección es una característica especial del controlador, el ingeniero debe tomar en cuenta si el reajuste excesivo se puede presentar y en ese caso, especificar la protección.

El reajuste excesivo se presenta típicamente en los procesos por lotes, el control en cascada y cuando al elemento final de control se le maneja mediante varios controladores, como es el caso de los controles por sobreposición.

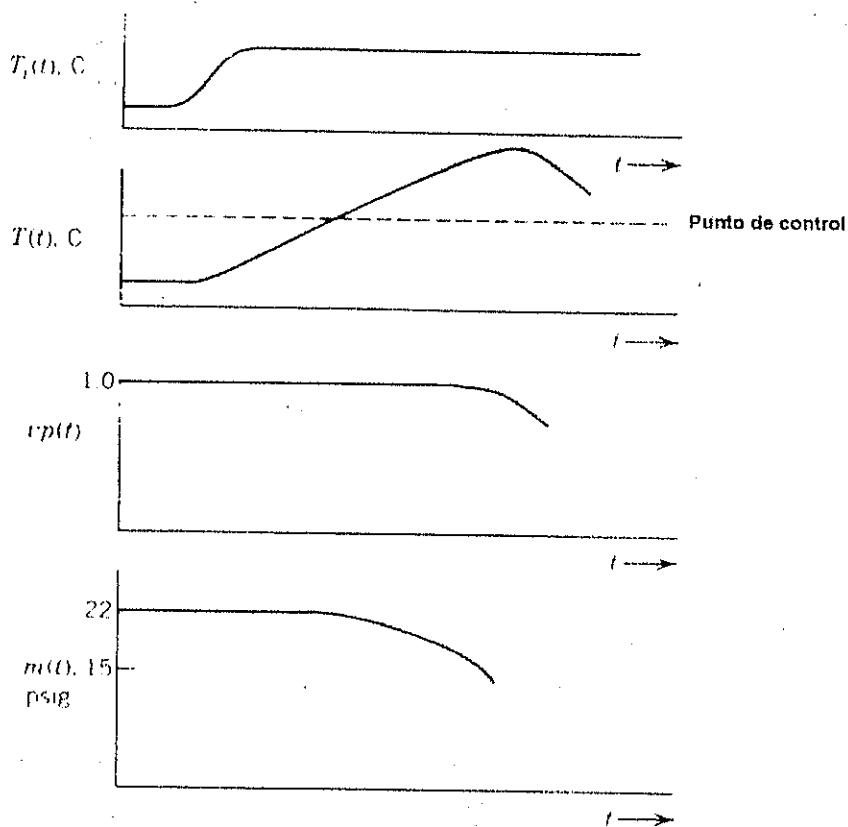


FIGURA 4.13. RESPUESTA DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.



#### 4.2. Descripción del controlador proporcional integral diferencial.

Para el desarrollo del proyecto de actualización de la planta de procesos industriales de la FIMCP se decidió sustituir los controladores neumáticos deteriorados, por controladores virtuales creados bajo el software Lab View, dicho software nos permitió crear aplicaciones para computadora, usando programación gráfica como se trato en el capítulo tres.

La ventaja de estos controladores es amplia en comparación con los controladores neumáticos, su fácil manejo, la permanencia en la calibración, y sobre todo la capacidad de adaptarse a cualquier requerimiento de un sistema de control, alterando o cambiando su programación en función de los parámetros que rigen el sistema. Adaptar un controlador virtual también representa una ventaja económica debido que cualquier reajuste o traducción de una variable se puede conseguir mediante la programación y se requiere comprar instrumentos aparte que traduzcan o manipulen las variables para luego introducirlas en el controlador, además la necesidad de adquirir registradores para los procesos, se descarta al programar registradores virtuales para las variables controladas.



217

El programa creado bajo Lab View para controlar los procesos del Lazo de caudal y nivel de la planta, contiene integrado un controlador **PID** dentro de un lazo principal de adquisición de datos y control, el alma del programa es éste controlador virtual, fue construido con los mismos parámetros de un controlador neumático es decir que obedece a los mismo principios matemáticos, de igual modo opera comparando la variable de entrada contra un punto de control, estableciendo un error entre estos y tratando de corregirlo mediante la variable de salida del controlador.

El controlador virtual fue creado bajo las mismas teorías de controladores expuestas al comienzo de este capítulo, se le dedica especial énfasis a respetar los algoritmos matemáticos que permiten su operación y de este modo garantizar funcionabilidad bajo operación normal y al exponerlo a perturbaciones del sistema y esperar que las controle. Además se espera que el controlador virtual permita realizar las prácticas de ajuste de controlador para el módulo de control de caudal y nivel, según la teoría, y adaptarse a los procedimientos de la práctica, para lo cual debería responder como un controlador convencional. Se puede catalogar a este controlador virtual dentro de los controladores digitales por el hecho de residir dentro de una computadora que opera en un medio digital, pero físicamente el controlador no existe,

ya que es un software, lo que lo convierte en virtual. A continuación se muestra en la Figura 4.14 el panel principal de control del Lazo de control de Nivel.

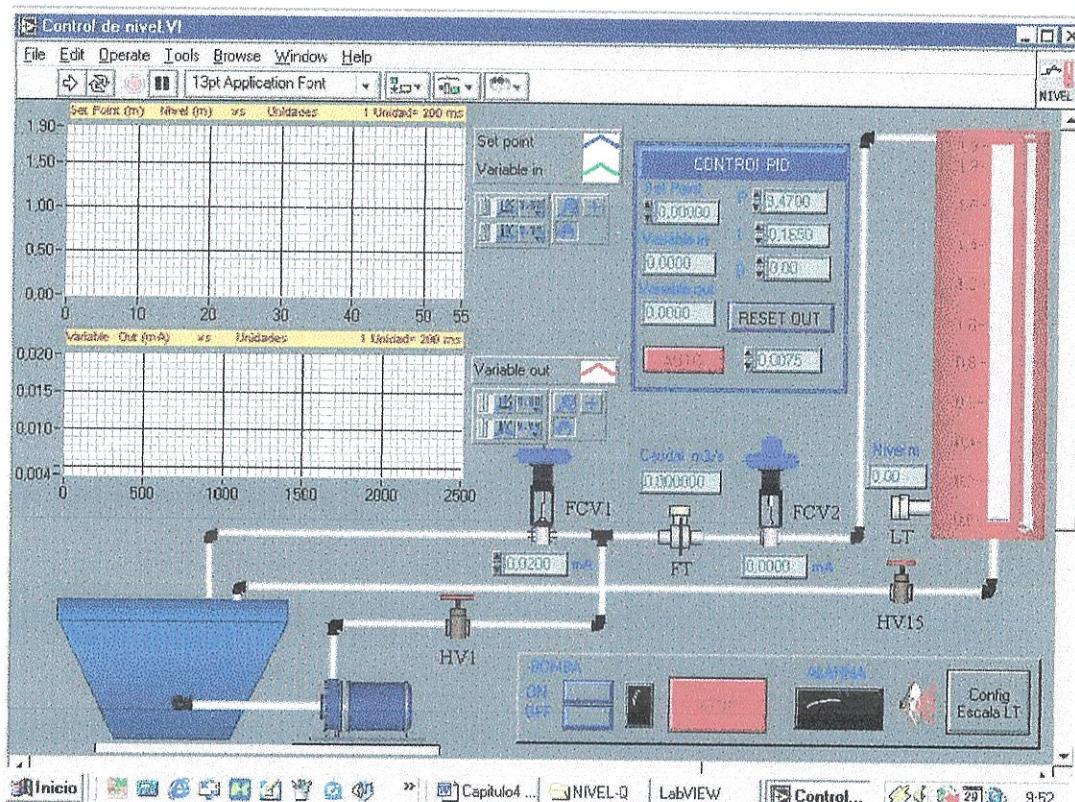


FIGURA 4.14. PANEL DE CONTROL DEL LAZO DE NIVEL

Este panel frontal tiene su correspondiente panel de diagrama de bloque, se puede apreciar en la Figura 4.15, en el se muestra todas los iconos de la programación gráfica, y el alma del programa el controlador PID a manera de un ícono que detallaremos a continuación.

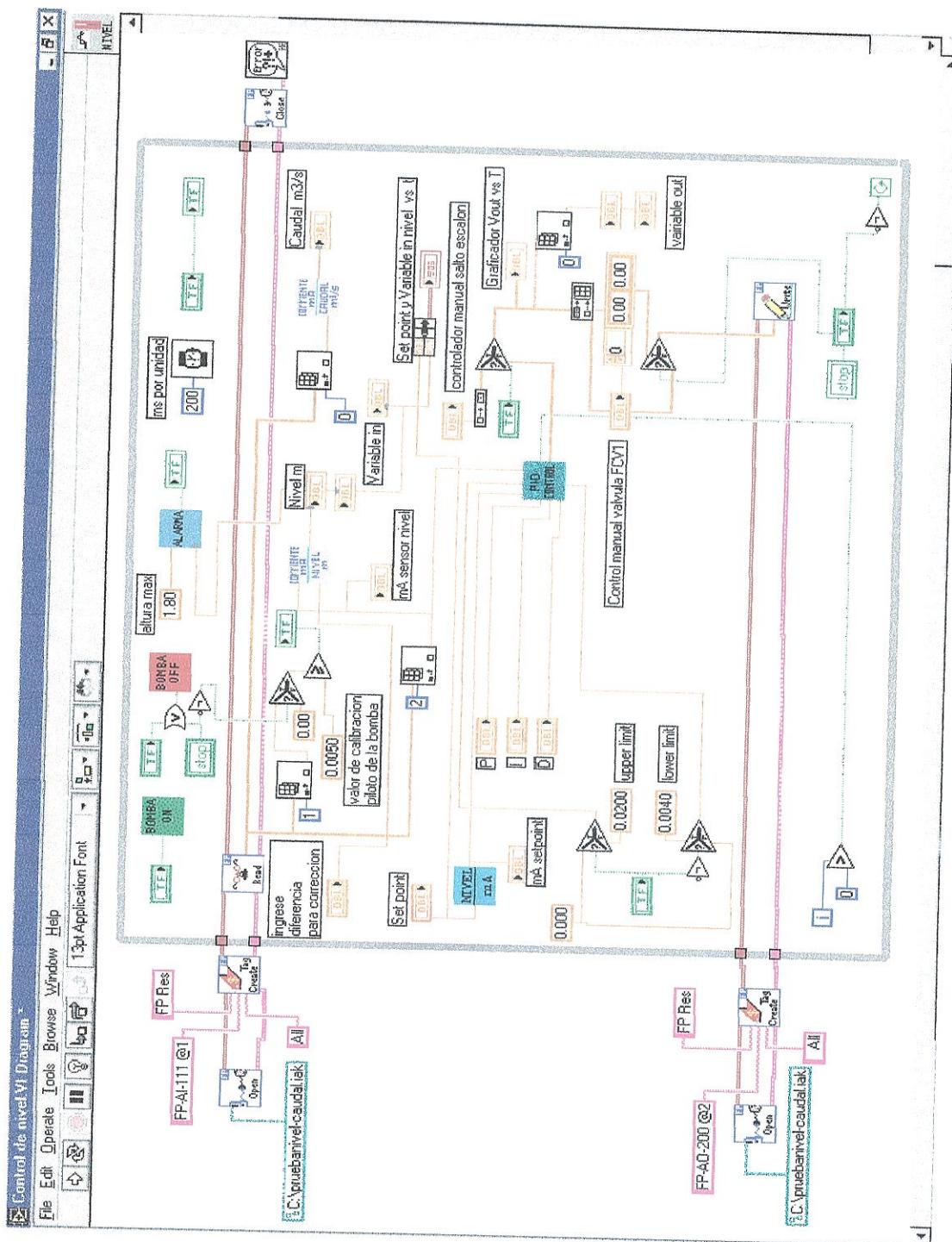


FIGURA 4.15. PANEL DE DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LAZO DE NIVEL

Los paneles de control y programación para cada programa se explicaran más detalladamente en los siguientes puntos, en este punto se dará énfasis a la creación del controlador **PID**.

Dentro del panel de programación o el panel de diagrama de bloques, de la Figura 4.15 se destaca el icono que representa el controlador **PID**, este icono se lo conoce como un subprograma, debido a que fue creado como un instrumento virtual aparte y luego insertado en el programa principal para ser enlazado con las entradas y salidas de cada sistema.

En la Figura 4.16 se representa el icono del controlador **PID**, en las dos formas que se puede visualizar dentro de Lab VIEW , solo mostrando el icono y mostrando sus conexiones, este subVI tiene por nombre pidcontrol su extensión es .VI.

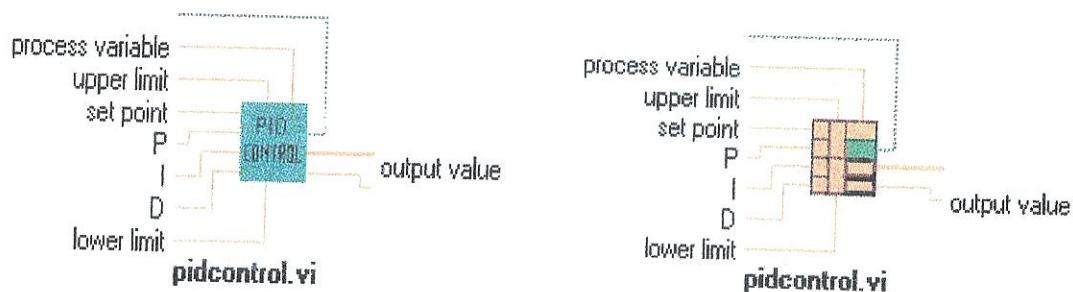


FIGURA 4.16. ICONO DEL CONTROLADOR PID

Al ejecutar este ícono dándole doble clip o al abrirlo directamente desde Lab VIEW, buscándolo por su nombre pidcontrol.vi se abre el panel frontal de este programa y su correspondiente panel de diagrama de bloques como se muestra en la Figura 4.17.

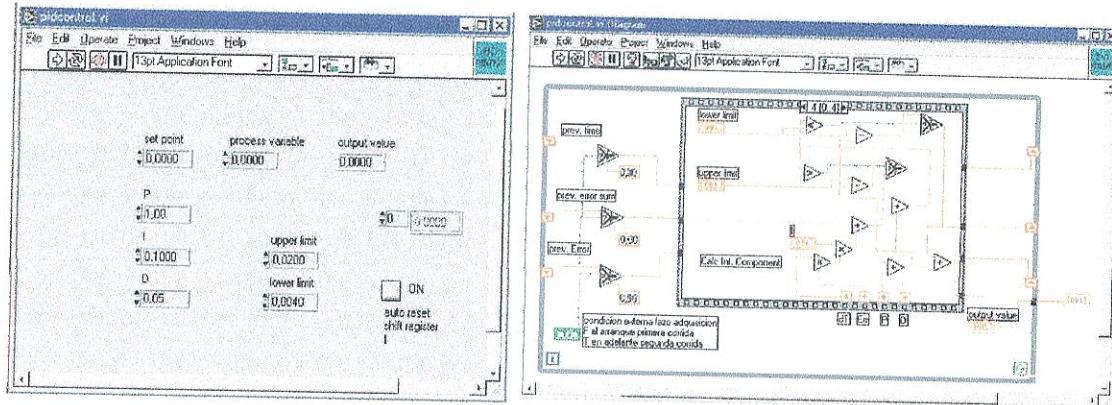


FIGURA 4.17. PANEL PRINCIPAL Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PID.

El panel frontal del subVI pidcontrol.vi, muestra todas las entradas y salidas que requiere el controlador, mientras que en el panel de diagrama de bloques se aprecia la programación para el controlador, este tipo de programación se la conoce como gráfica.

A continuación se describirá de manera detallada cada uno de los controles e indicadores que se usaron para la creación del controlador virtual pidcontrol.vi, dentro del panel frontal.

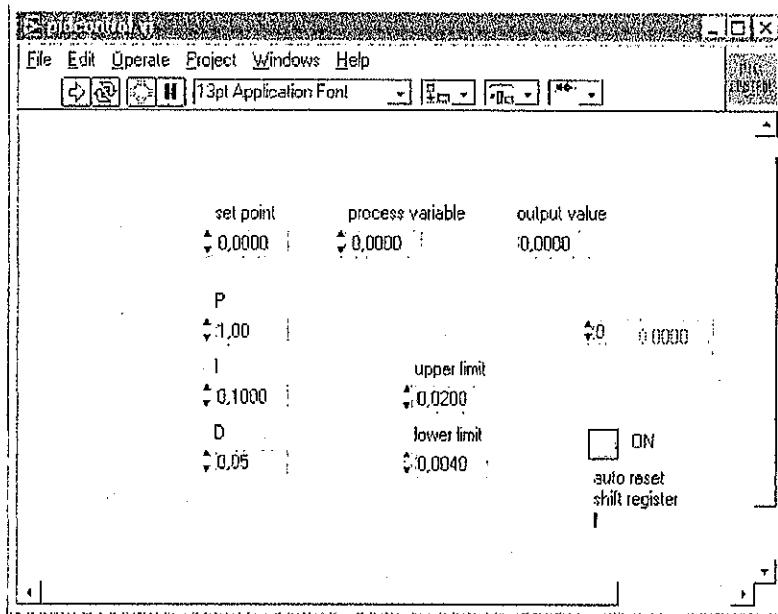


FIGURA 4.18. PANEL PRINCIPAL Y DEL CONTROLADOR PID.

**set point**  
0,0000      **Punto de Control:** desde este controlador se introduce al controlador virtual PID el valor a controlar.

**process variable**  
0,0000      **Variable de proceso:** desde este controlador se introduce la variable del proceso que se quiere controlar.

**output value**  
0,0000  
0,0000      **Valor de salida:** desde este indicador el controlador PID muestra y envía el valor con el que se contrarresta el error entre el punto de control y la variable de proceso, con el fin de corregir dicho error.

P

Valor proporcional o la ganancia: desde este controlador se introduce esta constante para el ajuste de controlador PID.

Valor integral: desde este controlador se introduce esta constante para el ajuste de controlador PID.

D

Valor derivativo: desde este controlador se introduce esta constante para el ajuste de controlador PID.

Estas tres constantes son utilizadas en los cálculos internos del controlador, de su ajuste o calibración depende la eficiencia del controlador en el proceso.

upper limit

lower limit

Valores de salida límites: desde estos controles se introducen los valores máximos y mínimos de operación del controlador PID.

 ONauto reset  
shift register

Botón de encerado: desde este botón se encera los registros de memoria del controlador PID.

A continuación se describirá de manera detallada cada uno de los pasos que se siguieron para la creación del controlador virtual pidcontrol.vi, dentro del panel de diagramas de bloques.

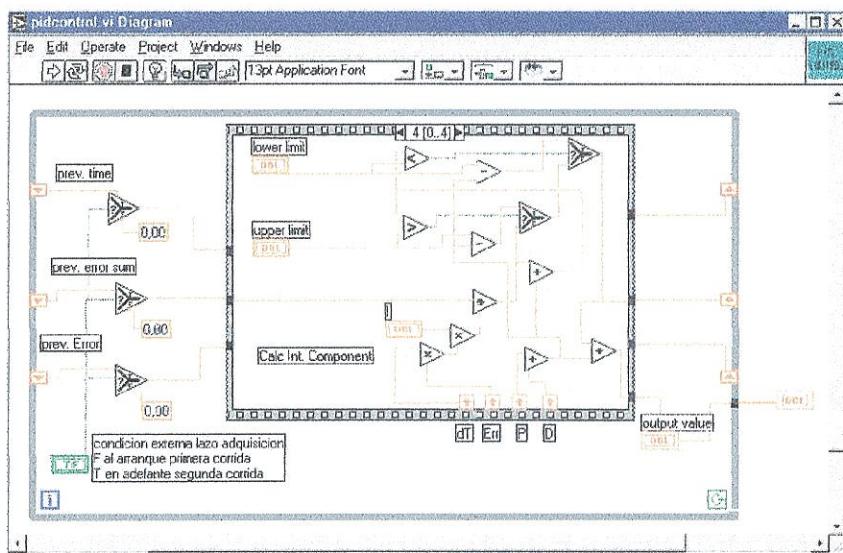


FIGURA 4.19. PANEL DE DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PID.

El controlador virtual se basa en una estructura de lazo que se repite indefinidamente (While loop), esto nos permite realizar los cálculos mediante iteraciones. En la estructura While loop se cargan registros de corrimiento (Shift Register), que se utilizan para almacenar datos después de un ciclo y compararlos en el siguiente ciclo, de este modo se utiliza esta estructura para realizar operaciones numéricas como derivación e integración.



Estos registros son encerados cada vez que el controlador es corrido mediante el botón de encerado del panel frontal, para evitar que los viejos registros interfieran con los nuevos cálculos del controlador PID, este enceramiento se realiza de modo automático dentro del programa cada vez que este arranca.

A continuación entraremos a detallar el algoritmo matemático que comanda el controlador PID, que como se indica en la teoría, operan en base al error entre el punto de control y la variable del proceso, el controlador virtual que se creó responde a dichas teorías, la ecuación 4.22 describe la operación del controlador PID.

$$m(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad 4.22$$

La salida del controlador en el tiempo o  $m(t)$ , esta conformada por la sumatoria de las tres partes de esta ecuación, como se muestra en la Figura 4.19

$$m(t) = \textcircled{K_c e(t)} + \textcircled{\frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt} + \textcircled{K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt}}$$

**P Componente    I Componente    D Componente**

FIGURA 4.20. ALGORITMO MATEMÁTICO DEL CONTROLADOR

Estas tres partes principales de la ecuación 4.1 se programaron dentro de una estructura de secuencia (Sequence Structure), esta estructura se encuentra dentro del lazo (While loop), el modo de operación de esta estructura es ejecutar secuencialmente cada cuadro de programación, para el controlador virtual se cuenta con cinco cuadros, en los cuales se ha separado la ecuación 4.22. A continuación detallaremos cada cuadro de la estructura de secuencia del controlador virtual.

### Cálculo del diferencial de tiempo

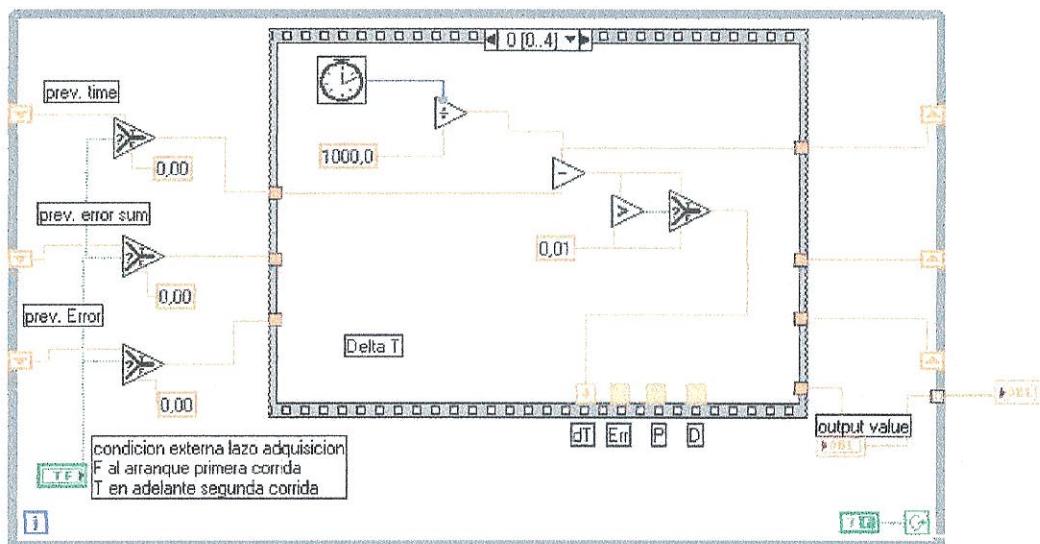


FIGURA 4.21. CÁLCULO DEL DIFERENCIAL DE TIEMPO

En la Figura 4.21 se muestra el primer cuadro 0[0..4] de secuencia de funcionamiento del controlador virtual. Dentro de este cuadro se calcula el

diferencial de tiempo o  $dt$  para los cálculos de las partes derivativa e integral, en base al reloj interno de la computadora, el diferencial se logra luego de la segunda corrida del lazo (While loop), el programa calcula la diferencia entre el tiempo de la presente corrida y la anterior , este valor es guardado en un registro de memoria, para ser utilizado luego en los demás cuadros de programación de la estructura secuencial.

En la Figura 4.22 se aprecia el calculo del diferencial de tiempo y como se guarda dentro del registro de memoria  $dt$ .

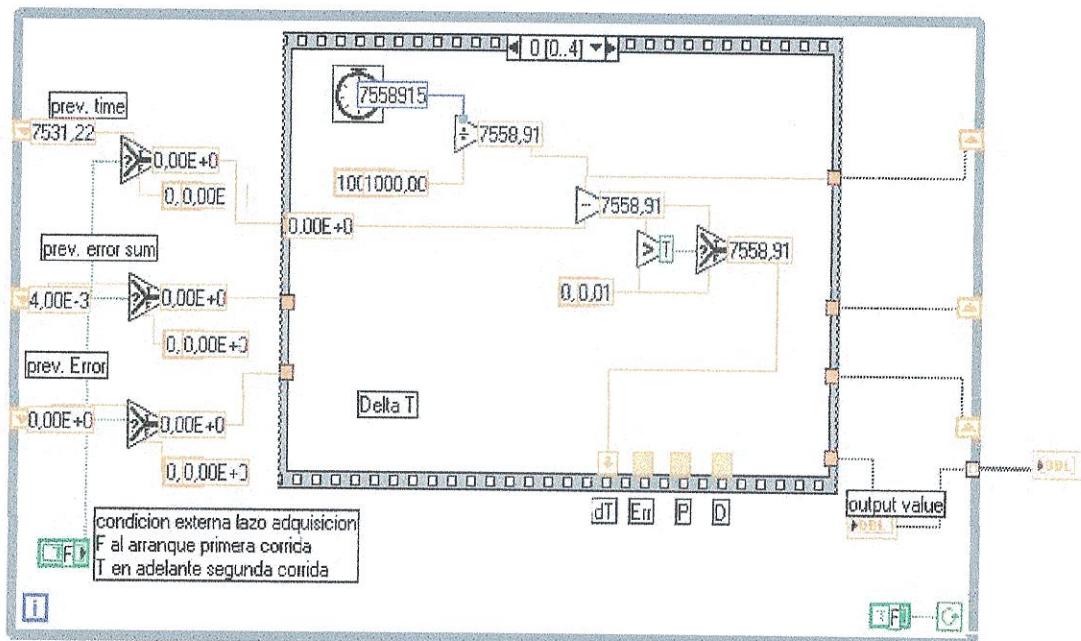


FIGURA 4.22. CÁLCULO DEL DIFERENCIAL DE TIEMPO



### Cálculo del error.

En la Figura 4.23 se muestra el segundo cuadro 1[0..4], de secuencia de funcionamiento del controlador virtual. Dentro de este cuadro se calcula el error entre el punto de control y la variable del proceso, para los cálculos de las partes proporcional, derivativa e integral, este valor es guardado en un registro de memoria Err, para ser utilizado luego en los demás cuadros de programación de la estructura secuencial.

Además es cargado en un registro de corrimiento de memoria llamado prev Error, dentro del lazo (While loop), luego se usara en la parte derivativa.

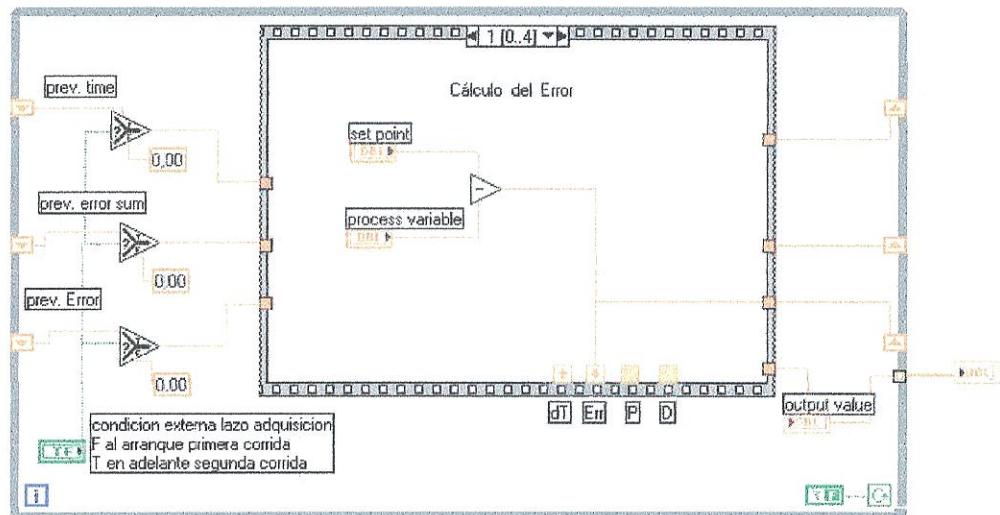


FIGURA 4.23. CÁLCULO DEL ERROR

### Cálculo del componente proporcional

En la Figura 4.23 se muestra el tercero cuadro 2[0..4], de secuencia de funcionamiento del controlador virtual. Dentro de este cuadro se calcula el componente proporcional, se extrae el valor del error del registro de memoria Err y se multiplica directamente con la constante del valor proporcional dada desde el panel frontal del PID, este valor es guardado en un registro de memoria P, para ser utilizado luego en los demás cuadros de programación de la estructura secuencial.

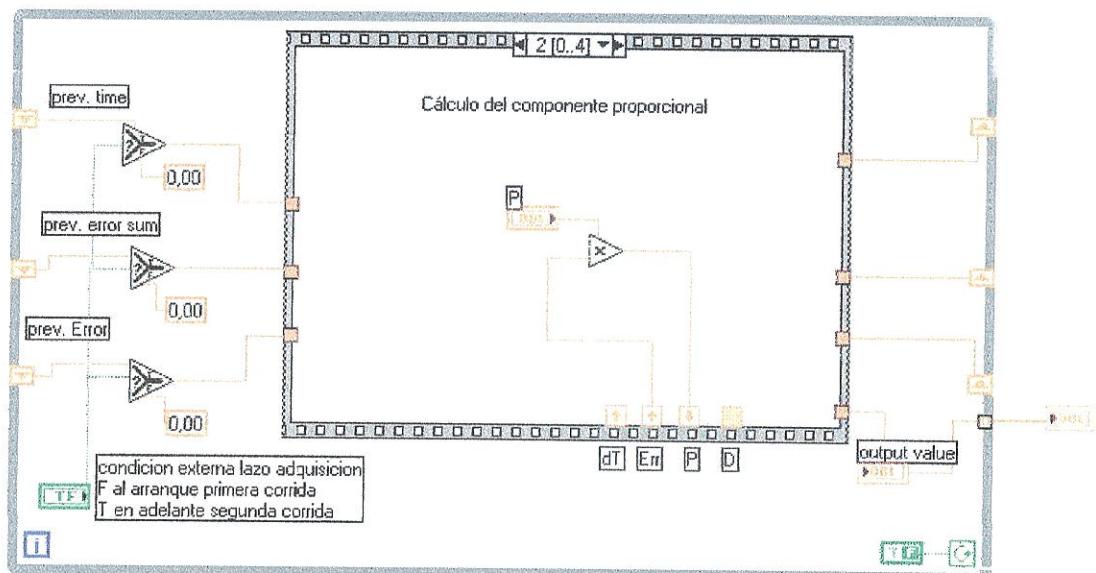


FIGURA 4.24. CÁLCULO DEL COMPONENTE PROPORCIONAL

### Cálculo del componente derivativo.

En la Figura 4.25 se muestra el cuarto cuadro 3[0..4], de secuencia de funcionamiento del controlador virtual. Dentro de este cuadro se calcula el componente derivativo, se calcula el diferencial del error  $dE$ , para esto se extrae del registro de memoria el valor Err y se resta del registro de corrimiento de memoria prev Error del lazo (While loop), este diferencial de error es dividido para el valor del registro de memoria  $dT$ , luego se multiplica directamente con la constante del valor diferencial dada desde el panel frontal del PID. El valor de la componente diferencial luego es guardado en el registro de memoria D, para ser utilizado luego en los demás cuadros de programación de la estructura secuencial.

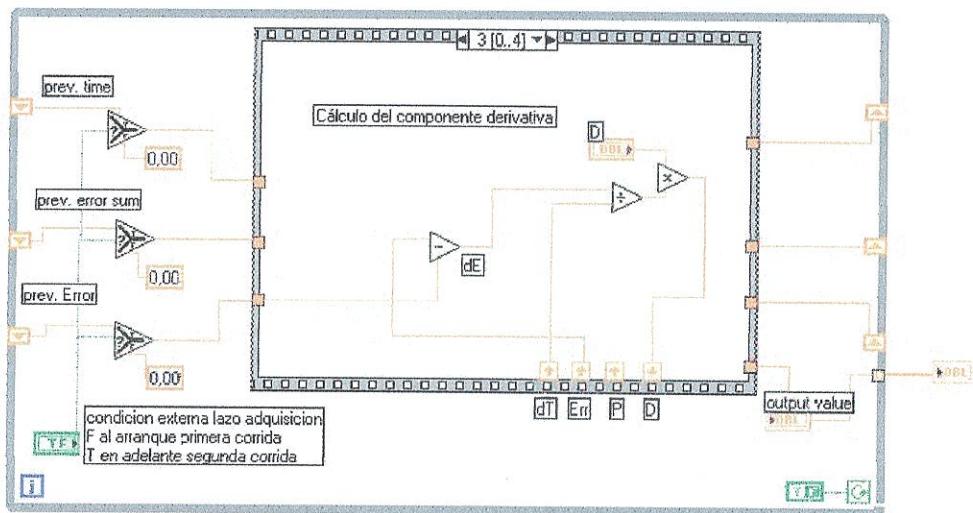


FIGURA 4.25. CÁLCULO DEL COMPONENTE DIFERENCIAL

### Cálculo del componente integral.

En la Figura 4.26 se muestra el cuarto cuadro 4[0..4], de secuencia de funcionamiento del controlador virtual. Dentro de este cuadro se calcula el componente integral, se extrae el diferencial del tiempo  $dT$ , y el error Err del registro de memoria y se multiplican, este resultado a su vez se multiplica directamente con la constante del valor integral. dada desde el panel frontal del PID, se extrae la sumatoria de las integrales previas del registro de memoria prev. Error. Sum del lazo (While loop), y se suman con el presente valor de integración dando como resultado la componente de integración. El valor de esta componente es cargado al registro de memoria prev. Error. Sum del lazo (While loop), y de este modo se incrementa la sumatoria y se obtiene una integración numérica. El valor de la componente diferencial es extraído del registro de memoria D y el valor de la componente proporcional también es extraído del registro de memoria P, estas dos componentes se suman con la componente de integración y se crea la respuesta de un controlador **PID**.

Para terminar con la descripción del controlador **PID** faltaría la función de las constantes límite bajo (lower limit) y Límite alto (upper limit) las cuales se encargan de limitar los máximos y mínimos valores de salida del controlador para nuestro caso el rango máximo es de 4 a 20 mA .

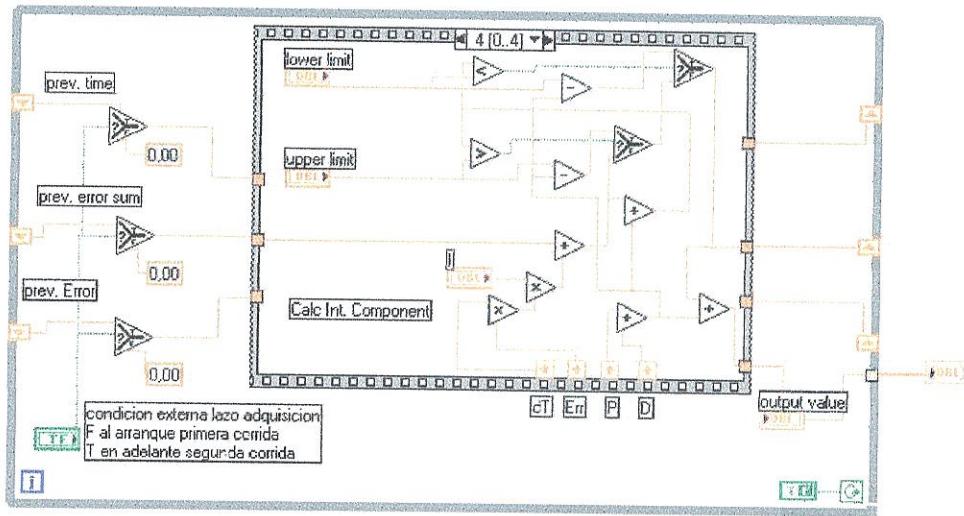


FIGURA 4.26. CÁLCULO DEL COMPONENTE INTEGRAL

El valor de salida de la estructura de secuencia es de tipo numérico, pero se requiere cambiarlo a una notación matricial a la salida del lazo (While loop) para ser utilizado posteriormente en programa principal, el total de la suma de las tres componentes es cargado en el valor de salida (output value) y opera dentro de los rangos fijados de 4 a 20 mA.

Como se puede apreciar el controlador PID virtual que se creó se ajusta ciertamente a la teoría de controladores por retroalimentación.



#### 4.3. Descripción del ciclo de adquisición y control del programa.

La planta de procesos industriales cuenta con dos lazos de control en el módulo de control de nivel y caudal. Cada lazo cuenta con un programa de control diferente en cuanto a la variable que se controla, en el caso del lazo de control de nivel se intenta controlar el nivel de agua de ingreso al tanque principal, en el caso del lazo de control de caudal se intenta controlar el caudal de ingreso al tanque principal.

Ambos programas de control funcionan de manera similar y utilizan los mismos sensores y válvulas de control, de igual manera adquieren y envían información del mismo modo hacia la interfase Field Point, como el ciclo de adquisición es igual para los dos programas de control, solo se hará referencia de un ciclo de adquisición y control.

La Figura 4.27 muestra un esquema del programa de control dentro del diagrama de bloques del proceso, se puede apreciar la implementación de un sistema SCADA y el manejo de la información dentro del programa de control a través de la interfase Field Point. El lazo de adquisición y control contiene la programación del controlador PID virtual y las subrutinas para la interfase gráfica con el usuario.

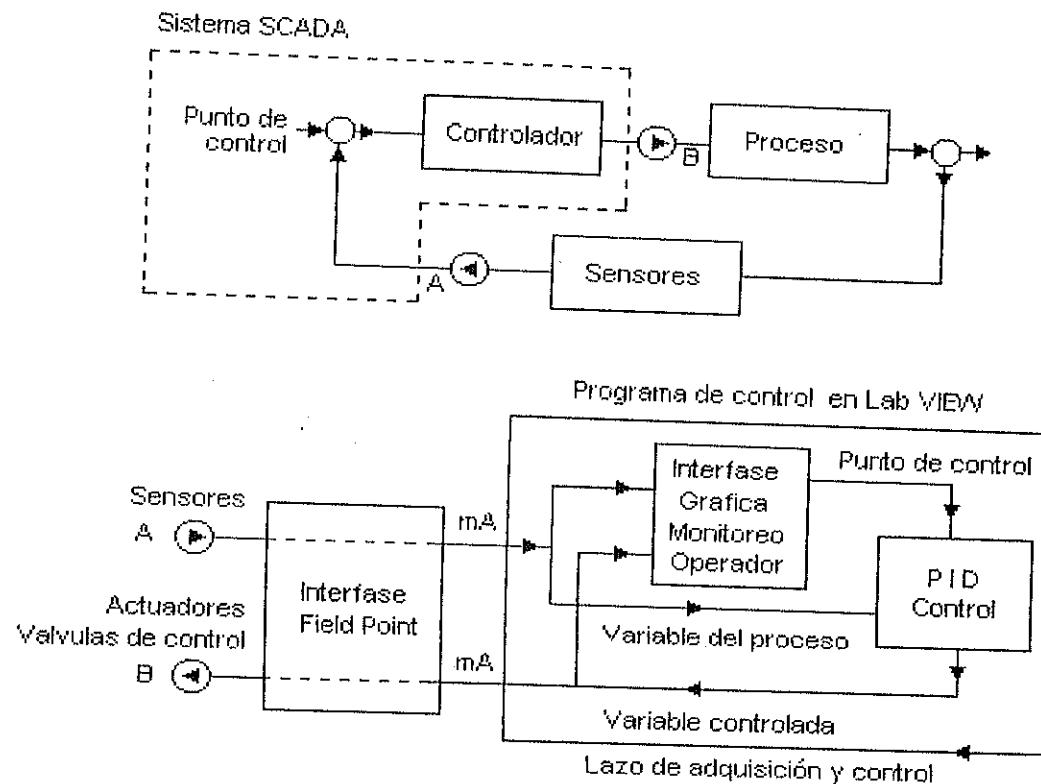


FIGURA 4.27. ESQUEMA DEL PROGRAMA DE CONTROL

El programa principal de control está formado por un lazo (While loop) y su principal función es adquirir y enviar datos a la interfase Field Point de un modo continuo, para el control retroalimentado de la planta de procesos. Dentro de este lazo se encuentran todos los SubVI's que se encargan de acondicionar todas las entradas y salidas para el controlador PID virtual.

A continuación se describirá el modo de adquisición de datos desde la interfase Field Point hasta el lazo (While loop). La Figura 4.28 muestra la programación para el ciclo de adquisición.

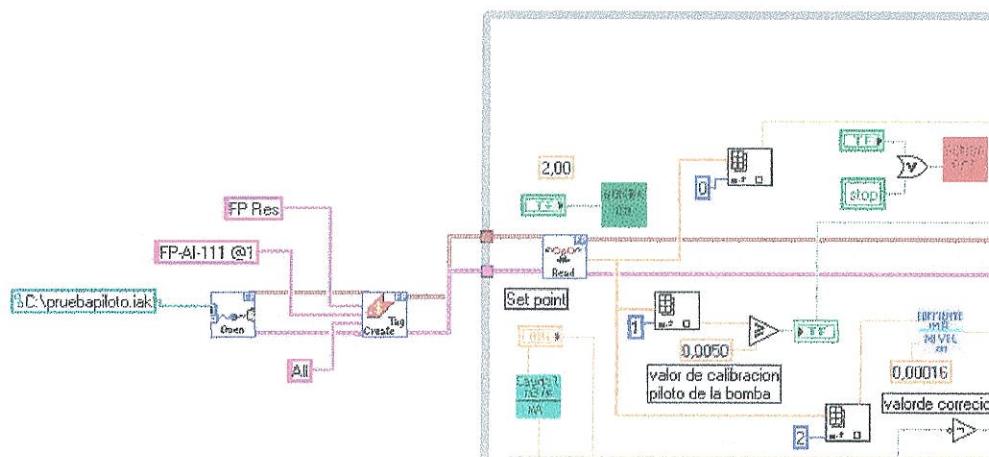
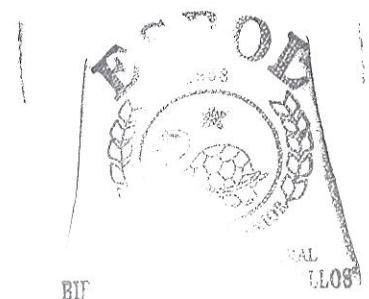


FIGURA 4.28. ADQUISICIÓN DE DATOS EN EL LAZO

La programación que se muestra fuera del lazo (While loop) es la que se encarga de establecer comunicación entre el programa y el archivo de configuración IAK, de la interfase Field Point, el resultado final es la adquisición directa desde la Interfase Field Point y el programa de control.

A continuación detallaremos cada uno de los iconos que se utilizan para la adquisición desde la interfase Field Point.



### FP Open.vi

El FP Open.vi abre una sesión de comunicación con el servidor de Field Point y un archivo de la configuración especificado IAK. Si el IAK Archivo de Configuración de entrada queda vacío o sin escribir, se usará el último archivo IAK que se abrió en Explorador de Field Point automáticamente. Sin embargo, siempre debe escribirse la dirección exacta del archivo de IAK se quiere usar ( C:/pruebanivel-caudal.IAK).

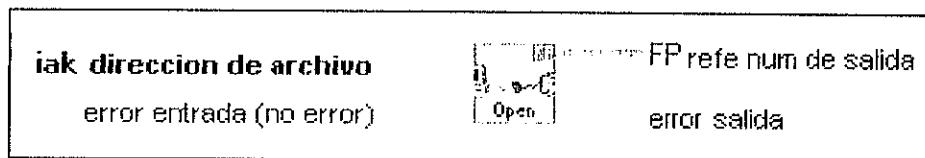


FIGURA 4.29. FP OPEN.VI

### FP Create Tag.vi

Este VI crea una etiqueta de referencia para los datos del dispositivo especificado en el y recurso de comunicación que son accedidos por la sesión de comunicación del FP refnum : Los valores para el Recurso de Comunicación (FT RES), Nombre del Dispositivo (FP-AI-111 @1), y

Nombre del ítem deben ser exactos para los ítems nombrados en el archivo configuración IAK (All) . Un FP Create Tag.vi debe usarse para cada ítem eso se supervisará o se controlará en el programa.

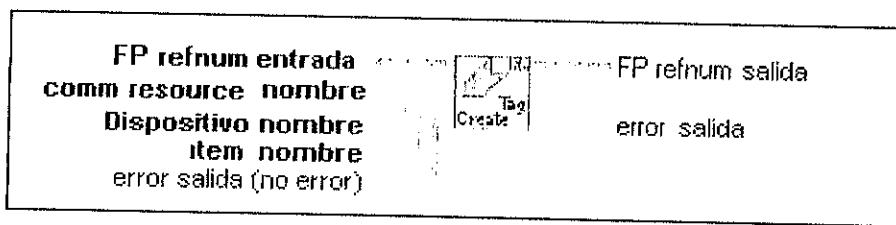


FIGURA 4.30. FP CREATE TAG.VI

### FP Read.vi

El FP Read.vi realiza una sincronización de lectura con el módulo. Este VI lee un solo juego de valores de la etiqueta (tag) especificada por el FP refnum. Los valores leídos son enviados dentro de una configuración de arreglo o matricial.

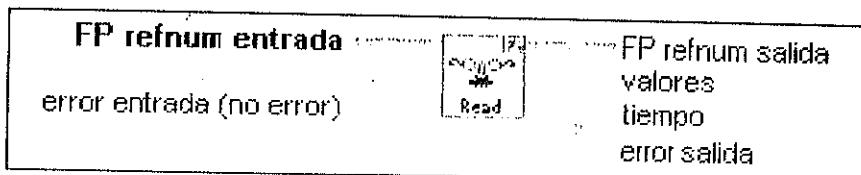
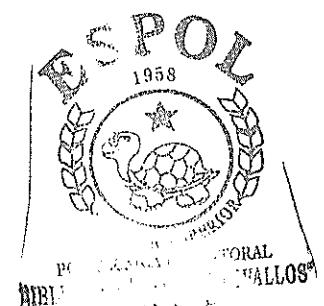


FIGURA 4.31. FP READ.VI



Finalmente la información adquirida por la interfase Field Point esta disponible dentro del programa, guardada dentro de una matriz, solo resta traducir y utilizar estos valores, que corresponden a la parte sensora de la planta de procesos, para alimentar parámetros como la variable de proceso al controlador PID virtual.

A continuación se describirá el modo de salida de datos desde el lazo (While loop) del programa hasta la interfase Field Point. La Figura 4.32 muestra la programación del ciclo de envío.

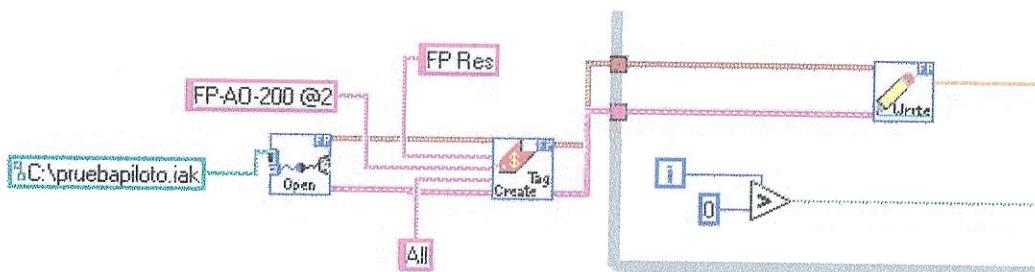


FIGURA 4.32. ENVÍO DE DATOS AL FIELD POINT

La programación que se muestra fuera del lazo (While loop) es la que se encarga de establecer comunicación entre el programa y el archivo de configuración pruebapiloto.IAK, de la interfase Field Point, el resultado final es el envío directo desde el programa de control datos a la Interfase Field Point para los elementos de control final.

A continuación detallaremos cada uno de los iconos que se utilizan para la envío y control desde el programa hasta la interfase Field Point.

### **FP Open.vi**

El FP Open.vi abre una sesión de comunicación con el servidor de Field Point y un archivo de la configuración especificado IAK., siempre debe escribirse la dirección exacta del archivo de IAK se quiere usar ( C:/pruebanivel-caudal.IAK).

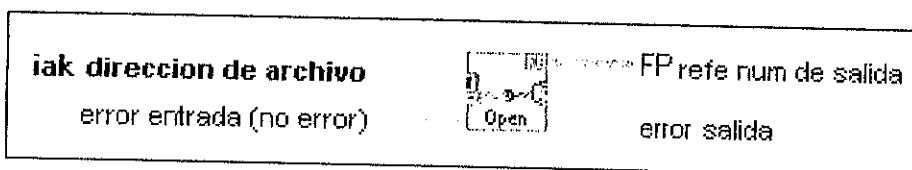
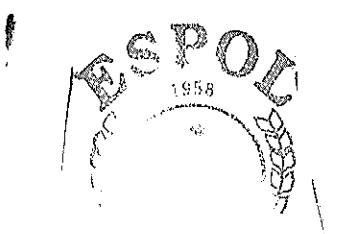


FIGURA 4.33. FP OPEN.VI

### **FP Create Tag.vi**

Este VI crea una etiqueta de referencia para los datos del dispositivo especificado en el y recurso del comunicación que son accedidos por la sesión de comunicación del FP refnum . Los valores para el Recurso de Comunicación (FT RES), Nombre del Dispositivo (FP-AO-200 @2), y Nombre del ítem deben ser exactos para los ítems nombrados en el



archivo configuración IAK (All) . Un FP Create Tag.vi debe usarse para cada ítem eso se supervisará o se controlará en el programa.

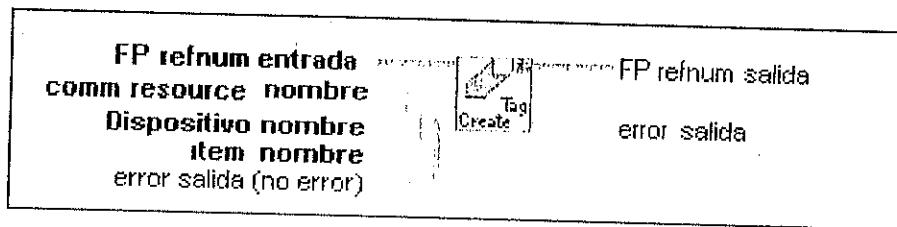


FIGURA 4.34. FP CREATE TAG.VI

### FP Write.vi

Este VI escribe a una etiqueta (Tag) especificada por el FP refnum. El FP Write.vi realiza una sincronización de escritura a la interfase Field Point . Envía los valores de una matriz cargada directamente de los valores de salida del controlador PID virtual a la interfase Field Point y al módulo de salida FP-AO-200 para el mando de los elementos finales de control.

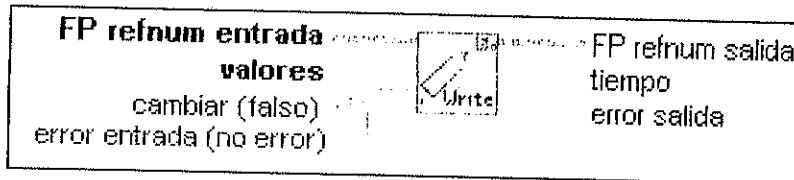


FIGURA 4.35. FP WRITE.VI

La programación para la interfase Field Point requiere una salida para finalizar la comunicación a demás de un VI para enviar mensajes en caso de un posible error el la adquisición o control y. La Figura 4.36 muestra la programación para finalizar la comunicación con la interfase Field Point. Solo se requiere un FP Close para el programa.

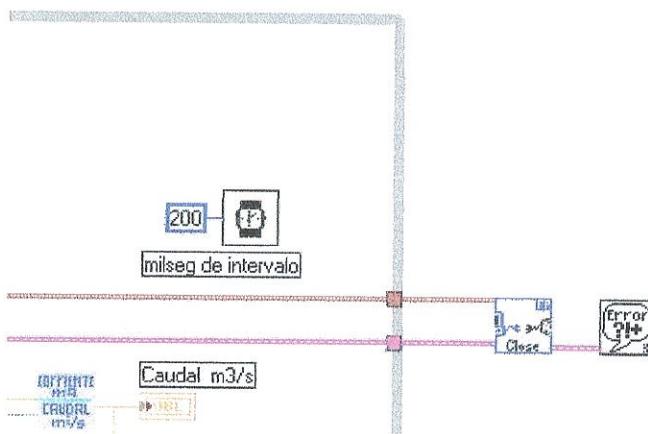


FIGURA 4.36. INTERRUPCIÓN Y ERROR DE LA COMUNICACIÓN

### FP Close.vi

El FP Close.vi cierra una sesión de comunicación con el servidor de Field Point. Sólo un FP Close.vi se necesita en un programa. Una vez un FP Close.vi se ha procesado, todos los FP renums que fueron creados por el FP Open.vi se vuelven inactivos.

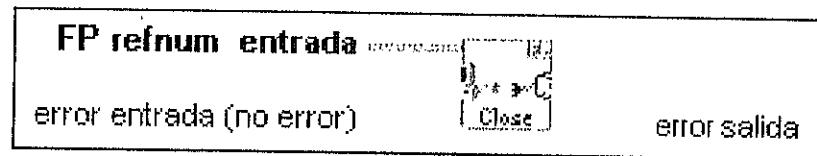


FIGURA 4.37. FP CLOSE.VI

### General Error Handler

Indica si un error ocurrió. Si un error ocurriera, este VI retorna una descripción del error y opcionalmente despliega una caja del diálogo.

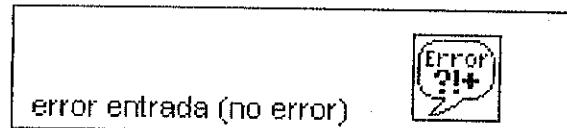


FIGURA 4.38. GENERAL ERROR HANDLER

#### 4.4. Descripción de las subrutinas o Sub VI's transductores.

Los dos lazos de control del módulo de control de nivel y caudal con sus dos programas diferentes de control, trabajan básicamente con los mismos Sub VI's transductores, su diferencia radica en el la variable que se requiere controlar, para lo cual cambia tanto la variable que ingresa al controlador PID virtual como el punto de control, de nivel en metros a caudal en metros cúbicos por segundo. La Figura 4.39 muestra el panel frontal y la Figura 4.40 de diagrama de bloques del programa de control de nivel y la Figura 4.41 muestra el panel frontal y la Figura 4.42 el diagrama de blocues del programa de control de caudal.

En los diagramas de bloques de los programa de control de la planta de procesos, veremos que dentro de estos lazos se encuentran todos los SubVI's que se encargan de acondicionar las señales adquiridas a través de la parte sensora, para mostrarlas en sus correspondientes paneles frontales en las unidades correspondientes, nivel o caudal. También existen SubVI's que facilitan el manejo de los controles de la bomba principal desde el panel frontal, también se cuenta con rutinas que mejoran el control como alarmas de sobre nivel.



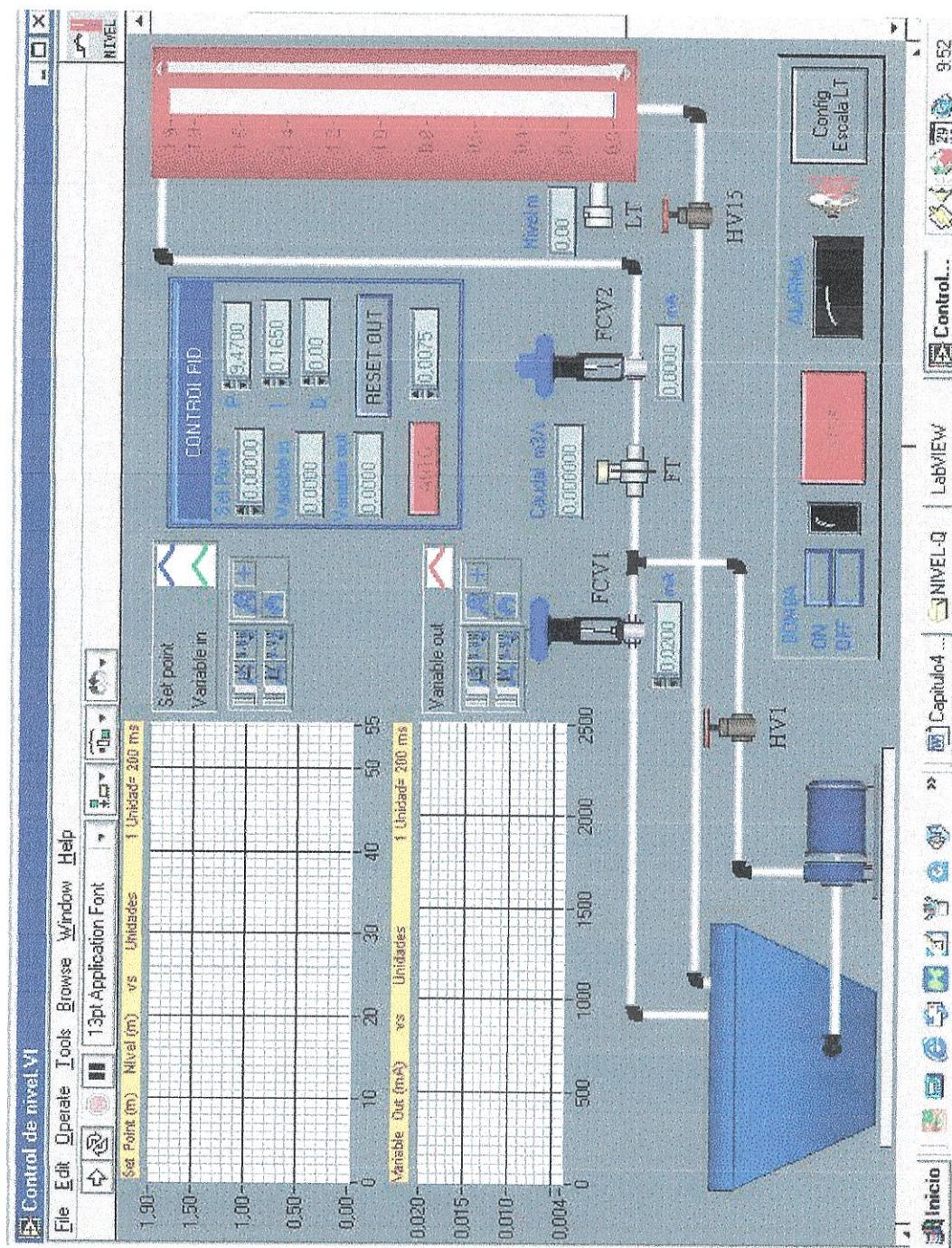


FIGURA 4.39. PANEL FRONTEL DEL PROGRAMA DE CONTROL DE NIVEL

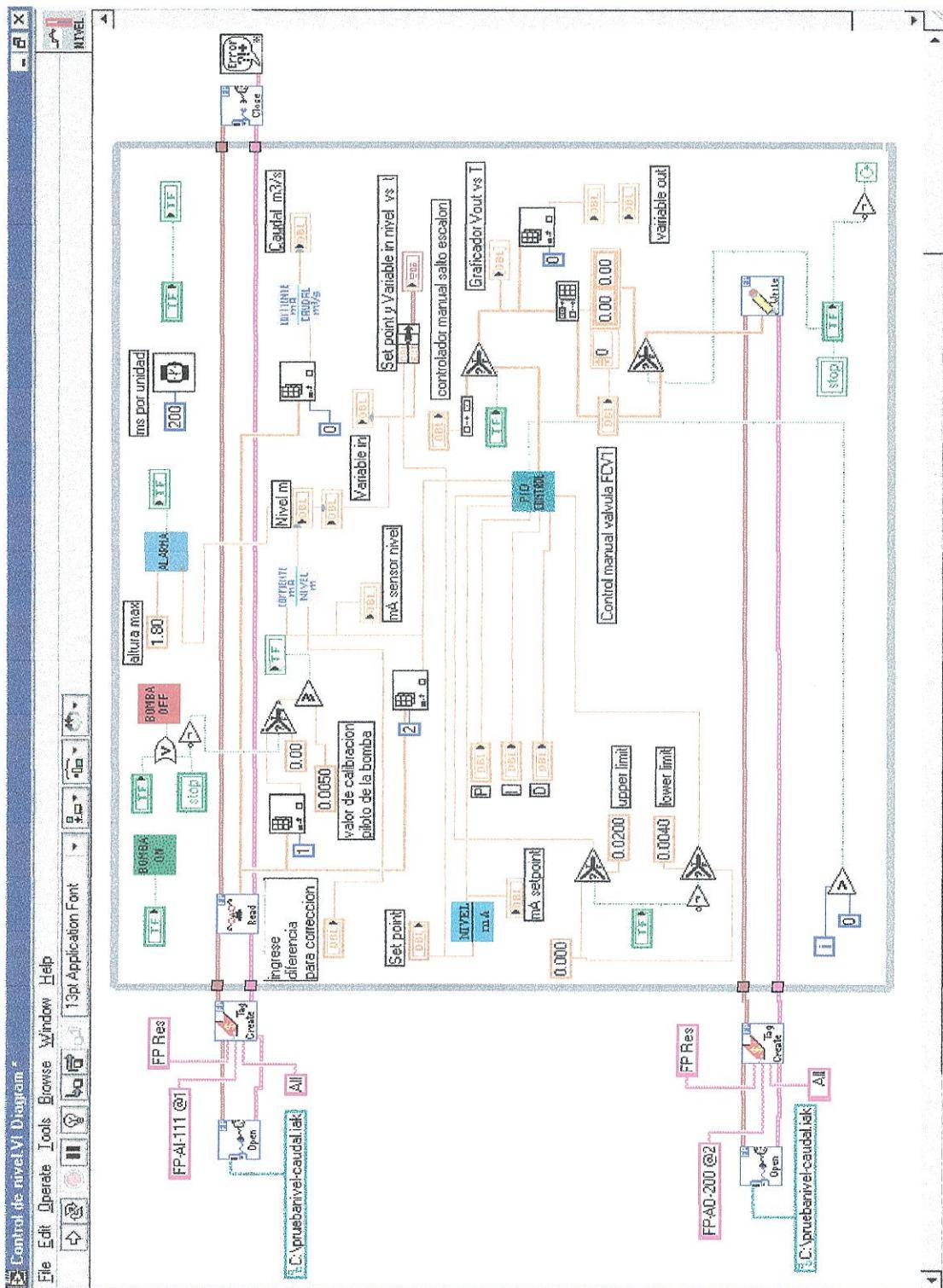


FIGURA 4.40. PANEL DE DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL DE NIVEL

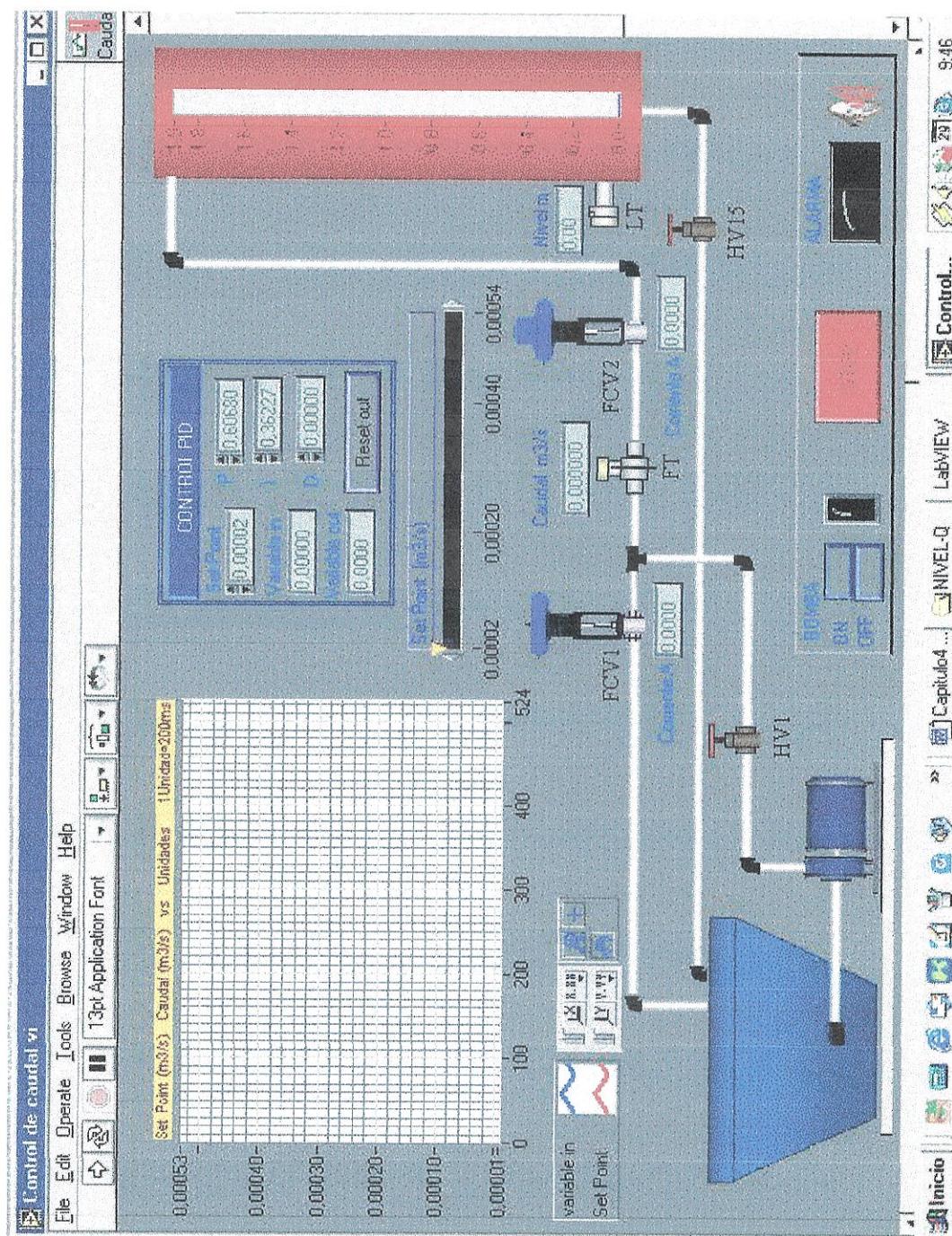


FIGURA 4.41. PANEL FRONTAL DEL PROGRAMA DE CONTROL DE CAUDAL

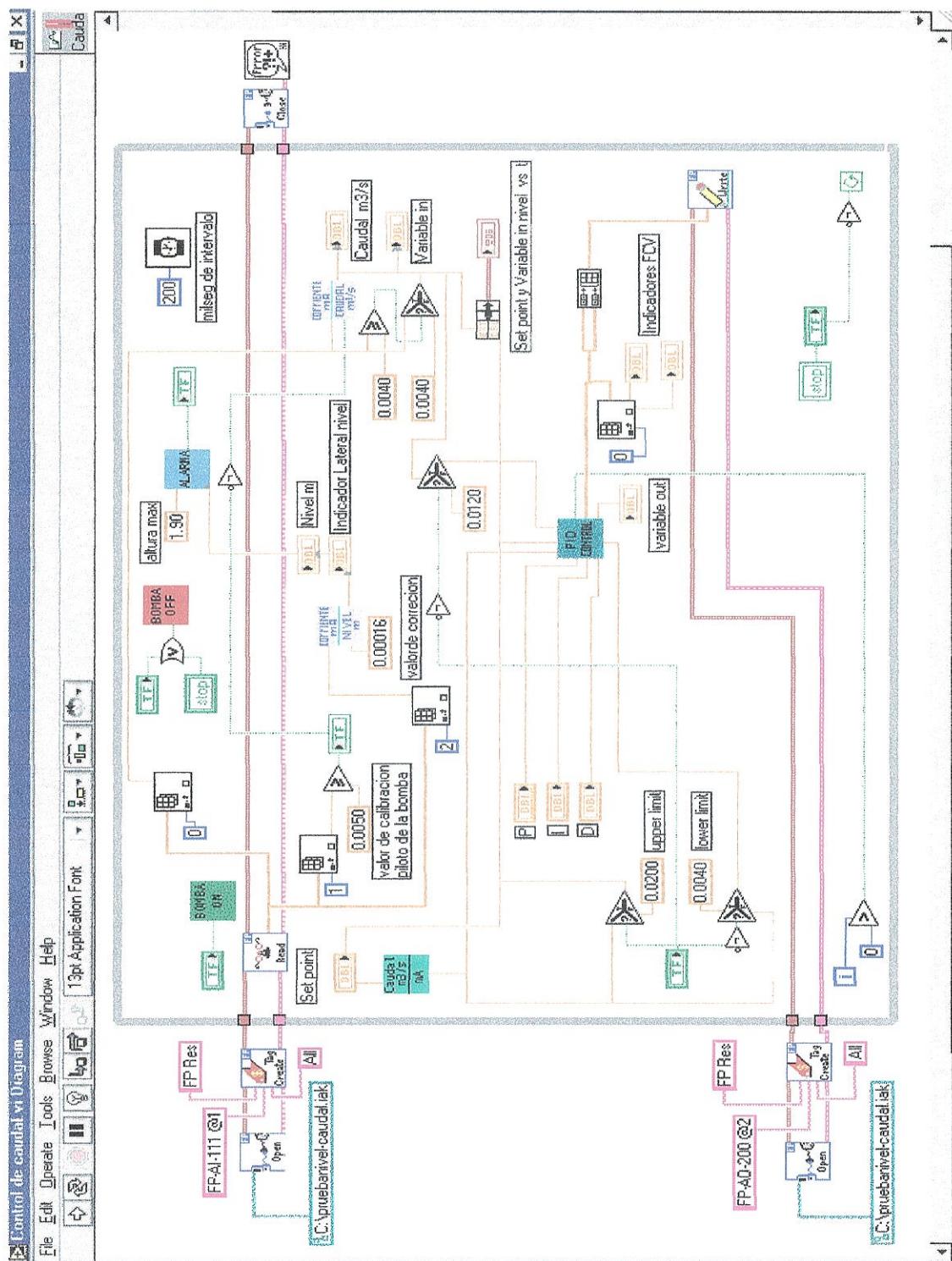


FIGURA 4.42. DIAGRAMA DE BLOQUES DE CONTROL DE CAUDAL

A continuación detallaremos los SubVI's utilizados en cada uno de los programas de control tanto del lazo de control de caudal como para el lazo de control de nivel

### **Corriente caudal. Vi**

Este VI convierte la señal de entrada de corriente de 4 a 20 mA, del sensor de caudal del módulo de control de nivel y caudal en una señal de salida de 0,000020 a 0,000540  $\text{m}^3/\text{s}$ .

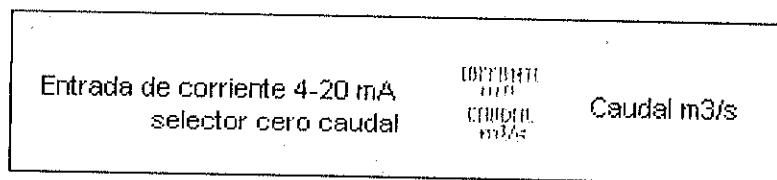


FIGURA 4.43. CORRIENTE CAUDAL VI

Este VI obtiene los valores de entrada del arreglo que se creó por la comunicación con la interfase Field Point. Se extrae el primer valor (0) de la matriz mediante un índice de arreglo (Index Array). La señal de salida muestra un indicador digital y en el gráfico de barrido del panel frontal. La ecuación transductora que utiliza el Corriente caudal Vi se la obtuvo

de los datos de la práctica de calibración del sensor de caudal, el panel de diagrama de bloques de este VI muestra la ecuación transductora.

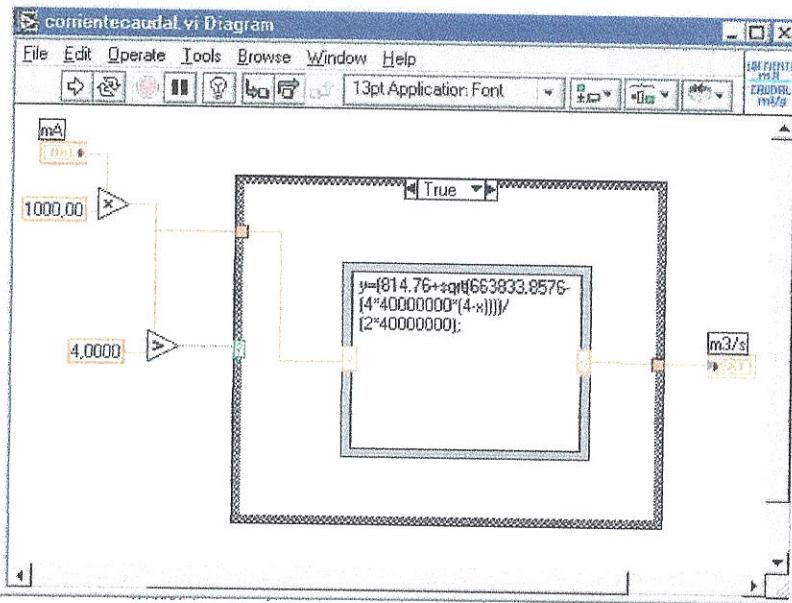


FIGURA 4.44. CORRIENTECAUDAL.VI

### Corrientenivel.Vi

Este VI convierte la señal de entrada de corriente de 4 a 20 mA, del sensor de nivel del módulo de control de nivel y caudal en una señal de salida de 0 a 1.90 m de nivel de agua en el tanque principal. Este VI obtiene los valores de entrada del arreglo que se creó por la comunicación con la interfase Field Point. Se extrae el primer valor (2) de la matriz mediante un índice de arreglo (Index Array).



FIGURA 4.45. CORRIENTENIVEL.VI

La señal de salida muestra un indicador digital y en el gráfico de barrido del panel frontal. La ecuación transductora que utiliza el Corrientecaudal.Vi se la obtuvo de los datos de la práctica de calibración del sensor de nivel, el panel de diagrama de bloques de este VI muestra la ecuación transductora. La entrada del valor de corrección suma un valor de corriente para elevar el cero de la calibración.

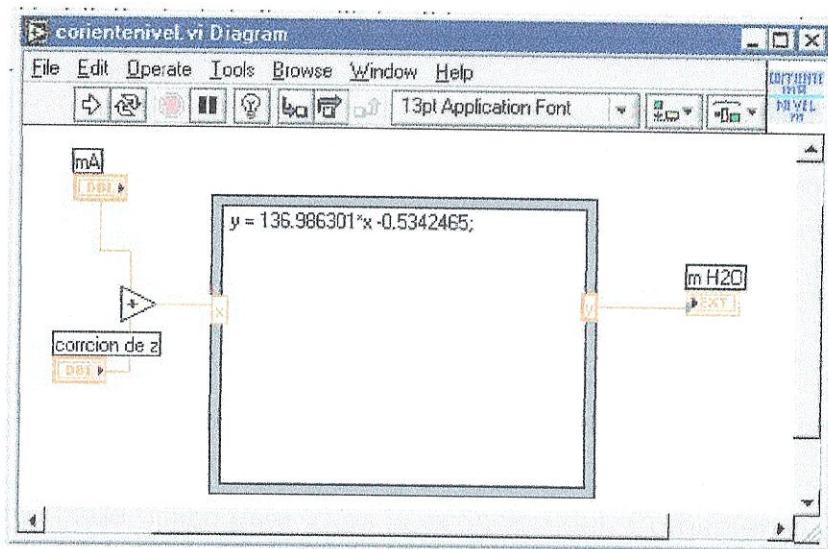


FIGURA 4.46. CORRIENTENIVEL.VI



### Nivel-a-mA.vi

Este VI pertenece al control de nivel y opera directamente con el punto de control y traduciendo su señal para el controlador virtual PID, y las gráficas de barrido.

Este VI convierte la señal de entrada, el nivel de agua requerido en el punto de control, en una señal de salida de corriente análoga de 4 a 20 mA para la entrada del punto de control en el controlador virtual PID. Este VI obtiene los valores de entrada directamente del panel frontal, de la casilla Set point, y son fijados por el operador, es decir es el valor deseado para el sistema. También se utiliza la salida de este VI para graficar en el tiempo como varía el punto de control y compararlo con la variable del proceso.

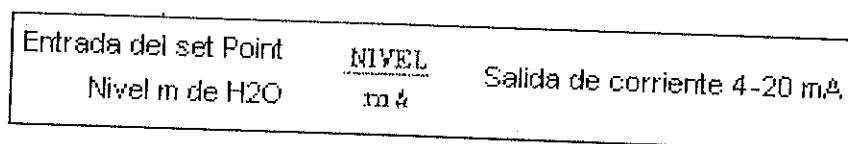


FIGURA 4.47. NIVEL-A-MA.VI

La ecuación que utiliza este VI es la ecuación del Corrientenivel.VI pero invertida, es decir se cambiaron las variables, de este modo se

corresponden de uno a uno, se muestra en el panel de diagrama de bloques de la Figura 4.48.

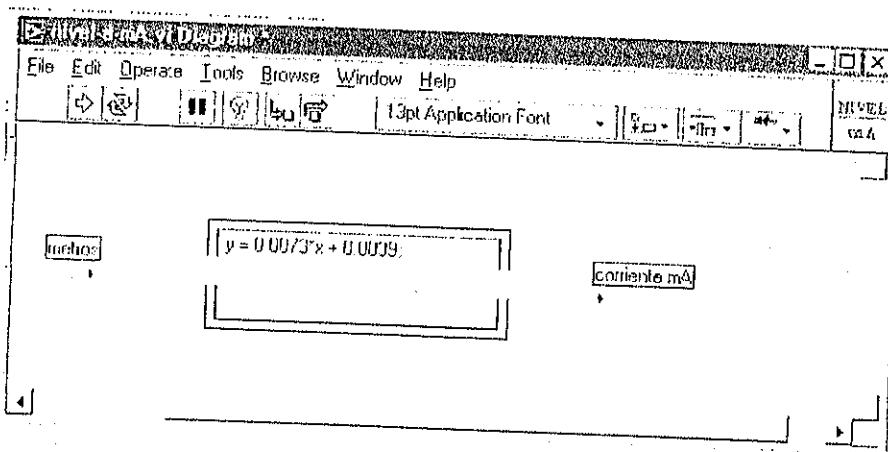


FIGURA 4.48. NIVEL-A-MA.VI

### Cuaudall-a-mA.vi

Este VI pertenece al control de Caudal y opera directamente con el punto de control y traduciendo su señal para el controlador virtual PID, y las gráficas de barrido.

Este VI convierte la señal de entrada, el caudal de agua requerido en el punto de control, en una señal de salida de corriente análoga de 4 a 20 mA para, la entrada del punto de control en el controlador virtual PID. Este VI obtiene los valores de entrada directamente del panel frontal, de

la casilla Set point, y son fijados por el operador, es decir es el valor deseado para el sistema. También se utiliza la salida de este VI para graficar en el tiempo como varía el punto de control y compararlo con la variable del proceso.

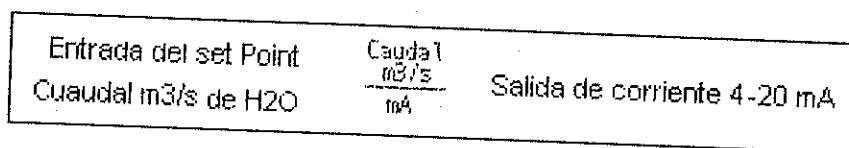


FIGURA 4.49. CAUDAL-A-MA.VI

La ecuación que utiliza este Vi es la ecuación del Corrientecaudal.Vi pero invertida, es decir se cambiaron las variables, de este modo se corresponden de uno a uno sus valores, esta se muestra en el panel de diagrama de bloques de la Figura 4.50

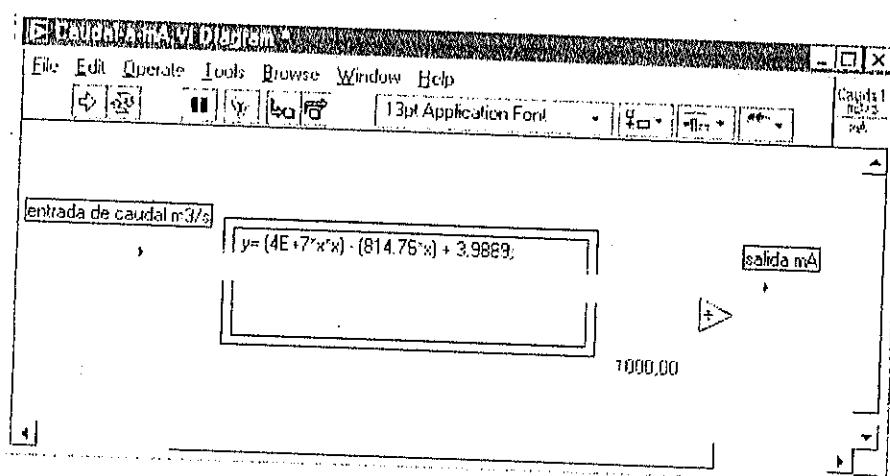


FIGURA 4.50. CAUDAL-A-MA.VI

### Bomba-on.VI

Este VI se encarga de encender la bomba principal de la planta de procesos, desde el panel frontal del programa de control tanto para nivel como caudal.

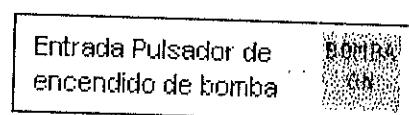


FIGURA 4.51. BOMBA-ON.VI

Para el encendido de la bomba se cuenta con un pulsador en el panel frontal del programa de control, que al ser activado envía una señal boleana al SubVI Bomba-on.VI, este VI envía a través del puerto paralelo LPT1 de la computadora una señal que comanda la interfase de encendido y apagado de bomba que se indicó en el capítulo 3.3.1.

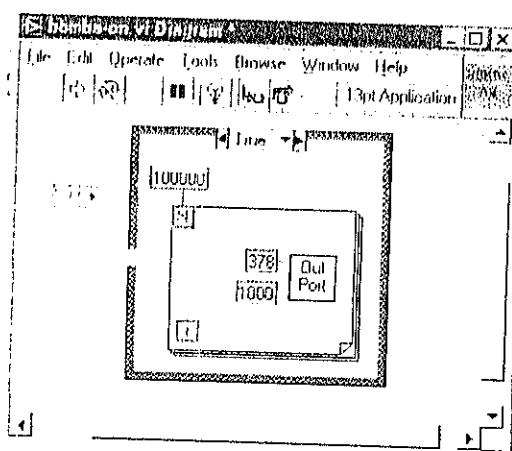


FIGURA 4.52. PANEL DE DIAGRAMA DE BLOQUES BOMBA-ON.VI

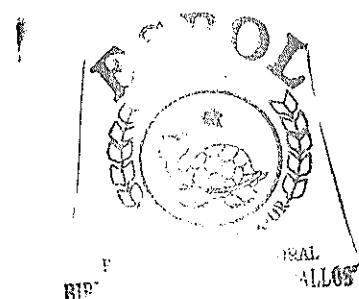
En la Figura 4.52 se muestra el interior de la programación de Bomba-on.VI, para enlazar el puerto paralelo LPT1 se utilizo el subVI Out Port.VI de la paleta Advanced de Lab VIEW. El subVI, Out Port.VI requiere se le ingrese dos constantes.

La dirección del puerto paralelo de la computadora, 378 en hexadecimal, en la mayoría de los casos, es conveniente determinar la dirección del puerto y corregir de ser necesario solo ingresando una nueva dirección con la herramienta de texto en el programa. La dirección del puerto se encuentra a través de la siguiente ruta de Windows, Panel de control, Sistema, Hardware, Puertos Com LPT, Propiedades, Recursos.

La segunda es el número del pin en el puerto mediante el cual se controla el rele de encendido de la bomba, este parámetro es fijo y no depende del tipo computadora, como la dirección del puerto.

### Bomba-off.VI

Este VI se encarga de apagar la bomba principal de la planta de procesos, desde el panel frontal del programa de control tanto para nivel como caudal.



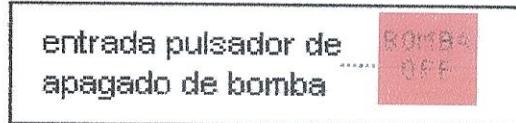


FIGURA 4.53. BOMBA-OFF.VI

Para el apagado de la bomba se cuenta con un pulsador en el panel frontal del programa de control, que al ser activado envía una señal booleana al SubVI Bomba-off.VI, este VI envía a través del puerto paralelo LPT1 de la computadora una señal que comanda la interfase de encendido y apagado de bomba que se indicó en el capítulo 3.3.1.

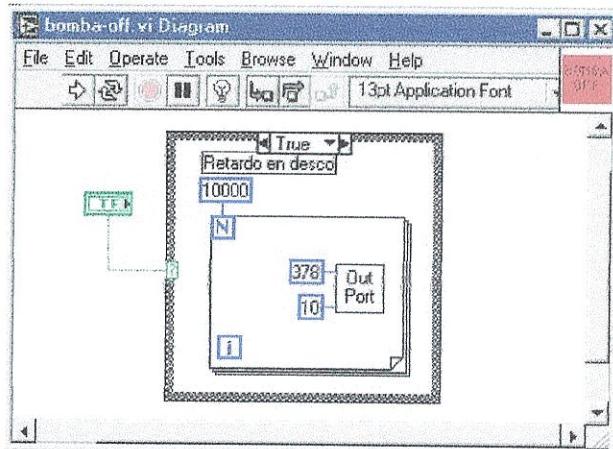


FIGURA 4.54. PANEL DE DIAGRAMA DE BLOQUES BOMBA-OFF.VI

En la Figura 4.54 se muestra el interior de la programación de Bomba-off.VI, para enlazar el puerto paralelo LPT1 se utilizó el subVI

Out Port.VI de la paleta Advanced de Lab VIEW. El subVI, Out Port.VI requiere se le ingrese dos constantes.

La dirección del puerto paralelo de la computadora, 378 en hexadecimal, en la mayoría de los casos, es conveniente determinar la dirección del puerto y corregir de ser necesario solo ingresando una nueva dirección con la herramienta de texto en el programa. La dirección del puerto se encuentra a través de la siguiente ruta de Windows, Panel de control, Sistema, Hardware, Puertos Com LPT, Propiedades, Recursos.

La segunda es el número del pin en el puerto mediante el cual se controla el rele de encendido de la bomba, este parámetro es fijo y no depende del tipo computadora, como la dirección del puerto.

### **Alarma.VI**

Este VI fue creado como medida de seguridad en el caso de que el tanque principal de procesos se rebose, por alguna falla del sistema de control, opera tanto en el panel de control de nivel como en el de caudal. En caso de un sobre nivel la alarma enciende una luz de advertencia en el panel principal y emite una señal sonara de aviso, justo un instante

antes para dar tiempo al operador a responder. La Figura 4.55. Muestra el SubVI Alarma.VI.

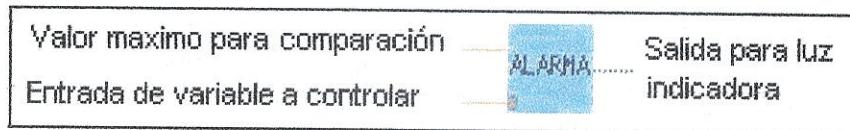


FIGURA 4.55. ALARMA.VI

La operación de este VI es simple compara el valor del nivel contra un valor máximo fijado, si lo rebasa la alarma es disparada, la alarma no controla el proceso, depende de un operador para corregir alguna falla.

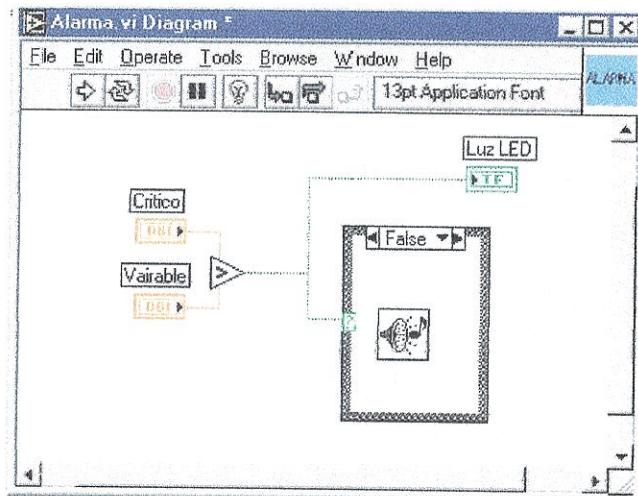


FIGURA 4.56. DIAGRAMA DE BLOQUES ALARMA.VI



## Retardador de tiempo

La ejecución del lazo de adquisición y control toma fracciones de segundo dependiendo de la velocidad de la computadora, es decir que mientras más rápida para calcular una computadora más muestras realiza en la interfase Field Point, sobrecargando el sistema de datos para analizar, para eliminar un muestreo excesivo se incorporó un retardador o quemador de tiempo dentro del lazo de adquisición y control. Este retardador se encarga de que cada iteración del lazo de adquisición y control se realice en el mismo tiempo, ya que se puede fijar éste tiempo. La práctica nos muestra que un tiempo de retardo apropiado para el programa de control de nivel y de caudal, es de 200 ms, La Figura 4.57 muestra este detalle de programación.

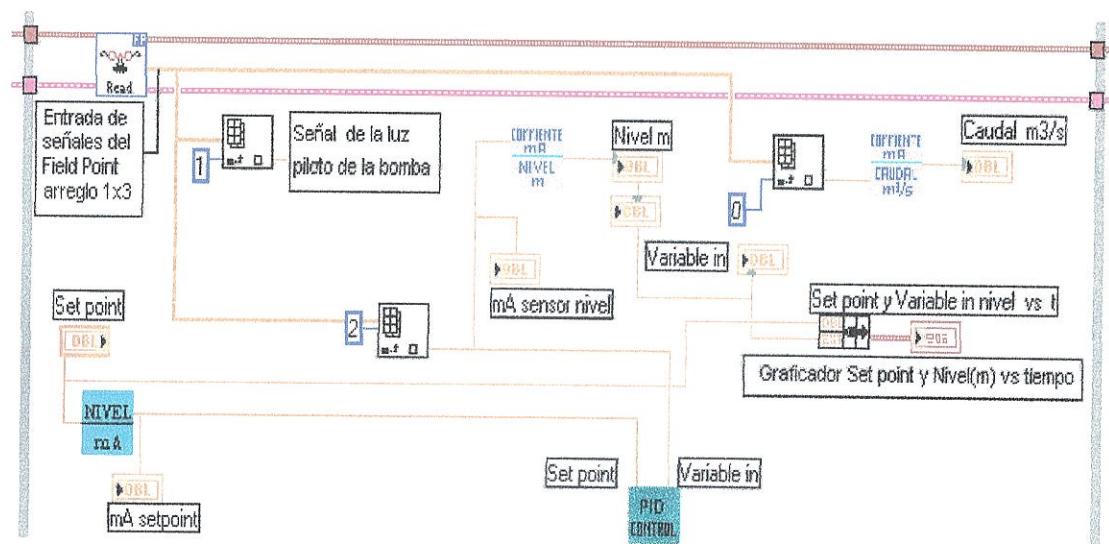


FIGURA 4.57. RETARDADOR DE TIEMPO

De este modo se ha explicado las principales herramientas que se crearon para conseguir el control tanto del lazo de caudal como el control del lazo de nivel.

A continuación se detallara por grupos de programación las relaciones entre los VIs transductores y el controlador PID, la entrada de información y la salida de control, para el programa de Control de Nivel.

El primer grupo consta de la entrada de las señales, por medio del lazo de adicción justo después del Read.VI. Donde todas estas señales entran en el programa en forma de una matriz o arreglo, 1x3 dentro del lazo, se debe extraer de la celda apropiada del arreglo, la señal que se requiera, para esto se utiliza un Index Array.



## FIGURA 4.58. DIAGRAMA DE SEÑALES DE ENTRADA CONTROL

Para el lazo de nivel se utilizan tres entradas independientes etiquetadas con un índice dentro de la matriz: 0 para la señal del sensor de caudal, 1 para el indicador de luz piloto de la bomba y 2 para la señal del sensor de caudal, como se puede apreciar en la Figura 4.58.

La señal análoga de corriente del sensor de caudal es convertida mediante el SubVI Corrientecaudal.VI en una señal de caudal en metros cúbicos por minuto y presentada en el panel principal en un indicador digital.

La señal de corriente de la luz piloto de la bomba es dirigida un indicador en el panel principal.

La variable a controlar, en este caso es el nivel, es una señal análoga de corriente se dirige directo al controlador PID, además es convertida en nivel en metros mediante el VI Corrientenivel.VI, y luego es presentada en tres diferentes indicadores digitales en el panel de control, a demás de ser presentada en un graficador de barrido.

Al graficador de barrido también entra la señal del Set Point en metros, esta señal es cargada al programa mediante un control digital en el



panel de control. La señal del en metros del Set Point es cambiada a corriente a través del SubVI Nivel-a-ma.VI, para luego ingresar al controlador PID.

El segundo bloque de programación muestra las salidas para el control después del controlador PID, como se presenta en la Figura 4.59.

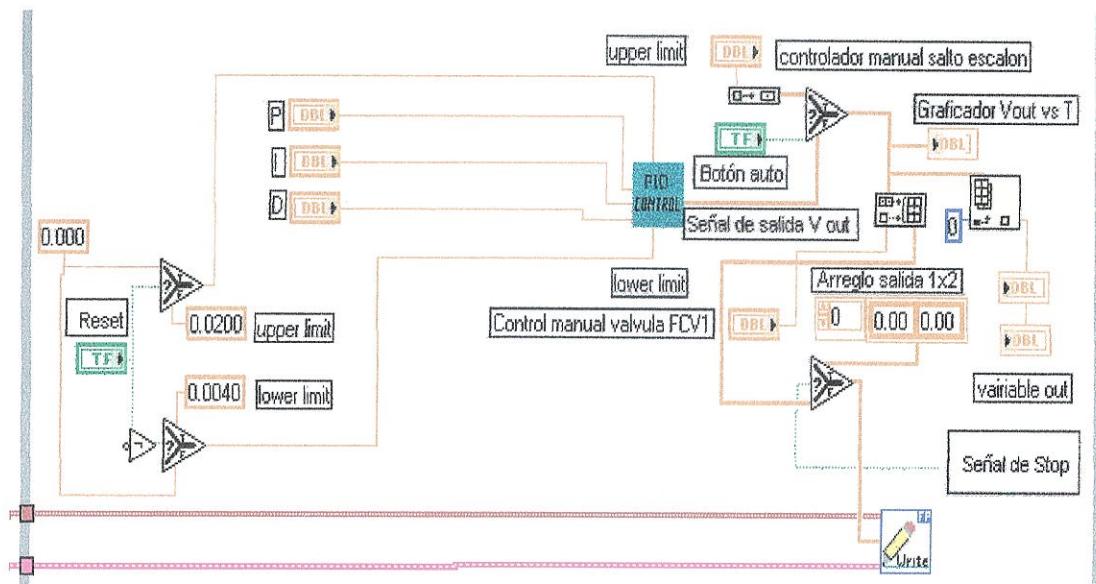


FIGURA 4.59. DIAGRAMA DE SEÑALES DE SALIDA CONTROL NIVEL

El principal SubVI de este grupo de programación es el Controladcr PID anterior mente explicado, aquí se muestra las constantes PID

cargadas desde el panel frontal de control, también se encuentran los límites máximos y mínimos del controlador ingresados al programa como constantes

La salida del controlador es una matriz de 1x1, con el valor de la variable de salida. El programa de control de nivel permite interrumpir la salida del controlador, a través del botón de auto/manual, esta acción pone al sistema de control en lazo abierto, a demás permite el control de la válvula FCV2 mediante un control digital en el panel frontal, utilizado durante la práctica para realizar el salto escalón.

La salida del controlador después del selector de automático o manual, es presentada en un graficador de barrido V out vs. Tiempo.

Adicionalmente es también mostrada en el panel principal de control a través de dos indicadores digitales uno en la válvula FCV2 y otro en el indicador de Variable out.

El programa de control de nivel solo controla la válvula FCV2, La válvula FCV1 contiene un controlador manual en el panel frontal, lo que permite posicionarla en cualquier valor de su rango. Este controlador

debe adicionarse a la salida del controlador PID aumentando la matriz de salida a una de 1x2, y cargarla en WRITE.VI.

La señal de alto es introducida dentro del programa mediante el botón de Stop, este detiene la corrida del programa y apaga la bomba principal mediante el SubVI Bomba OFF.VI, se muestra en la Figura 4.60.

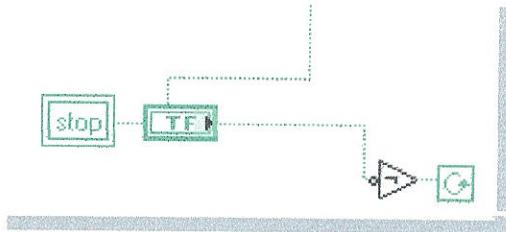


FIGURA 4.60. DIAGRAMA DE ALTO DEL PROGRAMA

La señal de entrada de la luz piloto de la bomba antes de encender la luz indicadora del panel de control es comparada contra un valor de referencia de 0.005 amperios para tomar la decisión si encenderla o no.



Adicional a esto el control también pasa por el botón de Stop el cual envía una señal para apagar la bomba y apagar la luz indicadora en el panel principal de control, esto se muestra en la Figura 4.61.

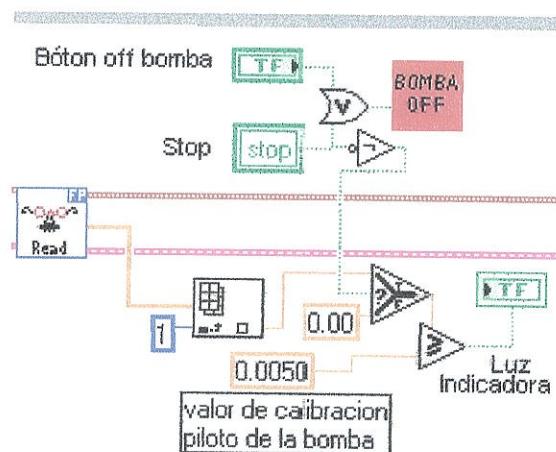


FIGURA 4.61. DIAGRAMA DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LA LUZ PILOTO DE LA BOMBA

A continuación se detallara por grupos de programación las relaciones entre los VIs transductores y el controlador PID, la entrada de información y la salida de control, para el programa de Control de caudal.

El primer grupo consta de la entrada de las señales, por medio del lazo de adicción justo después del Read.VI. Donde todas estas señales entran en el programa en forma de una matriz o arreglo, 1x3 dentro del lazo, se debe extraer de la celda apropiada del arreglo, la señal que se requiera, para esto se utiliza un Index Array.

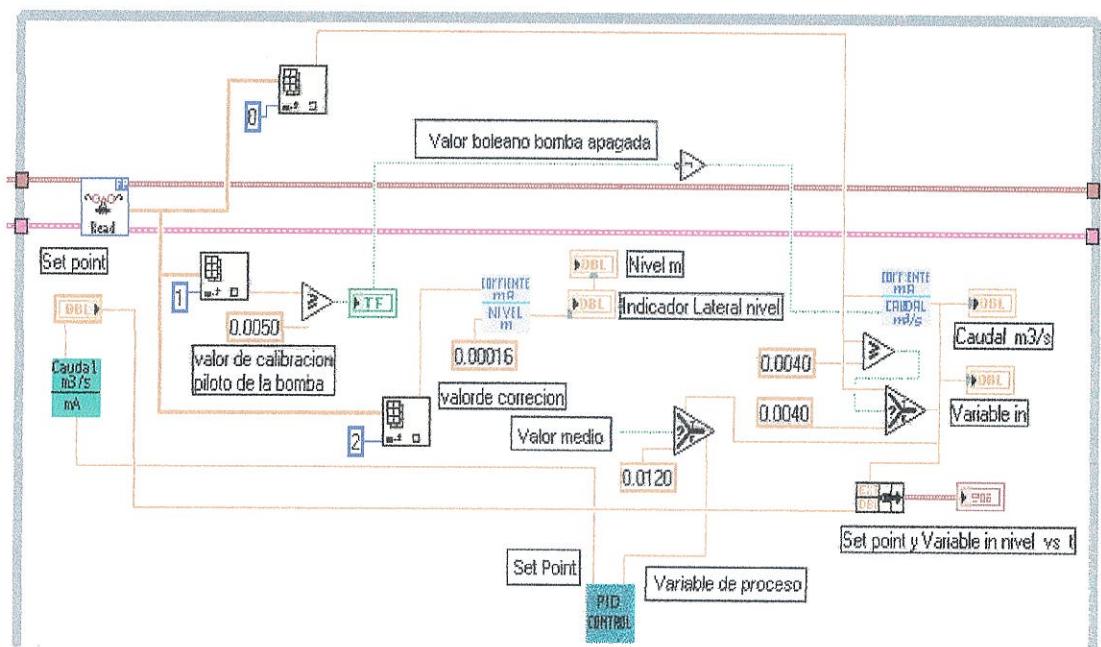


FIGURA 4.63 DIAGRAMA DE SEÑALES DE ENTRADA CONTROL CAUDAL

Para el lazo de caudal se utilizan tres entradas independientes etiquetadas con un índice dentro de la matriz: 0 para la señal del

sensor de caudal, 1 para el indicador de luz piloto de la bomba y 2 para la señal del sensor de caudal, como se aprecia en la Figura 4.63.

La variable a controlar, en este caso es el caudal, es una señal análoga de corriente se dirige directo al controlador PID, además es convertida en caudal en metros cúbicos por minuto mediante el SubVI Corrientecaudal.VI , y luego es presentada en dos diferentes indicadores digitales en el panel de control, a demás de ser presentada en un graficador de barrido.

La señal de corriente de la luz piloto de la bomba es dirigida un indicador en el panel principal.

La señal análoga de corriente del sensor de nivel es convertida mediante el SubVI Corrientenivel.VI en una señal de nivel en metros y presentada en el panel principal en un indicador digital y en el indicador gráfico del tanque principal.

Al graficador de barrido también entra la señal del Set Point en metros cúbicos por minuto, esta señal es cargada al programa mediante un control digital en el panel de control. La señal del sensor en metros

cúbicos por minuto del Set Point es cambiada a corriente a través del SubVI Caudal-a-ma.VI, para luego ingresar al controlador PID.

El segundo bloque de programación muestra las salidas para el control después del controlador PID, como se presenta en la Figura 4. 64.

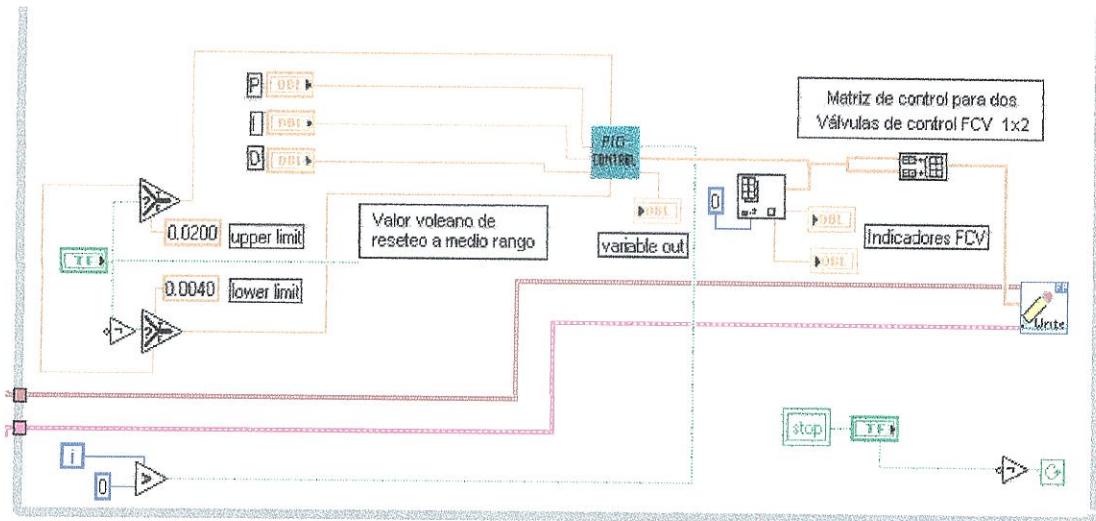


FIGURA 4.64. DIAGRAMA DE SEÑALES DE SALIDA CONTROL NIVEL

El principal SubVI de este grupo de programación es el Controlador PID anteriormente explicado, aquí se muestra las constantes PID cargadas desde el panel frontal de control, también se encuentran los límites máximos y mínimos del controlador ingresados al programa como constantes.



La salida del controlador es una matriz de 1x1, con el valor de la variable de salida. La salida del controlador es mostrada en el panel principal de control a través de tres indicadores digitales uno en la válvula FCV1 y otro en la válvula FCV2, y en el indicador de Variable out. El programa de control de nivel solo controla las válvulas dos válvulas FCV1, y FCV2, estas dos válvulas son inversamente proporcionales la una a la otra por lo que con la misma señal de salida del controlador se puede controlar ambas. Se crea una matriz de 1x2 con el mismo valor y se lo carga en WRITE.VI.

La señal de alto es introducida dentro del programa mediante el botón de Stop, este detiene la corrida del programa y apaga la bomba principal mediante el SubVI Bomba OFF.VI,

El contador del lazo While es utilizado para encender la memoria del controlador. Cada vez que arranca la secuencia de adquisición y control del lazo While principal, este indica al controlador que encienda sus registros.

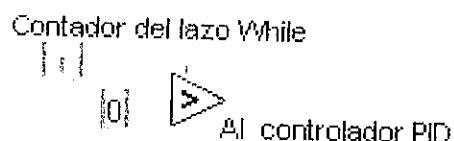


FIGURA 4.65 CONTADOR DEL LAZO WHILE

#### **4.5. Descripción y manejo del panel principal**

A continuación se explicara cada una de las funciones que se pueden controlar a través de los paneles frontales de los programa de control de los dos lazos de nivel y caudal.

Cada panel de frontal fue diseñado para los requerimientos de las prácticas de ajuste de controlador.

Algunas de las funciones son específicas para el tipo de práctica; en esta sección solo se describirán cada uno de los componentes del los paneles de control, indicadores, controles, botones, las funciones de estos se verán en el capítulo 5.

##### **Lazo de control nivel**

En la Figura 4.66 se muestra la pantalla desde donde se puede controlar el proceso del lazo de nivel. Se aprecia la disposición de las partes que forman el circuito, que siguen la distribución real de la planta de procesos.

El recuadro marcado como Control PID, presenta las opciones del controlador PID virtual que se describirán a continuación :

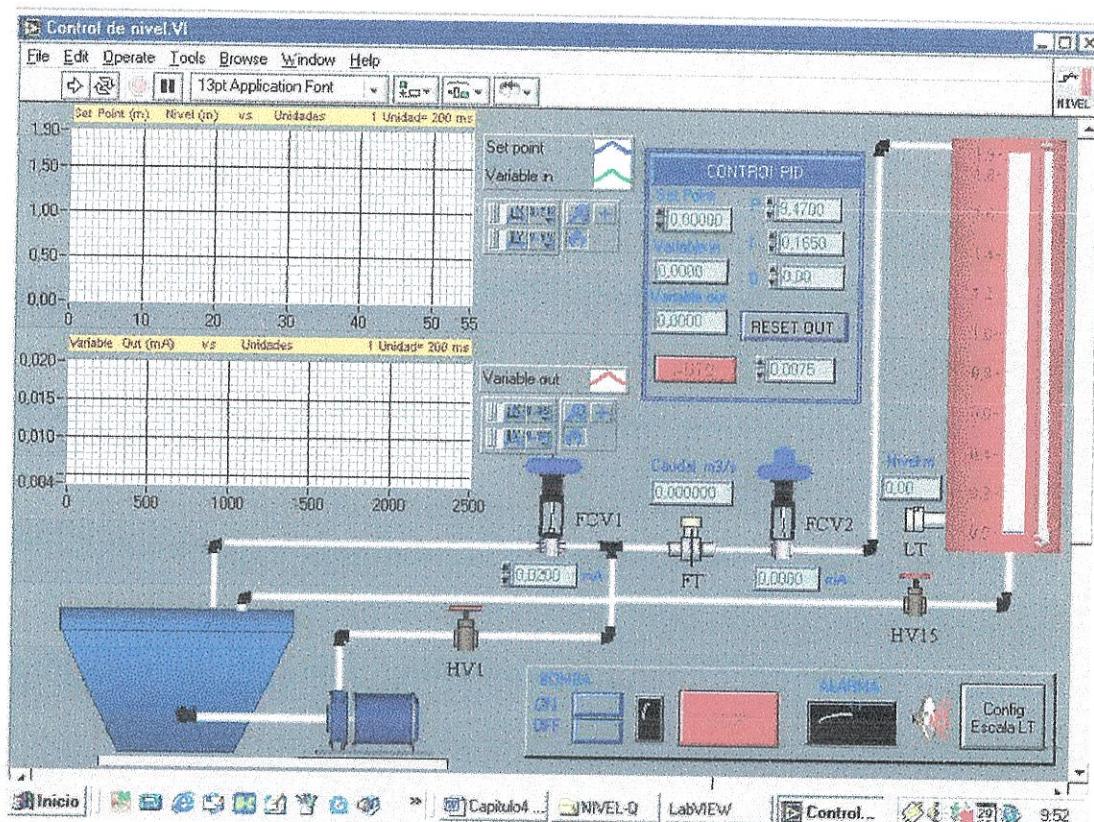
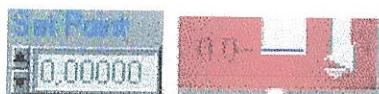


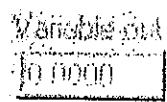
FIGURA 4.66. PANEL FRONTEL DE CONTROL DEL LAZO DE NIVEL



**Set Point:** es el punto de control, el valor en metros del nivel de agua que se requiere dentro del tanque principal. Este parámetro se lo puede ingresar desde esta casilla o desde el control vertical deslizante en el gráfico del tanque principal.



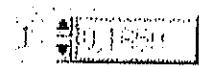
**Variable in:** es la lectura en mA del transmisor de nivel, la cual ingresa directamente al controlador PID.



**Variable out:** es la respuesta del controlador PID, en una señal de corriente de 4-20 mA, dirigida a la válvula de control FCV2.



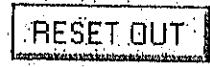
**P:** En esta casilla se puede ingresar el valor de la constante de proporcionalidad P %/% directamente al controlador.



**I:** En esta casilla se puede ingresar el valor de la constante de integración I %/% directamente al controlador.



**D:** En esta casilla se puede ingresar el valor de la constante derivativa D %/% directamente al controlador.



**Reset out:** este botón resetea la salida del controlador, al cero de la escala, se lo utiliza para limpiar la memoria del controlador, durante la práctica.



**Manual/Auto:** este botón permite convertir al circuito de lazo cerrado, en su posición auto a, lazo abierto en su posición manual. En automático el control PID, controla el sistema, en la posición manual permite ingresar un valor de respuesta arbitrario

mediante la casilla que se encuentra a la derecha del botón. Durante la práctica se verá la utilidad de este botón.

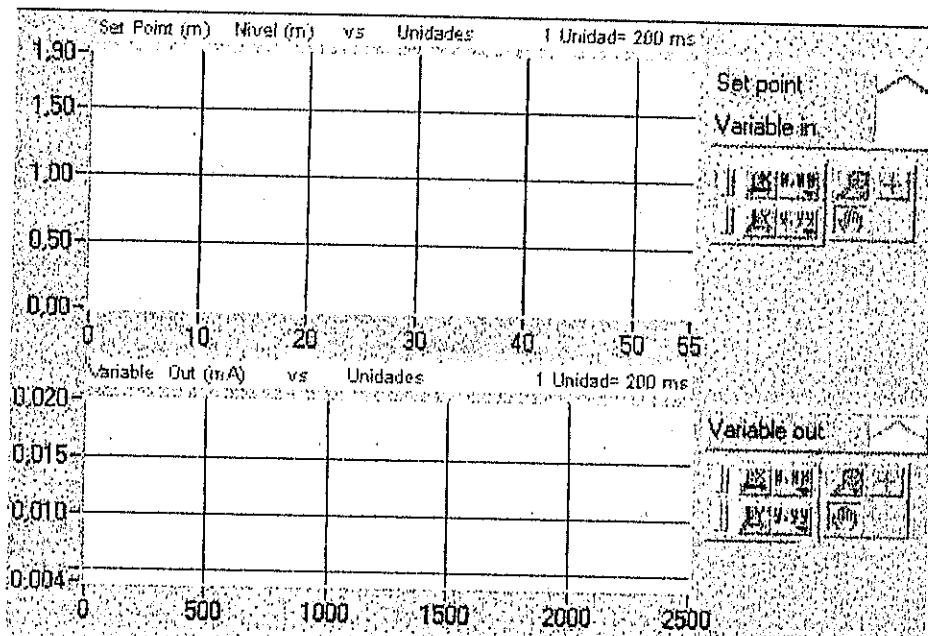


FIGURA 4.67. GRÁFICAS DE BARRIDO CONTROL DE NIVEL

En la Figura 4.67 se puede aprecia dos gráficas de barrido, cada una de estas gráficas tiene como función mostrar la respuesta del sistema contra el tiempo real.

La primera gráfica muestra el punto de control y la respuesta del sistema en metros de nivel de agua, versus el tiempo. La interpretación del tiempo se efectúa mediante un factor de conversión. La escala en las

abscisas esta dada en unidades y cada unidad transcurre en un tiempo determinado, en el caso del lazo de nivel cada unidad en el gráfica dura 200 mili segundos se puede determinar con precisión el tiempo en las accisas. Esto se debe a que cuando Lab VIEW presenta una escala de tiempo en las abscisas, toma el tiempo del reloj interno de la máquina y en base a este da un inicio a la gráfica lo que no siempre es en cero segundos, es por esto que de las pruebas realizadas se vió que lo mejor para la comprensión del sistema era, transformar mediante un factor de conversión de la escala de unidades, que si arranca de cero, a segundos.

La segunda gráfica muestra de igual modo la variable de salida del controlador PID, en una escala de 4-20 mA versus el tiempo en unidades, con factor de conversión de 200 mili segundos por unidad.

A la derecha de cada gráfica se encuentra la paleta de herramientas para la manipulación de las gráficas, contienen botones y menús desplegables, como se ve en la Figura 4.68.

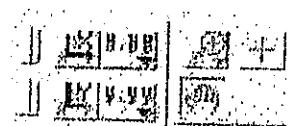
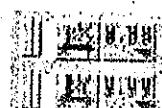


FIGURA 4.68. PALETA DE MANEJO DE GRÁFICAS



**Control de escalas:** con estos botones se puede desplegar menús que permiten manipular la escala , el tipo formato del número que se gráfica, los dígitos de precisión, y hasta el color de la grilla de la gráfica.



**Paleta de gráficos:** Contiene herramientas para el manejo de las gráficas como el botón de zoom, que despliega un menú, con múltiples opciones para las funciones de zoom.

El botón movimiento del cursor, cambia el curso a un puntero dentro de la gráfica, y el botón de movimiento libre (Panning), permite agarrar y mover la gráfica libremente dentro del graficador.

Cada uno de los sensores tiene su indicador los cuales marcan la variación tanto de nivel como de caudal. La Figura 4.57 muestra la representación de los sensores en el panel de control de nivel.

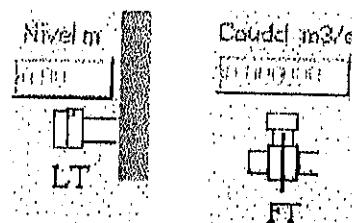


FIGURA 4.69.REPRESENTACIÓN DE LOS SENSORES

De igual manera la válvula neumática de control FCV2 muestra la señal de control que recibe en mA del controlador PID. La válvula FCV1 tiene un control manual, para el lazo de nivel se la opera completamente abierta.

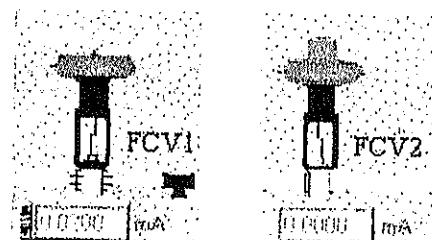


FIGURA 4.70. REPRESENTACIÓN DE LAS VALVULAS DE CONTROL

La barra de controles, Figura 4.71 se muestra el control de la bomba principal del lazo, esta bomba puede ser encendida desde el programa como desde la caja de control atrás del lazo. También consta el botón de STOP o parada de emergencia, el cual detiene todos los procesos y regresan los controles a posición normal. El sistema también consta de una alarma sonora de sobre nivel la cual se acciona antes de que el nivel alcance a rebosar el tanque principal.

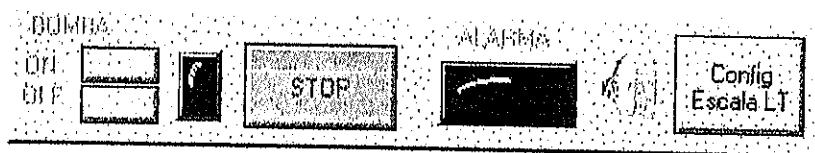


FIGURA 4.71. BARRA DE CONTROLES DEL LAZO DE NIVEL

El botón de configuración de escala LT se lo utiliza para calibrar de manera manual el cero del sensor de nivel de ser necesario.

### Lazo de control de caudal

En la figura circun se muestra la pantalla desde donde se puede controlar el proceso del lazo de caudal y las partes del circuito, que siguen la disposición real.

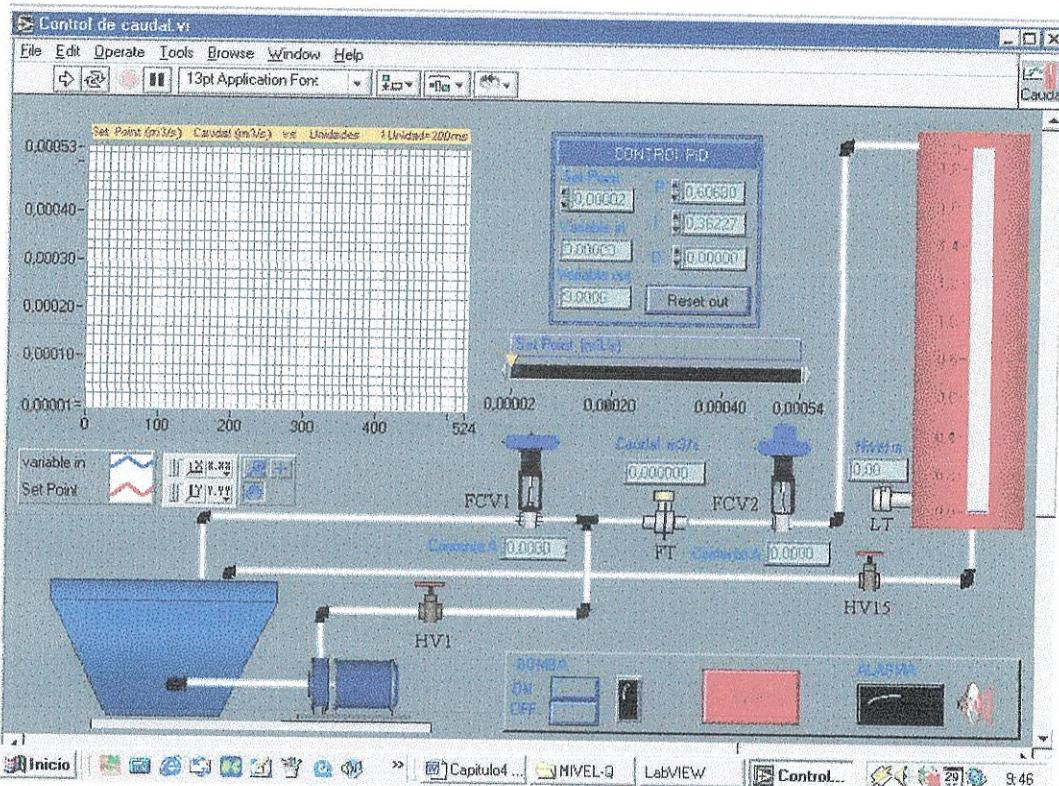


FIGURA 4.72. PANEL FRONTEL DE CONTROL DEL LAZO DE CAUDAL



El recuadro marcado como Control PID, presenta las opciones del control:

**Set Point:** Es el punto de control, el valor en metros cúbicos por segundo, del caudal de agua que circula dentro de la tubería. Este parámetro se lo puede ingresar desde esta casilla o desde el control horizontal deslizante localizado debajo del recuadro marcado control PID.

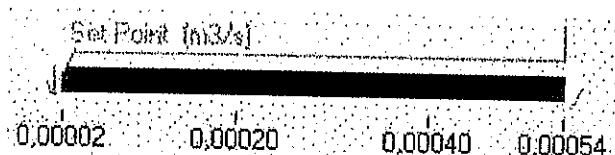
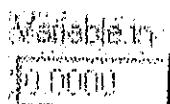
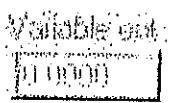


FIGURA 4.73. PUNTO DE CONTROL PARA EL CAUDAL

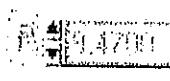


**Variable in:** es la lectura en mA del transmisor de caudal, la cual ingresa directamente al controlador PID.

cual ingresa directamente al controlador PID.

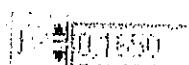


**Variable out:** es la respuesta del controlador PID, en una señal de corriente de 4-20 mA, dirigida a la válvula de control FCV2.



**P:** En esta casilla se puede ingresar el valor de la

constante de proporcionalidad P %/% directamente al controlador.



**I:** En esta casilla se puede ingresar el valor de la constante de integración I %/% directamente al controlador.



**D:** En esta casilla se puede ingresar el valor de la constante derivativa D %/% directamente al controlador.



**RESET OUT:** este botón resetea la salida del controlador, al cero de la escala, se lo utiliza para limpiar la memoria del controlador, durante la práctica.

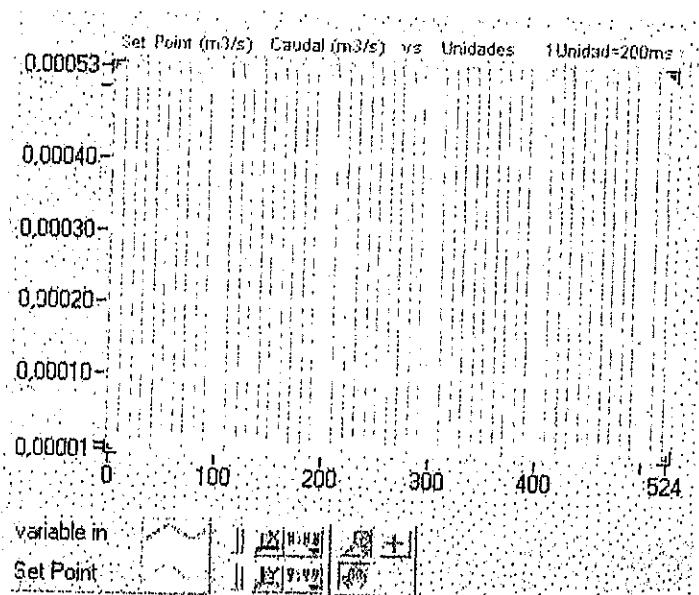


FIGURA 4.74. GRÁFICAS DE BARRIDO CONTROL DE CAUDAL

En la Figura 4.74 se puede apreciar la gráfica de barrido, esta gráfica muestra el punto de control y la respuesta del sistema en metros cúbicos por segundo del caudal de agua, versus el tiempo, la interpretación del tiempo se efectúa mediante un factor de conversión.

La escala en las abscisas está dada en unidades y cada unidad transcurre en un tiempo determinado, en el caso del lazo de caudal cada unidad en la gráfica dura 200 milisegundos, se puede determinar con precisión el tiempo en las abscisas.

Esto se debe a que cuando LabVIEW presenta una escala de tiempo en las abscisas, toma el tiempo del reloj interno de la máquina y en base a este da un inicio a la gráfica lo no siempre es cero segundos, es por esto que de las pruebas realizadas se vió que lo mejor para la comprensión del sistema era transformar mediante un factor de conversión de la escala de unidades, que si arranca de cero, a segundos.

Cada uno de los sensores tiene su indicador los cuales marcan la variación tanto de nivel como de caudal. La Figura 4.75 muestra la representación de los sensores en el panel de control de caudal esta representación es idéntica al programa de control de nivel.

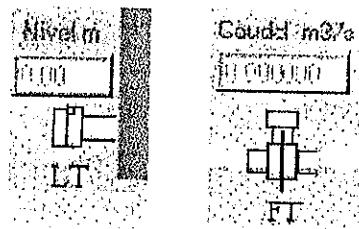


FIGURA 4.75. REPRESENTACIÓN DE LOS SENSORES

De igual manera las válvulas neumáticas de control FCV1 y FCV2 muestran las señales de control que reciben en mA del controlador PID. En el caso del lazo de Caudal las válvulas actúan de manera invertida para controlar el caudal.

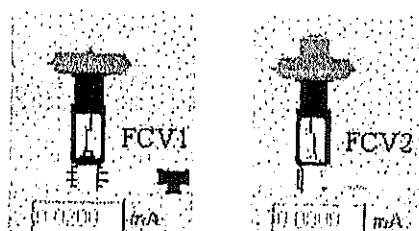


FIGURA 4.76. REPRESENTACIÓN DE LAS VALVULAS DE CONTROL

La barra de controles, Figura 4.76 se muestra el control de la bomba principal del lazo, esta bomba puede ser encendida desde el programa como desde la caja de control atrás del lazo. También consta el botón de STOP o parada de emergencia, el cual detiene todos los procesos y

regresan los controles a posición normal. El sistema también consta de una alarma sonora de sobre nivel la cual se acciona antes de que el nivel alcance a rebosar el tanque principal.

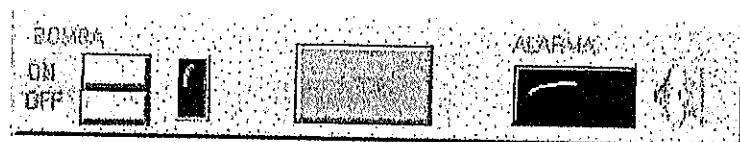


FIGURA 4.77. BARRA DE CONTROLES DEL LAZO DE CAUDAL



## CAPITULO 5

### 5. DESARROLLO DE PRÁCTICAS PARA ESTUDIANTES

#### 5.1. Manejo general del equipo.

El módulo del lazo de control de nivel y caudal, para entrara en operación requiere revisar algunos parámetros, este punto esta dedicado al manejo general del equipo desde su estado de desconexión hasta su arranque y puesta en línea. El módulo del lazo de control de nivel y caudal es un equipo electro neumático, cuenta con un compresor instalado, para alimentar los elementos neumáticos del módulo, una línea directa desde el compresor alimenta el circuito neumático del módulo de nivel y caudal.

El primer paso para el arranque del módulo es encender el compresor de aire y revisar que los reguladores de presión de aire se encuentren

operando dentro de los valores normales fijados de 22 psi. El módulo del lazo de control de nivel y caudal cuenta con una cisterna y bomba para el manejo del agua, el segundo punto sería constatar la presencia de agua en la cisterna y el funcionamiento y cebo de la bomba principal.

El módulo del lazo de control de nivel y caudal cuenta con una caja de disyuntores (breakers) que energizan el panel de controles en la parte posterior del módulo, es solo necesario activar el tercer disyuntor marcado como panel, como se aprecia en la Figura 5.1, para poner en servicio el módulo de del lazo de control de nivel. Los restantes disyuntores corresponden al módulo de control de temperatura.



FIGURA 5.1. CAJA DE DISYUNTORES

Una vez activado el panel se puede encender y apagar la bomba principal, desde las botoneras del panel de control, a demás dentro del panel principal se encuentra el circuito de la interfase que comanda desde la computadora el encendido y apagado de bomba cuenta con una fuente de corriente que se activa mediante un interruptor como se ve en la Figura 5.2.

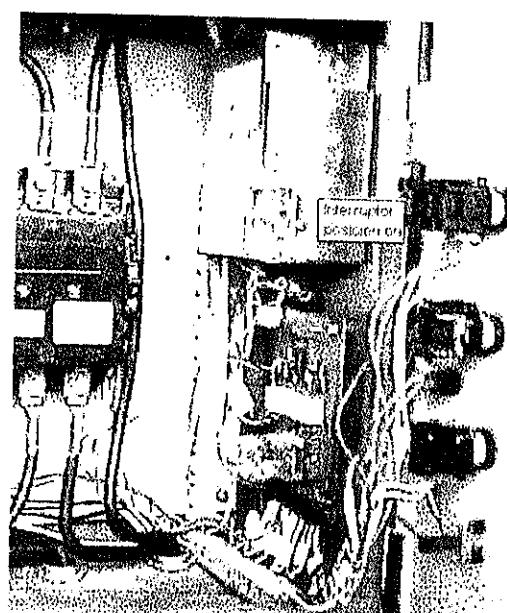


FIGURA 5.2. INTERRUPTOR DE LA FUENTE DE LA INTERFASE DE ENCENDIDO DE BOMBA DESDE LA COMPUTADORA

El sistema automático de encendido de bomba y calentador desde la computadora cuenta, con un interruptor en el frente del panel de control con luz indicadora debe de estar encendido para controlar la bomba y el

calentador desde el programa de control del lazo de nivel o de caudal. La Figura 5.3 muestra el frente del panel de control.

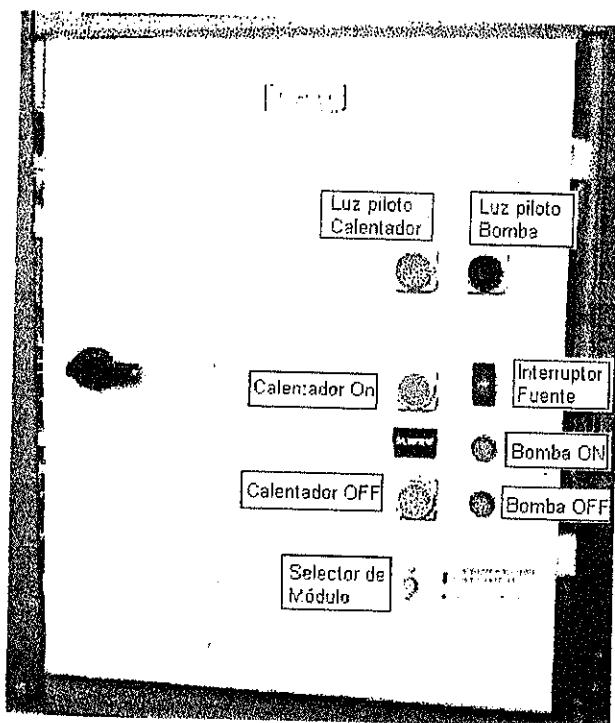


FIGURA 5.3. DESCRIPCION DEL PANEL DE CONTROL

El panel de control también cuenta con luces pilotos para indicar el estado de activación o desactivación tanto de bomba como calentador. Se cuenta con un botón selector para el módulo que se deseé operar, para arrancar el módulo de control de nivel y caudal el selector debe de estar desactivado, para cambiar al lazo de temperatura se debe de presionar activándolo. Este selector desconecta la parte sensora del módulo de control de nivel y caudal, de no estar en posición correcta los

sensores del módulo de nivel y caudal permanecerían desconectados y no marcarían variación alguna.

La disposición de las válvulas que permiten el paso de agua desde la bomba principal hasta el tanque de proceso debe de ser tomado en cuenta y asegurarse que la válvula HV1 se encuentre completamente abierta y la válvula HV10 del módulo de temperatura se encuentre completamente cerrada. A demás de la válvula HV15 de descarga del tanque de proceso debe de estar completamente abierta para operar el sistema. La válvula HV12 de descarga a la cisterna debe de estar abierta esto permite la recirculación del agua al sistema, la válvula HV13 debe permanecer cerrada, esta válvula permite que la descarga del tanque no retorne a la cisterna sino que en su lugar el agua sea evacuada al drenaje. Todas estas disposiciones de válvulas deben de ser tomadas en cuenta para el arranque del equipo.

Para la activación de los componentes eléctricos del lazo de control de caudal y nivel, se cuenta con un enchufe de 110v para un toma corriente de la pared, este energiza el módulo.

El equipo cuenta con dos electro válvulas neumáticas para casos de emergencia el devuelven a las válvulas de control a su estado normal,

en este caso el sistema retorna a la seguridad, la activación de estas válvulas es mediante un tablero que cuenta con pulsadores de retención, estos pulsadores trabajan bajo la retención en el momento de ser activados disparar la válvula de control a su posición normal.

El módulo de control de caudal y nivel cuenta con un graficador neumático en funcionamiento es de tipo de rollo de papel continuo y es accionado desde un interruptor en el frente del panel del módulo, a demás se cuenta con la posibilidad de selección de este graficador, mediante dos selectores instalados en el frente del panel del módulo se pueden desviar las señales de los dos sensores, de nivel y caudal, hacia el graficador o directamente a la interfase Field Point , o interrumpir su señal en posición neutral.

Finalmente solo faltaría la revisión de conexiones de la caja de la interfase Fiel Point con los módulos y la computadora con los programas de control.

La caja interfase Field Point se comunica con los módulos de los procesos a través de conectores DV-25 los cuales están identificados por colores verde para el módulo de nivel y caudal, y rojo para el módulo de temperatura, estos conectores no deben ser intercambiados.



La Figura 5.4 muestra la posición de los conectores de los módulos en la caja de la interfase Field Point

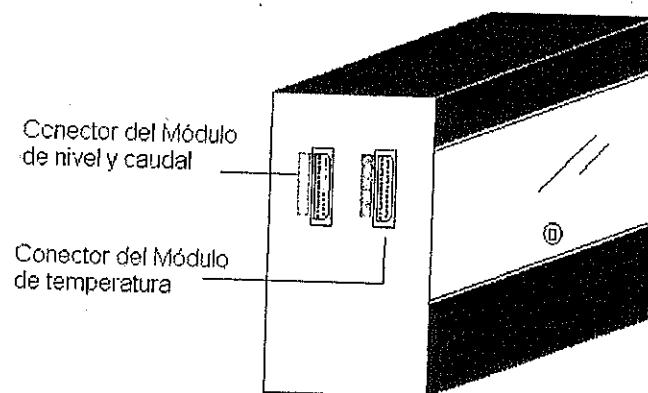


FIGURA 5.4. CONECTORES DE LOS MÓDULOS A INTERFASE

La Figura 5.5 muestra la posición de los conectores de la interfase Field Point a el puerto serial y al puerto paralelo de la computadora y la conexión de la fuente de poder

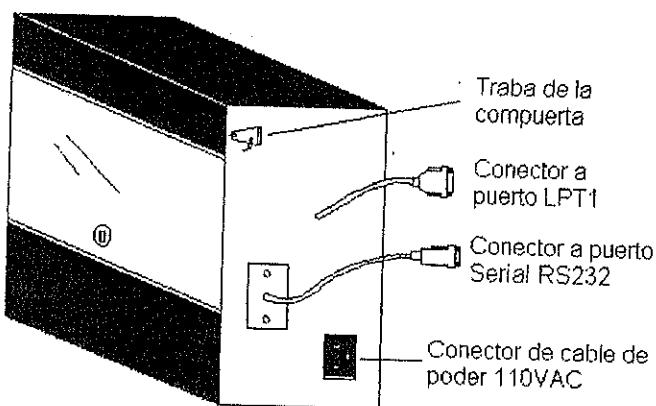


FIGURA 5.5. CONECTORES DE LA COMPUTADORA A INTERFASE

Finalmente solo resta encender la computadora y cargar el programa de control con el que se desee realizar la práctica de ajuste de controlador, nivel o caudal. Tomando en cuenta esta información y revisando la correcta operación de los componentes mostrados en este punto se puede encender el módulo y esperar que opere con normalidad.

Antes de presentar las prácticas de ajuste de controlador se analizará las teorías de ajuste de controlador, y se hará referencia a estas dentro de las prácticas.

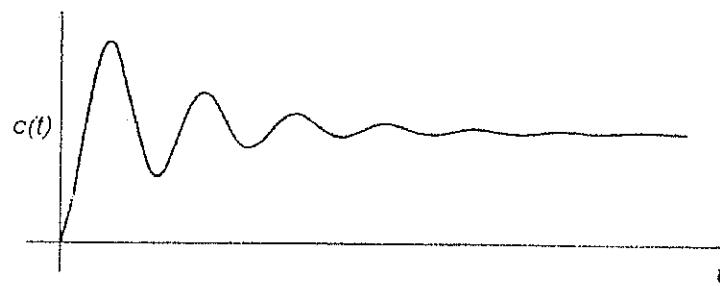
### **Estabilidad del circuito de control**

Un sistema es estable si su salida permanece limitada para una entrada limitada. La mayoría de los procesos industriales son estables a circuito abierto, es decir, son estables cuando no forman parte de un circuito de control por retroalimentación; esto equivale a decir que la mayoría de los procesos son autorregulables, o sea, la salida se mueve de un estado estable a otro, debido a los cambios en las señales de entrada. Un ejemplo típico de proceso inestable a circuito abierto es el tanque exotérmico de reacción con agitación, en el cual algunas veces existe un punto de operación inestable en el que, al incrementar la temperatura, se produce un incremento en la tasa de reacción, con el consecuente incremento en la tasa de liberación de calor, lo cual, a su vez, ocasiona

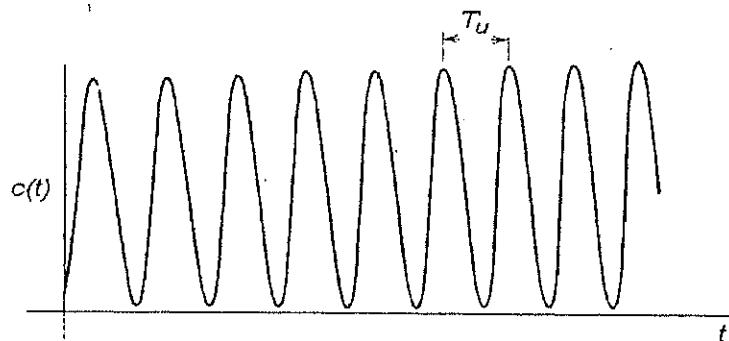
un mayor incremento en la temperatura. Aun para los procesos estables a circuito abierto, la estabilidad vuelve a ser considerable cuando el proceso forma parte de un circuito de control por retroalimentación, debido a que las variaciones en las señales se refuerzan unas a otras conforme viajan sobre el circuito, y ocasionan que la salida y todas las otras señales en el circuito se vuelvan ilimitadas. El comportamiento del circuito de control por retroalimentación es esencialmente oscilatorio, es decir, de ensayo y error. En algunas circunstancias, las oscilaciones se pueden incrementar en magnitud, de lo cual resulta un proceso inestable. La ilustración más sencilla de un circuito de retroalimentación inestable es el controlador cuya dirección de acción es opuesta a la que debería ser; por ejemplo en el intercambiador de calor que se esbozó en la sección precedente, si la salida del controlador se incrementara al aumentar la temperatura (controlador de acción directa), el circuito es inestable, porque al abrir la válvula de vapor se provoca un mayor incremento en la temperatura. En este caso, lo que se necesita es un controlador de acción inversa cuya salida se decremente cuando la temperatura se incremente, de manera que se cierre la válvula de vapor y baje la temperatura. Sin embargo, aun con el controlador de acción adecuada, el sistema se puede volver inestable, debido a los retardos en el circuito, lo cual ocurre generalmente cuando se incrementa la ganancia del circuito. En consecuencia, la ganancia del controlador a la que el



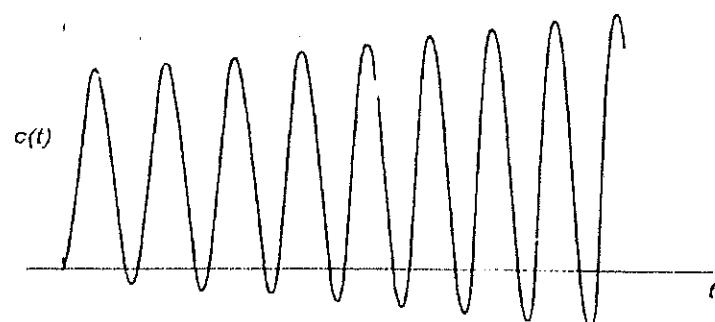
circuito alcanza el umbral de inestabilidad es de gran importancia en el diseño de un circuito de control con retroalimentación. Esta ganancia máxima se conoce como ganancia última.



Respuesta de un sistema estable



Respuesta de un sistema marginalmente estable con periodo límite  $T_u$

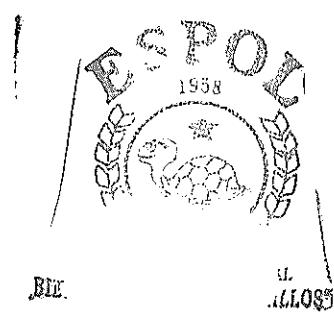


Respuesta de un sistema inestable

FIGURA 5.6. RESPUESTA DE UN SISTEMA A VARIOS VALORES DE K

### Ajuste de los controladores por retroalimentación

El ajuste es el procedimiento mediante el cual se adecúan los parámetros del controlador por retroalimentación para obtener una respuesta específica de circuito cerrado. El ajuste de un circuito de control por retroalimentación es análogo al del motor de un automóvil o de un televisor en cada caso la dificultad del problema se incrementa con el número de parámetros que se deben ajustar; por ejemplo, el ajuste de un controlador proporcional simple o de uno integral es similar al del volumen de un televisor, ya que sólo se necesita ajustar un parámetro o "perilla"; el procedimiento consiste en moverlo en una dirección u otra, hasta que se obtiene la respuesta (o volumen) que se desea. El siguiente grado de dificultad es ajustar el controlador de dos modos o proporcional-integral (PI), que se asemeja al proceso de ajustar el brillo y el contraste de un televisor en blanco y negro, puesto que se deben ajustar dos parámetros: la ganancia y el tiempo de reajuste; el procedimiento de ajuste es significativamente más complicado que cuando sólo se necesita ajustar un parámetro. Finalmente, el ajuste de los controladores de tres modos o proporcional-integral-derivativo (PID) representa el siguiente grado de dificultad, debido a que se requiere ajustar tres parámetros: la ganancia, el tiempo de reajuste y el tiempo de derivación, lo cual es análogo al ajuste de los haces verde, rojo y azul en un televisor a color.



A pesar de que se planteó la analogía entre el ajuste de un televisor y un circuito de control con retroalimentación, no se trata de dar la impresión de que en ambas tareas existe el mismo grado de dificultad. La diferencia principal estriba en la velocidad de respuesta del televisor contra la del circuito del proceso; en el televisor se tiene una retroalimentación casi inmediata sobre el efecto del ajuste. Por otro lado, a pesar de que en algunos circuitos de proceso se tienen respuestas relativamente rápidas, en la mayoría de los procesos se debe esperar varios minutos, o aun horas, para apreciar la respuesta que resulta del ajuste, lo cual hace que el ajuste de los controladores con retroalimentación sea una tarea tediosa que lleva tiempo; a pesar de ello, éste es el método que más comúnmente utilizan los ingenieros de control e instrumentación en la industria. Para ajustar los controladores a varios criterios de respuesta se han introducido diversos procedimientos y fórmulas de ajuste. Ningún procedimiento da mejor resultado que los demás para todas las situaciones de control de proceso.

Los valores de los parámetros de ajuste dependen de la respuesta de circuito cerrado que se desea, así como de las características dinámicas o personalidad de los otros elementos del circuito de control y, particularmente, del proceso. Se vio anteriormente que, si el proceso no

es lineal, como generalmente ocurre, estas características cambian de un punto de operación al siguiente, o cual significa que un conjunto particular de parámetros de ajuste puede producir la respuesta que se desea únicamente en un punto de operación, debido a que los controladores con retroalimentación estándar son dispositivos básicamente lineales. A fin de operar en un rango de condiciones de operación, se debe establecer un arreglo para lograr un conjunto aceptable de parámetros de ajuste, ya que la respuesta puede ser lenta en un extremo del rango, y oscilatoria en el otro. Con lo anterior en mente, a continuación se exponen algunos de los procedimientos propuestos para ajustar los controladores industriales.

### **Respuesta de razón de asentamiento de un cuarto mediante el método de ganancia última**

Este método, uno de los primeros, que también se conoce como método de circuito cerrado o ajuste en línea, lo propusieron Ziegler y Nichols, en 1942; consta de dos pasos, al igual que todos los otros métodos de ajuste;

**Paso 1.** Determinación de las características dinámicas o personalidad del circuito de control.

**Paso 2.** Estimación de los parámetros de ajuste del controlador con los que se produce la respuesta deseada para las características dinámicas que se determinaron en el primer paso en otras palabras, hacer coincidir la personalidad del controlador con la de los demás elementos del circuito.

En este método, los parámetros mediante los cuales se representan las características dinámicas del proceso son: la ganancia última de un controlador proporcional, y el periodo último de oscilación; estos parámetros, que se introdujeron en la sección precedente, se pueden determinar mediante el método de sustitución directa, si se conocen cuantitativa mente las funciones de transferencia de todos los componentes del circuito, ya que generalmente éste no es el caso. La ganancia y el período últimos se deben determinar frecuentemente de manera experimental, a partir del sistema real, mediante el siguiente procedimiento;

1. Se desconectan la accione integral y derivativo del controlador por retroalimentación, de manera que se tiene un controlador proporcional. En algunos modelos no es posible desconectar la acción integral, pero se puede desajustar mediante la simple igualación del tiempo de integración al valor máximo o de manera equivalente, la tasa de integración al valor mínimo.



2. Con el controlador en automático (esto es, el circuito cerrado), se incrementa la ganancia proporcional (o se reduce la banda proporcional), hasta que el circuito oscila con amplitud constante; se registra el valor de la ganancia con que se produce la oscilación sostenida como  $K_{cu}$  ganancia última. Este paso se debe efectuar con incrementos discretos de la ganancia, alterando el sistema con la aplicación de pequeños cambios en el punto de control a cada cambio en el establecimiento de la ganancia. Los incrementos de la ganancia deben ser menores conforme ésta se aproxime a la ganancia última.

3. Del registro de tiempo de la variable controlada, se registra y mide el período de oscilación como  $T_u$  período último, según se muestra en la Figura 5.7.

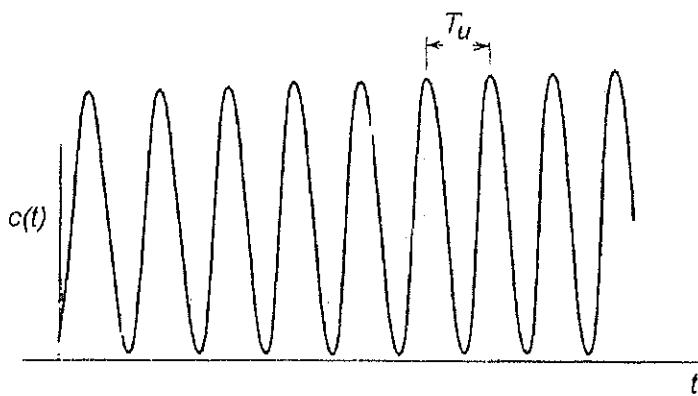


FIGURA 5.7. RESPUESTA DEL CIRCUITO CUANDO LA GANANCIA DEL CONTROLADOR SE HACE IGUAL A LA GANANCIA ÚLTIMA  $K_{cu}$   
EL PERÍODO ÚLTIMO ES  $T_u$ .

Para la respuesta que se desea del circuito cerrado, Ziegler y Nichols especificaron una razón de asentamiento de un cuarto. La razón de asentamiento (disminución gradual) es la razón de amplitud entre dos oscilaciones sucesivas; debe ser independiente de las entradas al sistema, y depender únicamente de las raíces de la ecuación característica del circuito.

En la Figura 5.8 se muestran las respuestas típicas de razón de asentamiento de un cuarto para una perturbación y un cambio en el punto de control.

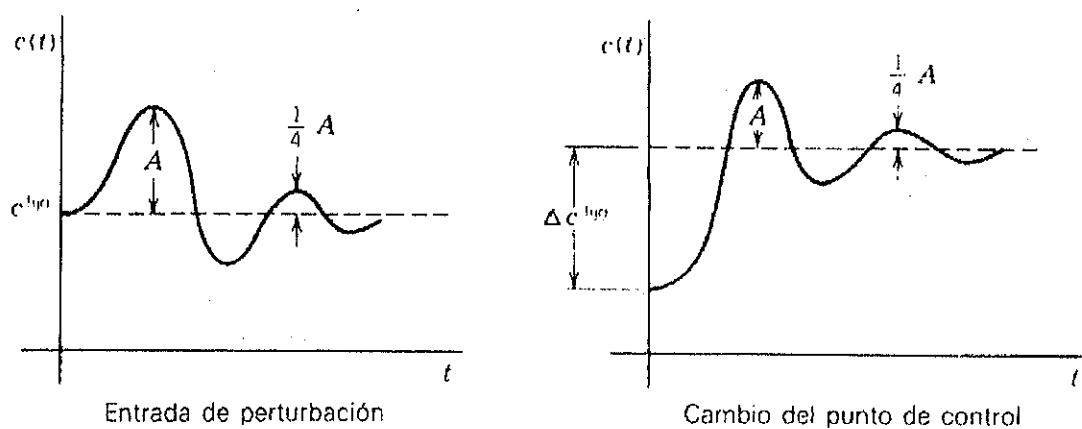


FIGURA 5.8. RESPUESTA DERAZÓN DE DISMINUCIÓN GRADUAL DE UN CUARTO AL CAMBIO EN LA ENTRADA DE PERTURBACIÓN Y EL PUNTO DE CONTROL.

Una vez que se determinan la ganancia última y el período último, se utilizan las fórmulas de la tabla 22 para calcular los parámetros de ajuste del controlador con los cuales se producen respuestas de la razón de asentamiento de un cuarto.

Nótese que, cuando se introduce la acción integral, se fuerza una reducción del 10% en la ganancia del controlador **PI**, en comparación con la del controlador proporcional.

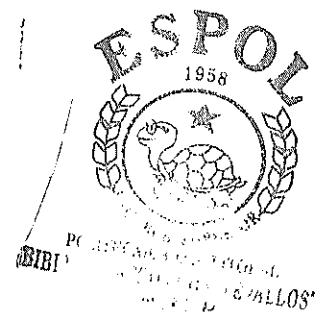
Por otro lado, la acción derivativa propicia un incremento, tanto en la ganancia proporcional como en la tasa de integración (un decremento en el tiempo de integración) del controlador **PID**, en comparación con las del controlador **PI**, debido a que la acción integral introduce un retardo en la operación del controlador por retroalimentación, mientras que con la acción derivativa se introduce un avance o adelanto.

La respuesta con asentamiento de un cuarto no es deseable para cambios escalón en el punto de control, porque produce un sobrepaso del 50% ( $A/\Delta_{cfijacion} = 0.5$ ), debido a que la desviación máxima del nuevo punto de control en cada dirección es un medio de la desviación máxima precedente en la dirección opuesta (ver Figura 5.8). Sin embargo, la respuesta de la razón de asentamiento de un cuarto es muy

deseable para las perturbaciones, porque se evita una gran desviación inicial del punto de control sin que se tenga demasiada oscilación. La mayor dificultad de la respuesta de razón de asentamiento de un cuarto es que el conjunto de parámetros de ajuste requerido para obtenerla no es único, a excepción del caso del controlador proporcional; en el caso de los controladores PI se puede verificar fácilmente que, para cada valor del tiempo de integración, es posible encontrar un valor de ganancia con el cual se produce una respuesta de razón de asentamiento de un cuarto y viceversa; lo mismo es válido para el controlador PID. Las puestas a punto que proponen Ziegler y Nichols son valores de campo que producen una respuesta rápida en la mayoría de los circuitos industriales.

<i>Tipo de controlador</i>	<i>Ganancia proporcional</i> $K_C$	<i>Tiempo de integración</i> $\tau_I$	<i>Tiempo de derivación</i> $\tau_D$
Proporcional	P	$K_{cu}/2$	—
Proporcional-integral	PI	$K_{cu}/2.2$	$T_u/1.2$
Proporcional-integral-derivativo	PID	$K_{cu}/1.7$	$T_u/2$
			$T_u/8$

TABLA 22. FORMULAS PARA AJUSTE DE RAZÓN DE ASENTAMIENTO DE UN CUARTO



## Caracterización del proceso

El método de Ziegler-Nichols para ajuste en línea que se acaba de presentar es el único con que se caracteriza al proceso mediante la ganancia y período únicos. Con la mayoría de los demás métodos para ajuste del controlador, se caracteriza al proceso mediante un modelo simple de primer o segundo orden con tiempo muerto. Para una mejor comprensión de las suposiciones que entran en tal caracterización, considérese el diagrama de bloques de un circuito de control por retroalimentación que se muestra en la Figura 5.9 los símbolos que aparecen en el diagrama son

- $R(s)$  transformada de Laplace de la señal del punto de control
- $M(s)$  transformada de Laplace de la señal de salida del controlador
- $C(s)$  transformada de Laplace de la señal de salida del transmisor
- $E(s)$  transformada de Laplace de la señal de error
- $U(s)$  transformada de Laplace de la señal de perturbación
- $G_c(s)$  función de transferencia del controlador
- $G_v(s)$  función de transferencia de la válvula de control (o elemento final de control)
- $G_m(s)$  función de transferencia del proceso entre la variable controlada y la variable manipulada

$G_u(s)$  función de transferencia del proceso entre la variable controlada y el disturbio

$H(s)$  función de transferencia del sensor-transmisor

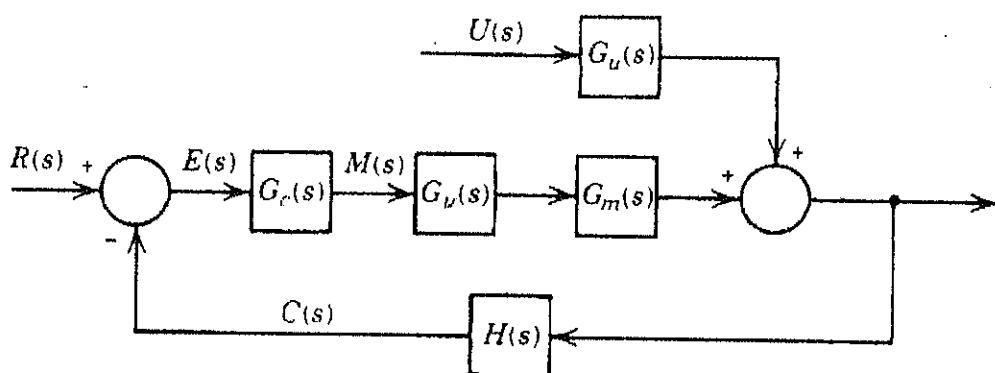


FIGURA 5.9. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CIRCUITO TÍPICO DE CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN.

Para dibujar el diagrama equivalente de bloques que se muestra en la Figura 5.10, se utiliza el álgebra simple de diagramas de bloques; en este diagrama sólo hay dos bloques en el circuito de control, uno para el controlador y otro para el resto de los componentes del circuito. La ventaja de esta representación simplificada estriba en que se destacan las dos señales del circuito que generalmente se observan y registran: la salida del controlador  $M(s)$  y la señal del transmisor  $C(s)$ . En la mayoría de los circuitos no se puede observar alguna señal o variable, a excepción de

esas dos; por lo tanto, la concentración de las funciones de transferencia de la válvula de control, del proceso y del sensor-transmisor, no se hace sólo por conveniencia, sino por razones prácticas; si a esta combinación de funciones de transferencia se le designa

como  $G(s)$ :

$$G(s) = G_v(s) G_m(s) H(s) \quad (5-1)$$

Es precisamente esta función de transferencia combinada la que se aproxima mediante los modelos de orden inferior con el objeto de

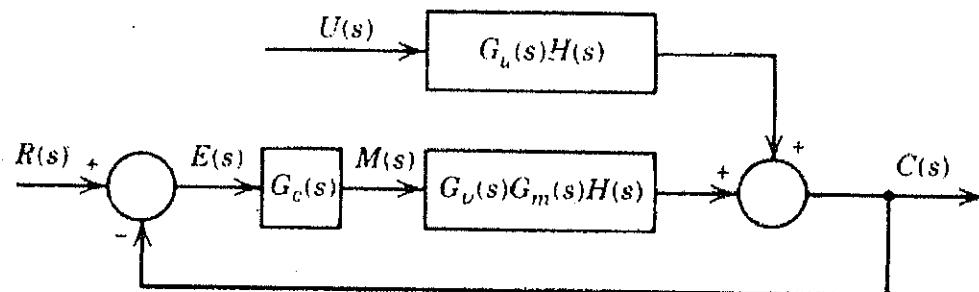
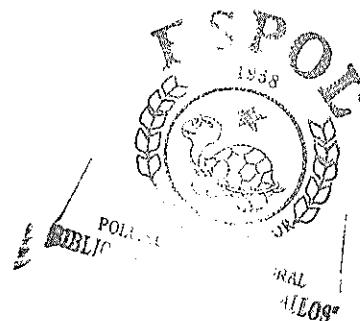


FIGURA 5.10. DIAGRAMA DE BLOQUES EQUIVALENTE Y SIMPLIFICADO EN EL CUAL TODOS LOS INSTRUMENTOS DE CAMPO Y EL PROCESO SE ENCUENTRAN EN BLOQUES INDIVIDUALES.



caracterizar la respuesta dinámica del proceso. Lo importante es que en el "proceso" caracterizado se incluye el comportamiento dinámico de la válvula de control y del sensor/transmisor. Los modelos que comúnmente se utilizan para caracterizar al proceso son los siguientes:

### **Modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM)**

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (5-2)$$

### **Modelo de segundo orden más tiempo muerto (SOMTM)**

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (5-3)$$

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau^2 s + 2\xi\tau s + 1} \quad (5-4)$$

para procesos subamortiguados ( $\xi < 1$ ), donde:

$K$  = ganancia del proceso en estado estacionario

$T_0$  = tiempo muerto efectivo del proceso

$\tau, \tau_1, \tau_2$  = constantes de tiempo efectivas del proceso

$\xi$  = razón de amortiguamiento efectiva del proceso

De éstos, el modelo POMTM es en el que se basan la mayoría de las fórmulas de ajuste de controladores. En este modelo el proceso se caracteriza mediante tres parámetros: la ganancia  $K$ , el tiempo muerto  $t_0$  y la constante de tiempo  $\tau$ . De modo que el problema consiste en la manera en que se pueden determinar dichos parámetros para un circuito particular; la solución consiste en realizar algunas pruebas dinámicas en el sistema real o la simulación del circuito en una computadora; la prueba más simple que se puede realizar es la de escalón.

### **Prueba del proceso de escalón o curva de reacción**

El procedimiento de la prueba de escalón se lleva a cabo como sigue:

1. Con el controlador en la posición "manual" (es decir, el circuito abierto), se aplica al proceso un cambio escalón en la señal de salida del controlador  $m(t)$ . La magnitud del cambio debe ser lo suficientemente grande como para que se pueda medir el cambio consecuente en la señal de salida del transmisor, pero no tanto como para que las no linealidades del proceso ocasionen la distorsión de la respuesta.
2. La respuesta de la señal de salida del transmisor  $c(t)$  se registra con un graficador de papel continuo o algún dispositivo equivalente; se debe tener



la seguridad de que la resolución es la adecuada, tanto en la escala de amplitud como en la de tiempo. La graficación de  $c(t)$  contra el tiempo debe cubrir el período completo de la prueba, desde la introducción de la prueba de escalón hasta que el sistema alcanza un nuevo estado estacionario. La prueba generalmente dura entre unos cuantos minutos y varias horas, según la velocidad de respuesta del proceso.

Naturalmente, es imperativo que no entren perturbaciones al sistema mientras se realiza la prueba de escalón. En la Figura 5.11 se muestra una gráfica típica de la prueba, la cual se conoce también como *curva de reacción del proceso*; la respuesta en forma de S es característica de los procesos de segundo orden o superior, con o sin tiempo muerto. El siguiente paso es hacer coincidir la curva de reacción del proceso con el modelo de un proceso simple para determinar los parámetros del modelo; a continuación se hace esto para un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM).

En ausencia de perturbaciones y para las condiciones de la prueba, el diagrama de bloques de la Figura 5.1C se puede redibujar de la manera en que aparece en la Figura 5.12. La respuesta de la señal de salida del transmisor se expresa mediante

$$C(s) = G(s) M(s)$$

Para un cambio escalón de magnitud  $\Delta m$  en la salida del controlador y un modelo POMTM, ecuación (5-2), se tiene

$$G(s) = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \cdot \frac{\Delta m}{s} \quad (5-5)$$

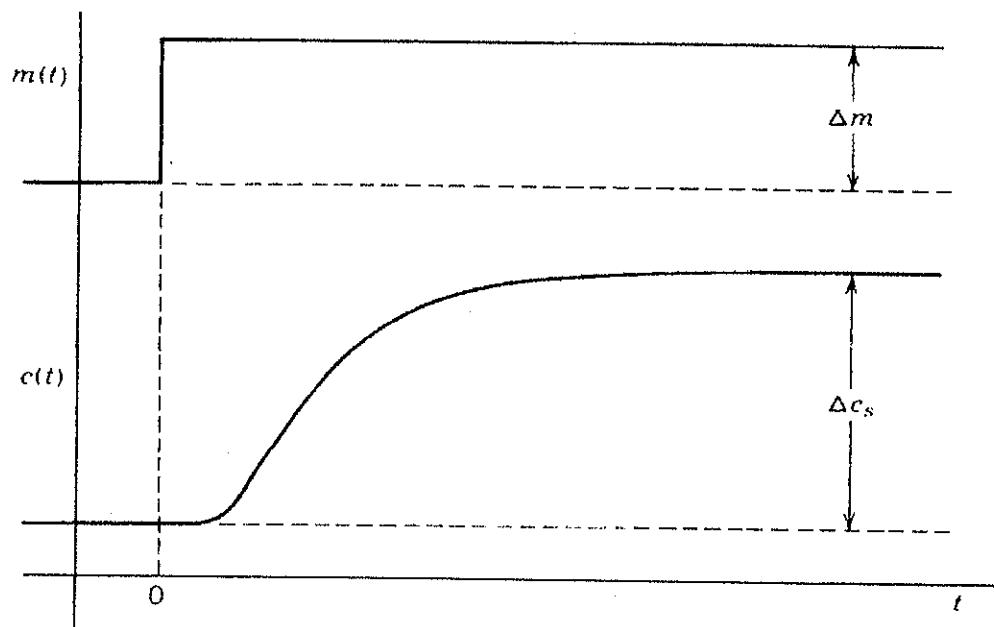


FIGURA 5.10. CÚRVA DE REACCIÓN DEL PROCESO O RESPUESTA ESCALÓN DEL CIRCUITO ABIERTO.

Al expandir esta expresión en fracciones parciales, se obtiene

$$C(s) = K \Delta m e^{-t_0 s} \left[ \frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right] \quad (5-6)$$

Se invierte, con ayuda de la tabla de transformada de Laplace, y se aplica teorema de la traslación real para obtener

$$\Delta c(t) = K\Delta m \cdot u(t - t_0) \cdot [1 - e^{-(t-t_0)/\tau}] \quad (5-7)$$

se incluye la función escalón unitario  $u(t - t_0)$ , para indicar explícitamente que

$$\Delta c(t) = 0 \quad \text{para } t \leq t_0$$

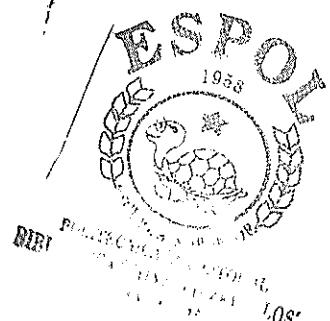
El término  $\Delta c$  es la perturbación o cambio de salida del transmisor respecto a su valor inicial:

$$\Delta c(t) = c(t) - c(0) \quad (5-8)$$

En la Figura 5.11 se muestra una gráfica de la ecuación (5-7), en ésta el término, es el cambio, en estado estacionario, de  $c(t)$ . De la ecuación (5-7) se tiene que

$$\Delta c_s = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta c(t) = K \cdot \Delta m \quad (5-9)$$

A partir de esta ecuación, y si se tiene en cuenta que la respuesta del modelo debe coincidir con la curva de reacción del proceso en estado



estable, se puede calcular la ganancia de estado estacionario del proceso, la cual es uno de los parámetros del modelo:

$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta m} \quad (5-10)$$

El tiempo muerto  $t_0$  y la constante de tiempo  $\tau$  se pueden determinar al menos mediante tres métodos, cada uno de los cuales da diferentes valores.

**Método 1.** En este método se utiliza la línea tangente a la curva de reacción del proceso, en el punto de razón máxima de cambio; para el modelo POMTM esto ocurre en

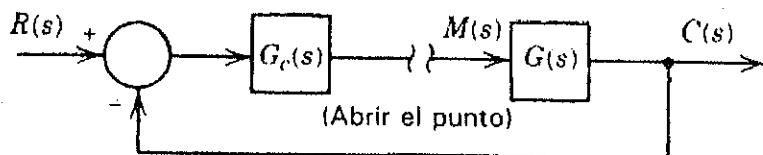
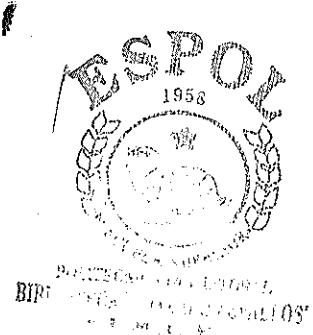


FIGURA 5.11: DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA PRUEBA ESCALÓN CON CIRCUITO ABIERTO



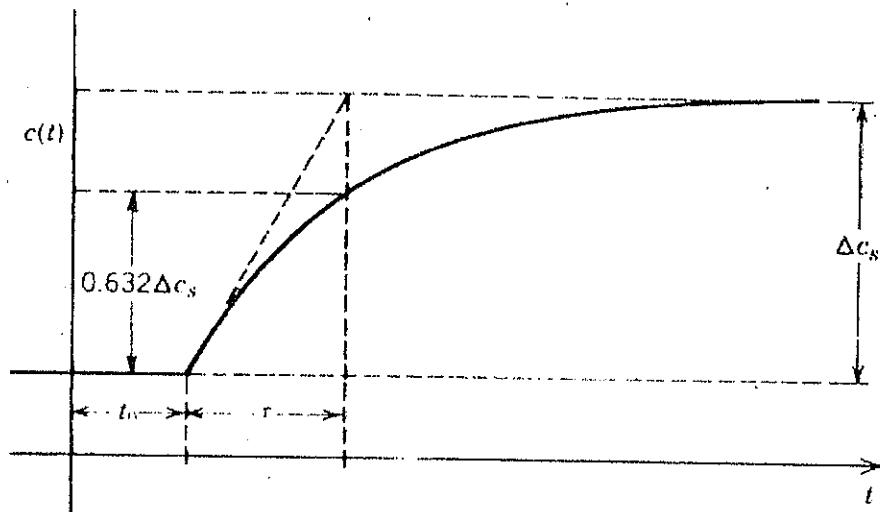


FIGURA 5.12. RESPUESTA ESCALÓN DE UN PROCESO DE PRIMER ORDEN MÁS TIEMPO MUERTO EN LA QUE SE ILUSTRA LA DEFINICIÓN GRÁFICA DE TIEMPO MUERTO,  $t_0$  Y CONSTANTE DE TIEMPO  $\tau$

$t = t_0$  como resulta evidente al observar la respuesta del modelo en la

Figura 5-12. De la ecuación (5-7) se encuentra que esta razón inicial (máxima) de cambio es

$$\left. \frac{d(\Delta c)}{dt} \right|_{t_0} = K \Delta m \left[ \frac{1}{\tau} \right] = \frac{\Delta c_s}{\tau} \quad (5-11)$$

En la Figura 5.12 se aprecia que tal resultado indica que la línea de razón máxima de cambio interseca la línea de valor inicial en  $t = t_0$  y a la línea de valor final en  $t = t_0 + \tau$ . De este descubrimiento se deduce el trazo para determinar  $t_0$  y  $\tau$  que se ilustra en la figura 6-16a; la línea se traza

tangente a la curva de reacción del proceso real, en el punto de reacción máxima de cambio. La respuesta del modelo en que se emplean los valores de  $t_0$  y  $\tau$  se ilustra con la línea punteada en la Figura 5-13. Evidentemente, la respuesta del modelo que se obtiene con este método no coincide muy bien con la respuesta real.

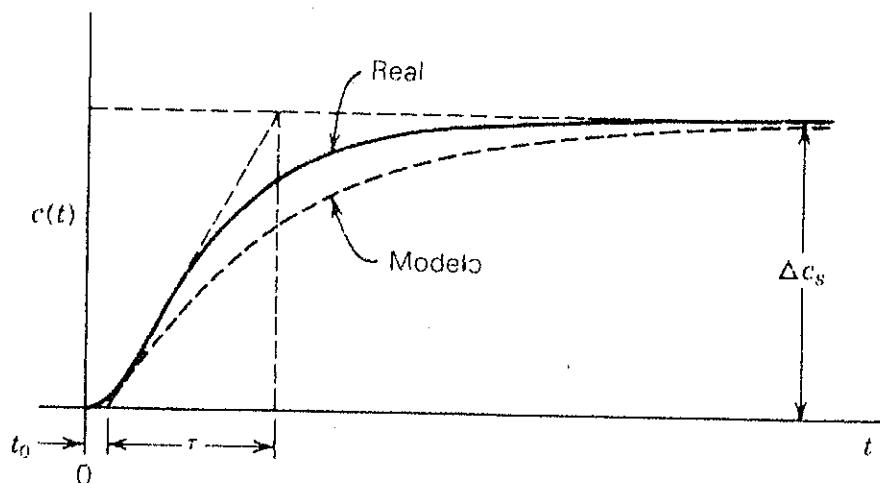


FIGURA 5.13. PARÁMETROS DEL MODELO POMTM QUE SE OBTIENEN MEDIANTE EL MÉTODO 1

**Método 2.** En este método  $t_0$  se determina de la misma manera que en el método 1, pero con el valor de  $\tau$  se fuerza a que la respuesta del modelo coincida con la respuesta real en  $t = t_0 + \tau$ . De acuerdo con la ecuación (5-7) este punto es

$$\Delta c(t_0 - \tau) = K\Delta m[1 - e^{-1}] = 0.632\Delta c_s \quad (5-12)$$

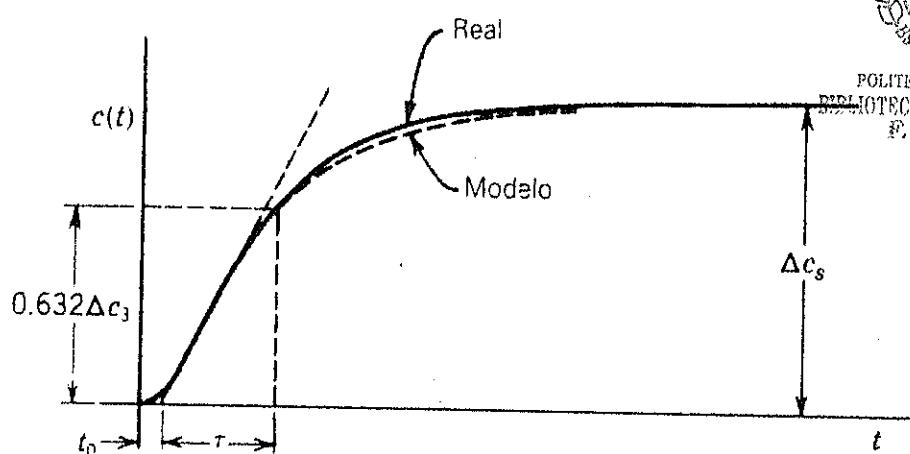


FIGURA 5.13. PARÁMETROS DEL MODELO POMTM QUE SE OBTIENEN MEDIANTE EL MÉTODO 2

Se observa que la comparación entre la respuesta del modelo y la real es mucho más cercana que con el método 1, Figura 5.13. El valor de la constante de tiempo que se obtiene con el método 2 es generalmente menor al que se obtiene con el método 1.

#### **Respuesta de razón de asentamiento de un cuarto**

Además de sus fórmulas para ajuste en linea, Ziegler y Nichols proponen un conjunto de fórmulas que se basan en los parámetros de ajuste, para un modelo de primer orden, a la curva de reacción del proceso; dichas fórmulas se muestran en la tabla 23. A pesar de que los parámetros que utilizaron no son precisamente la ganancia, la constante de tiempo y el

tiempo muerto, sus fórmulas se pueden modificar para expresarlas en términos de esos parámetros. Ziegler y Nichols utilizaron el método 1 para determinar los parámetros del modelo.

Como se puede ver en la tabla 23, las magnitudes relativas de la ganancia, el tiempo de integración y el de derivación en los controladores P, PI y PID, son las mismas que las de las fórmulas de ajuste en línea, las cuales se basan en el período y ganancia últimos (tabla 22). En las fórmulas se observa que la ganancia del circuito,  $KK_c$  es inversamente proporcional a la razón del tiempo muerto efectivo, a la constante de tiempo efectiva.

<i>Tipo de controlador</i>		<i>Ganancia proporcional</i> $K_c$	<i>Tiempo de integración</i> $T_I$	<i>Tiempo de derivación</i> $T_D$
Proporcional	P	$\frac{1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	—	—
Proporcional-integral	PI	$\frac{0.9}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_0$	—
Proporcional-integral-derivativo	PID	$\frac{1.2}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0 t_0$	$\frac{1}{2} t_0$

TABLA 23 FORMULAS PARA AJUSTE DE RAZÓN DE ASENTAMIENTO DE UN CUARTO

Para utilizar estas fórmulas se debe tener en cuenta que son empíricas y sólo se aplican a un rango limitado de razones de tiempo muerto contra

constante de tiempo, lo cual significa que no se debe extrapolar fuera de un rango de  $t_0/\tau$  entre 0.10 y 1.0.

La dificultad para especificar el desempeño de los controladores PI y PID con una razón de asentamiento de un cuarto, estriba en que existe un número infinito de conjuntos de valores de los parámetros del controlador que pueden producir ese desempeño. Las fórmulas que se dan son justamente uno de tales conjuntos.

A continuación se presentan las prácticas de ajuste de controladores para los dos sistemas que propone el módulo de control de nivel y caudal.

En el lazo de control de caudal se practica el ajuste de controlador por el método de la ganancia última. En el lazo de control de nivel se practica el ajuste de controlador por el método de la curva de reacción, las teorías que se expusieron son vistas de un modo más simplificado dentro de las prácticas para estudiantes, de requerirse más información se puede profundizar el tema el en toda esta sección, las prácticas fueron creadas para llevarse acabo dentro del laboratorio en un tiempo limitado y deben de condensar la información para lograr cumplir los objetivos.



## 5.2. Práctica de ajuste de controlador por el método de la ganancia

### Última

#### Planta de procesos lazo de caudal

##### Introducción

El lazo de caudal de la planta de procesos industriales fue diseñado para la presente práctica de ajuste de controladores. La función del lazo es mantener el caudal lo más cercano al punto de control, sin importar las perturbaciones a las cuales el sistema sea sometido.

La precisión de la respuesta del sistema a los cambios del mismo depende de la calibración del controlador.

La planta de procesos industriales fue automatizada por un programa de computadora creado bajo el software Lab VIEW de National Instruments. Este programa gráfico contiene el controlador proporcional integral derivativo. El control opera de modo numérico, la ventaja de este sistema contra los controladores neumáticos son amplias, principalmente en la facilidad y permanencia de la calibración.



### 5.2.1. Objetivos

Dar a conocer a los estudiantes algunos métodos empíricos por los cuales pueden ser determinados los valores de las constantes de calibración banda proporcional, tiempo integral y derivativo, (PID), para controladores

### 5.2.2. Teoría

La función del controlador es, basándose en el error entre el punto de control y la respuesta del sistema, corregir la variable controlada de tal modo que compense el error y la respuesta del sistema se aproxime más al valor deseado o punto de control.

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (5-13)$$

$$m(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int e(t) dt + k_c \tau_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (5-14)$$

$m(t)$  = Salida del controlador mA

$r(t)$  = Punto de control set point mA

$c(t)$  = Variable que se controla mA, señal que llega del transmisor.

$K_c$  = Ganancia del controlador mA/mA, %/%.

$\tau_i$  = Tiempo de integración.



POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA 'GUZMÁN ZEVALLOS'  
F.I.M.C.P.

$\tau_d$  = Tiempo de derivación.

La ecuación 5-14 es el algoritmo matemático que rige el comportamiento del controlador, esta ecuación muestra la relación entre la salida del controlador  $m(t)$  y el error  $e(t)$ , generado por la diferencia entre el punto de control y la variable del proceso con respecto al tiempo.

La ecuación 5-14 es el algoritmo matemático típico para un controlador Proporcional Integral Diferencial (PID), con la suma de estas tres componentes se consigue una respuesta del sistema al controlador, la respuesta depende del ajuste de las constantes del controlador

$k_c$  P constante proporcional

$\frac{k_c}{\tau_i}$  I constante de integración

$k_c \tau_d$  D constante derivativa

Existen varios métodos empíricos de ajuste de controladores, no todos los métodos pueden ser válidos para cada caso, debiendo el ingeniero de control buscar el que mejor se adapte a la personalidad del sistema. Para este sistema basándose en

experimentación se determinó que el mejor método de calibración es el de ganancia última.

### Método de ganancia última:

Es uno de los primeros métodos, también se conoce como método de circuito cerrado o de ajuste en línea consta de dos pasos.

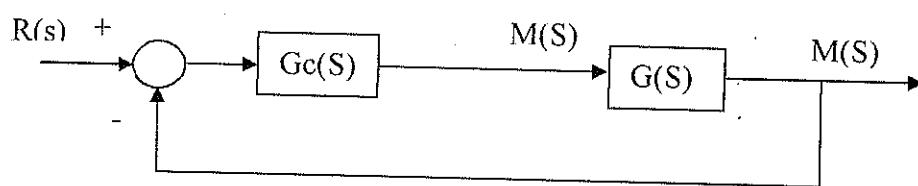


FIGURA 5.14. CIRCUITO DE CONTROL LAZO CERRADO

Paso 1.- Determinación de las características dinámicas o personalidad del circuito de control.

Paso 2.- Estimación de los parámetros de ajuste de controlador con los que se produce la respuesta deseada para las características dinámicas que se determinarán en el primer paso. En otras palabras, hacer coincidir la personalidad del controlador con los demás elementos del circuito.

### 5.2.3. Procedimiento

Este método consiste en producir una oscilación de amplitud constante del valor medido estando el sistema en automático o lazo cerrado.

1. Encienda el módulo de acuerdo al procedimiento y purgue el aire de ambas cámaras del sensor de caudal para evitar errores de lectura.
2. Ajuste todos los controles de acción integral y derivativa en cero, es decir, desconéctelos.

P   
I   
D

FIGURA 5.15. CASILLAS DE LAS CONSTANTES PID

3. Con el sistema en lazo cerrado pruebe con diferentes valores de la constante P. Producido un salto escalón desde  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , en la casilla del Set point.

Set Point

FIGURA 5.16. CASILLA DEL PUNTO DE CONTROL

para cada nuevo valor de la constante P, constate la respuesta del sistema en la gráfica. Antes de realizar un nuevo salto escalón vuelva la constante P a cero y ponga el Set point en cero, a demás presione el botón de reset out para borrar la memoria del controlador.

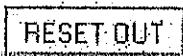


FIGURA 5.17: BOTÓN DE ENCERADO DE MEMORIA

Cuando el sistema se encuentre estable en cero caudal suelte el botón de reset out y estará listo para un nuevo salto escalón para una nueva constante P. Si la constante P esta por debajo del valor de  $K_{cu}$  el sistema se estabilizara.

Por el contrario si la constante P se encuentra por encima del valor de  $K_{cu}$  el sistema se vuelve inestable, es decir, que oscila erráticamente.

Cuando el valor de la constante P es igual a  $K_{cu}$  el sistema entra en oscilación continua de amplitud constante.

4. Obtenga la ganancia última (  $K_{cu}$  ) o banda proporcional última (  $BP_u$  ) y el periodo de oscilación último (  $T_u$  ).

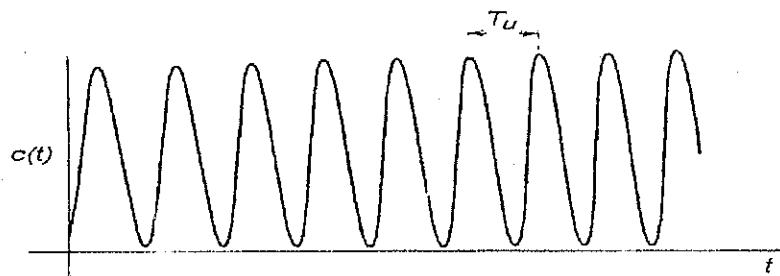


FIGURA 5.18. RESPUESTA DE UN SISTEMA MARGINAL ESTABLE  
CON PERIODO ÚLTIMO  $T_u$

5. Con la ganancia y el periodo último, utilice las formulas de la tabla 22 para calcular los parámetros de ajuste de controlador con las cuales se producen respuestas de la razón de asentamiento de un cuarto.
6. Ajuste el controlador y compruebe la respuesta del sistema

#### 5.2.4. Cálculos

La práctica comienza con un valor de  $K_c = 1$  como se ve en la gráfica el sistema en lazo cerrado se estabiliza, posteriormente se incrementa el valor de  $K_c$  hasta el valor de  $K_{cu}$  para el cual el sistema entra en oscilación constante, justo antes de la inestabilidad.

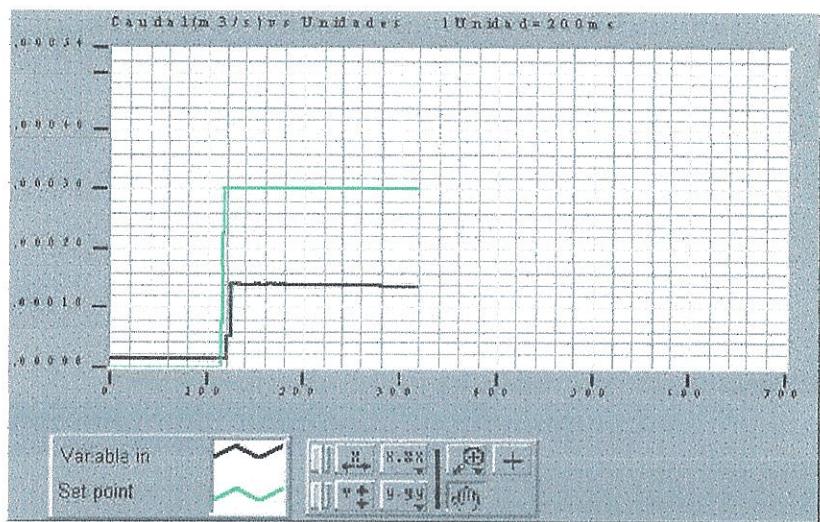


FIGURA 5.19. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1$

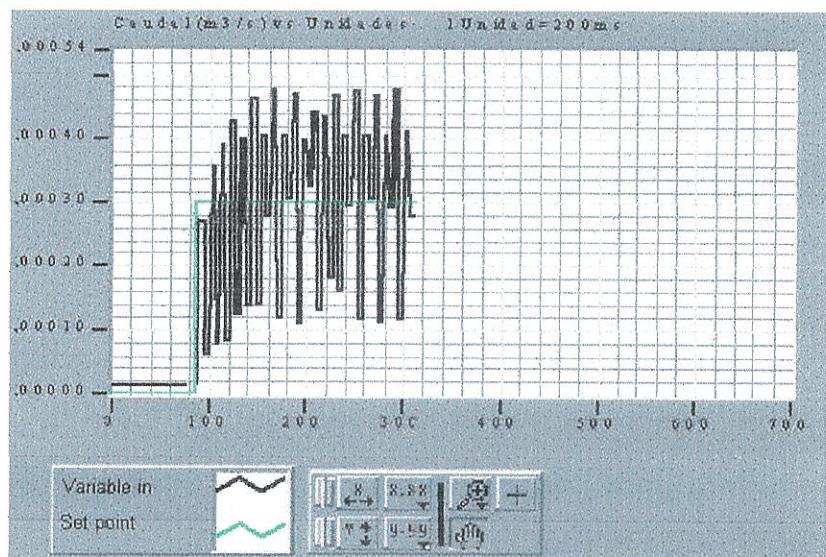


FIGURA 5.20. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 2$

Para  $K_c = 1$  el sistema se torna se estabiliza asentándose rápidamente, mientras que para  $K_c = 2$  el sistema se torna instable, dando saltos erráticos, de esta simple inspección se puede deducir que el valor de  $K_{cu}$  se encuentra entre  $K_c = 1$  y  $K_c = 2$ , para determinarlo se incrementara los valores de  $K_c$  dentro de estos rangos progresivamente.

La facilidad que nos brinda el controlador virtual digital, nos permite incrementar el valor de  $K_c$  de décima en décima y de ser necesario de centésima en centésima dándonos una excelente resolución para la calibración.

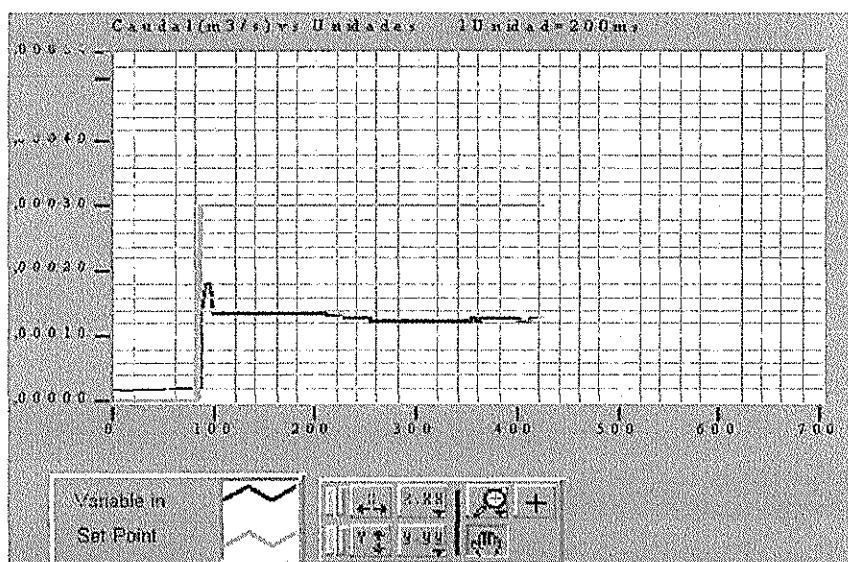


FIGURA 5.21. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_c = 1.1$

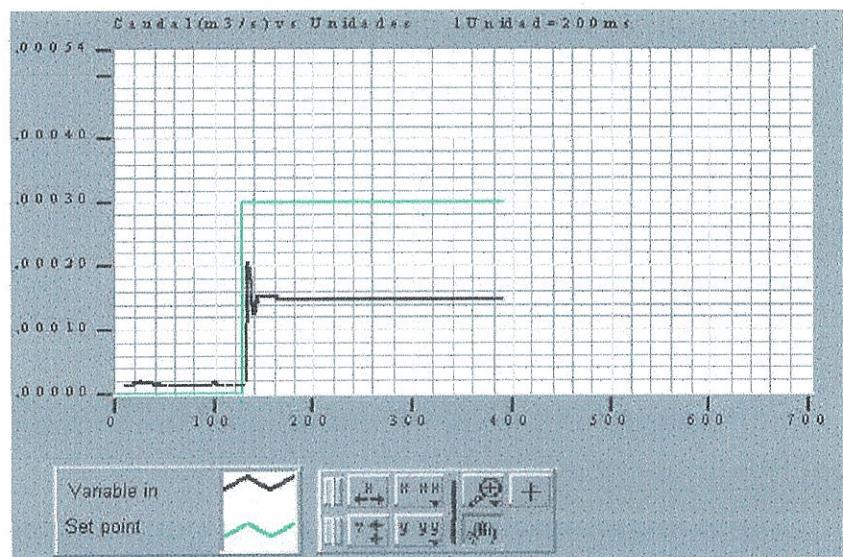


FIGURA 5.22. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.2$

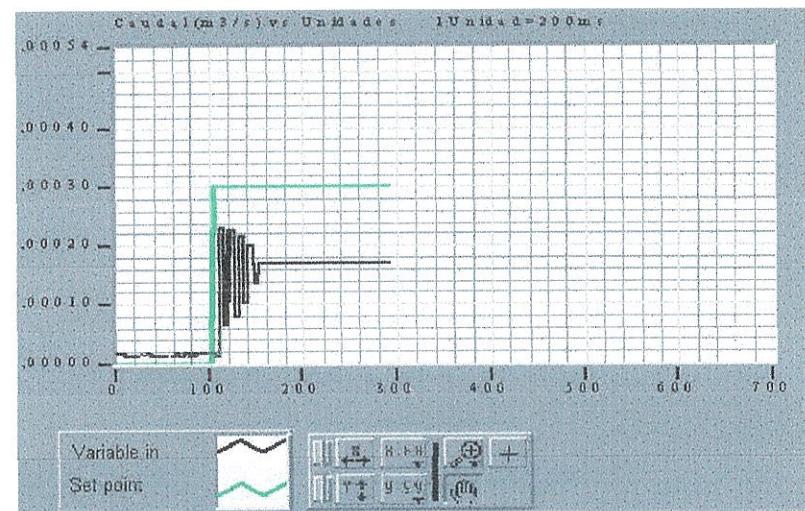


FIGURA 5.23. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.3$

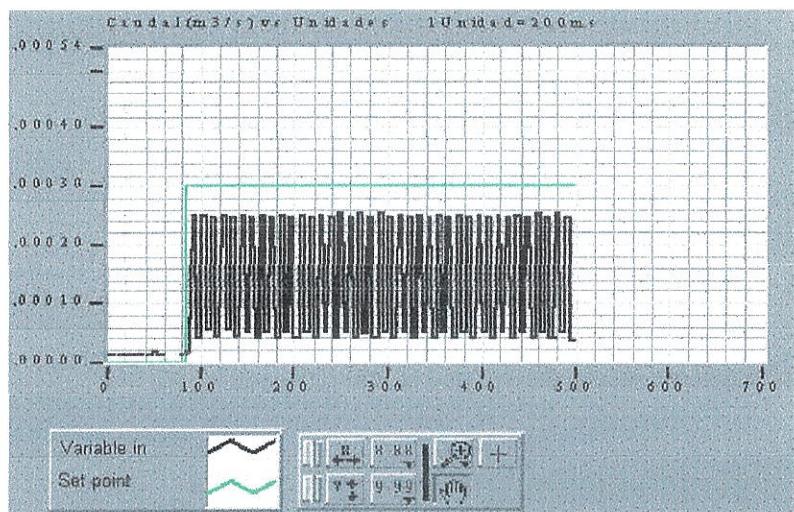


FIGURA 5.24. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.4$

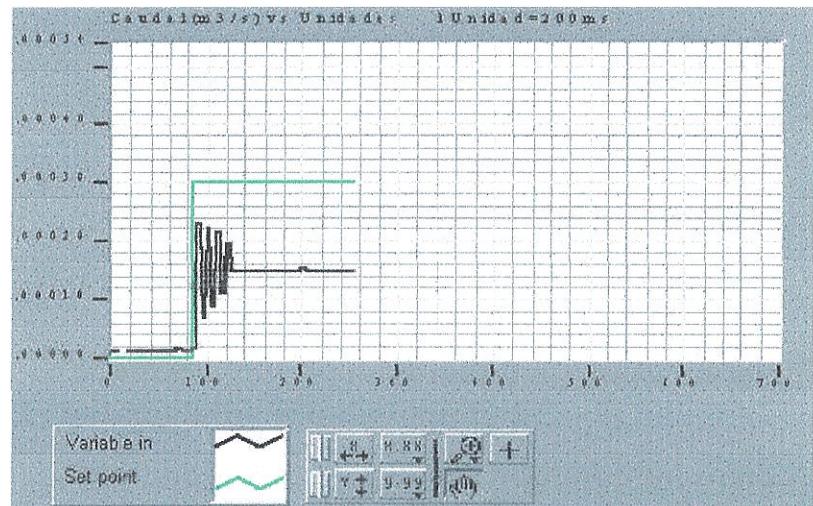


FIGURA 5.25. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.31$

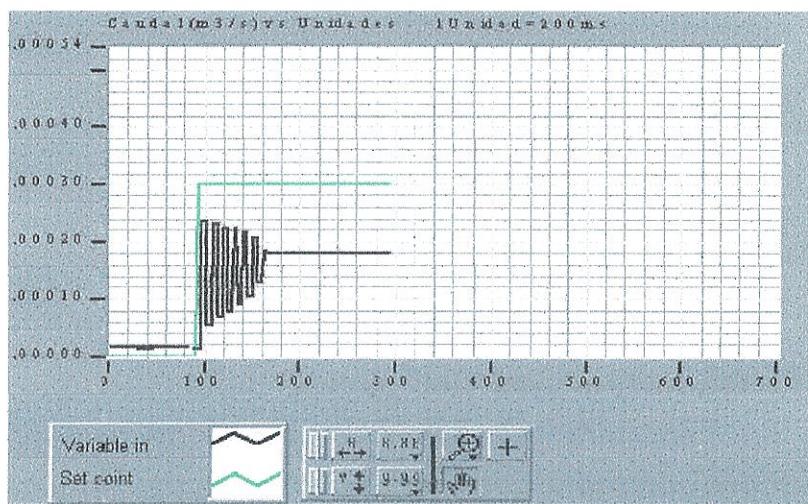


FIGURA 5.26. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.33$

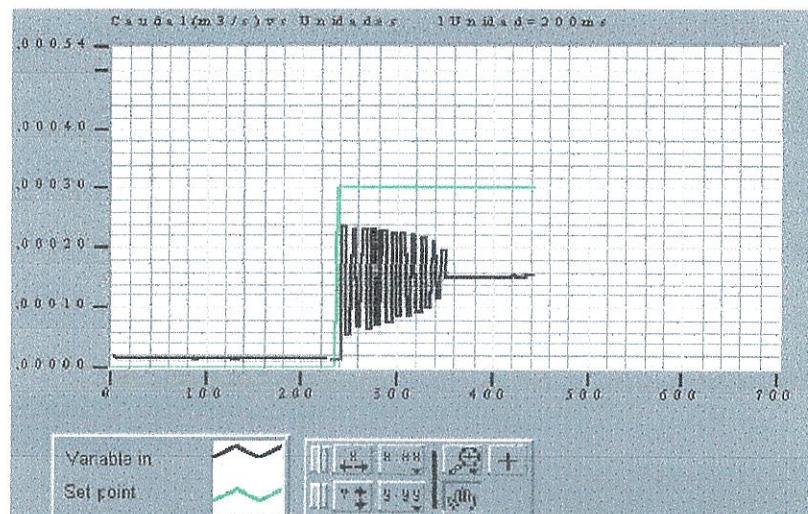


FIGURA 5.27. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.34$

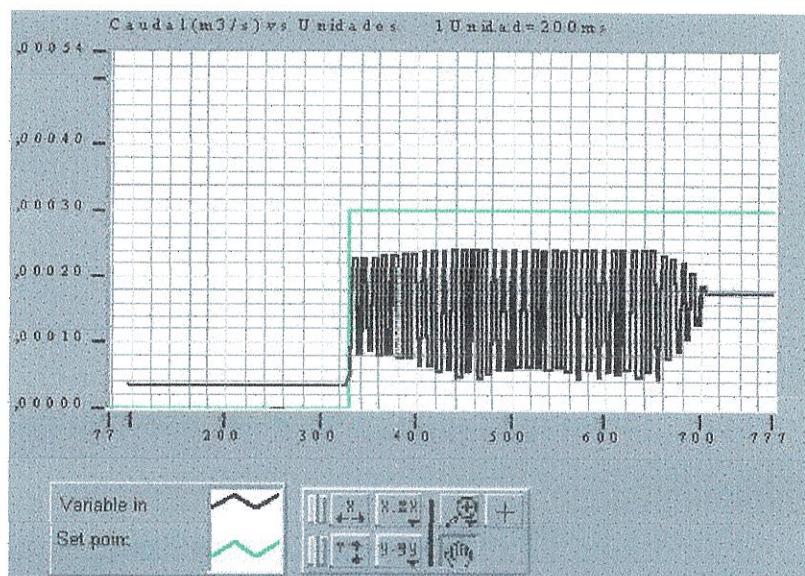


FIGURA 5.28. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.35$

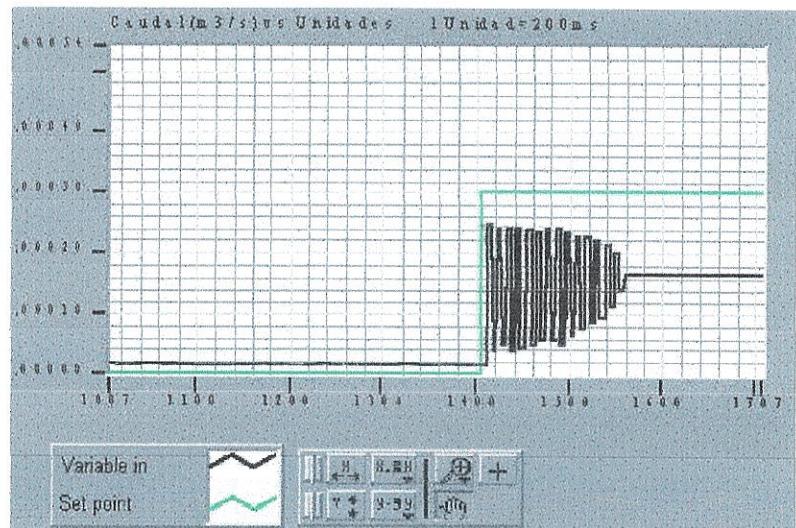


FIGURA 5.29. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_C = 1.37$

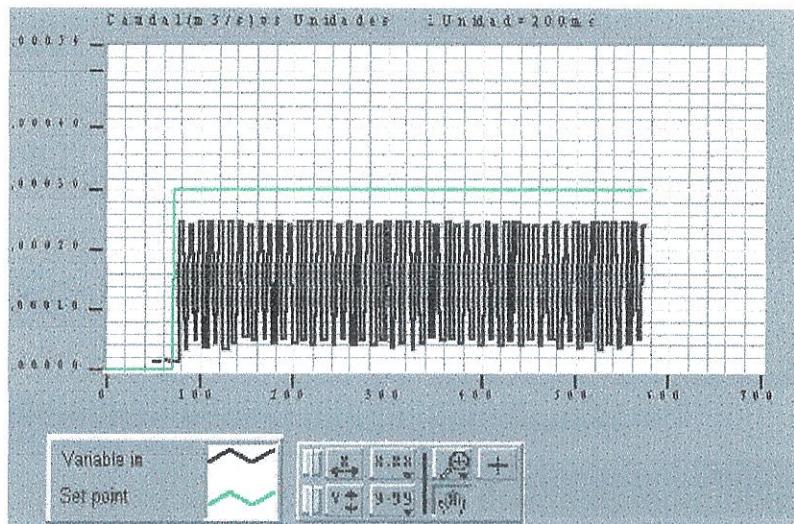


FIGURA 5.30. GRÁFICA DE REPUESTA DEL SISTEMA A UN SALTO ESCALÓN DE  $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$  A  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , CON  $K_c = 1.38$

De la Figura 5.30 se obtiene  $K_{cu} = 1.38$  y manipulando las herramientas de zoom se logra un acercamiento a la gráfica de la figura 5.30 para la obtención el periodo último, este se consigue cuantificando la cantidad de unidades de separación entre dos crestas de la curva, y con el factor de conversión a tiempo de  $200\text{ms/unidad}$ , se puede calcular  $T_u$ .

Para este caso es de 11 unidades de separación, por consiguiente  $T_u = 2.2 \text{ seg.}$

$$\text{Banda proporcional última (BPu)} \frac{100}{K_{cu}} = 72,46\%$$



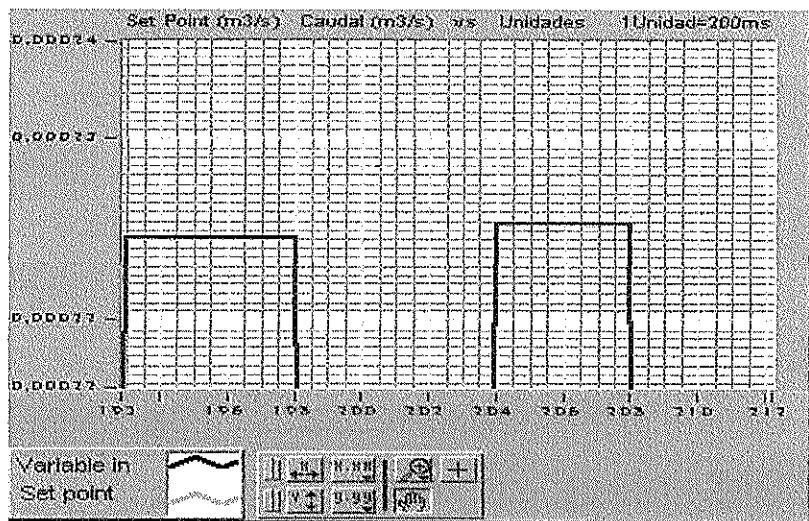


FIGURA 5.31. GRÁFICA DE ACERCAMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL PERÍODO ÚLTIMO  $T_u$

De las prácticas realizadas al sistema se determina que el mejor tipo de controlador para este sistema es el proporcional integral PI, dando mejores resultados que un controlador PID, debido a que es un sistema de respuesta rápida. La constante derivativa se mantiene en cero en el programa cancelando su acción.

Mediante la tabla 22 para ajuste de controlador PI con asentamiento de un cuarto se tabula los valores de ganancia proporcional  $K_c$  y tiempo de integración  $\tau_i$ .

Con  $K_{cu} = 1.38$  y  $T_u = 2.2$  seg

<i>Tipo de controlador</i>	<i>P</i>	<i>Ganancia proporcional</i>	<i>Tiempo de integración</i>	<i>Tiempo de derivación</i>
		$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
Proporcional	P	$K_{cu}/2$	—	—
Proporcional-integral	PI	$K_{cu}/2.2$	$T_u/1.2$	—
Proporcional-integral-derivativo	PID	$K_{cu}/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$

TABLA 22: FORMULAS PARA AJUSTE DE RAZÓN DE ASENTAMIENTO DE UN CUARTO

$$K_c = K_{cu}/2.2 = 0.6272 \text{ %/%}$$

$$\tau_I = T_u/1.2 = 1.833 \text{ seg}$$

Finalmente para cargar estos valores en el programa se requiere convertirlos en las constantes proporcional **P** e integral **I**.

$$\mathbf{P} \text{ (constante proporcional)} = k_c = 0.6272 \text{ %/%}$$

$$\mathbf{I} \text{ (constante de integración)} = \frac{k_c}{\tau_I} = \frac{0.6272 \text{ %/%}}{1.833 \text{ seg}} = 0.34217/\text{seg}$$

Con el valor de las constantes calculadas para un controlador PI en base a la práctica, y cargadas en las casillas correspondientes del programa se puede apreciar el funcionamiento del sistema de control para el lazo de caudal, al variar el punto de control, o al introducir perturbaciones al proceso como obstrucciones de la tubería el controlador responde, reajustando la salida para alcanzar al punto de control tratando de controlar al proceso

Figura 5.32, muestra una prueba del sistema de control de caudal.

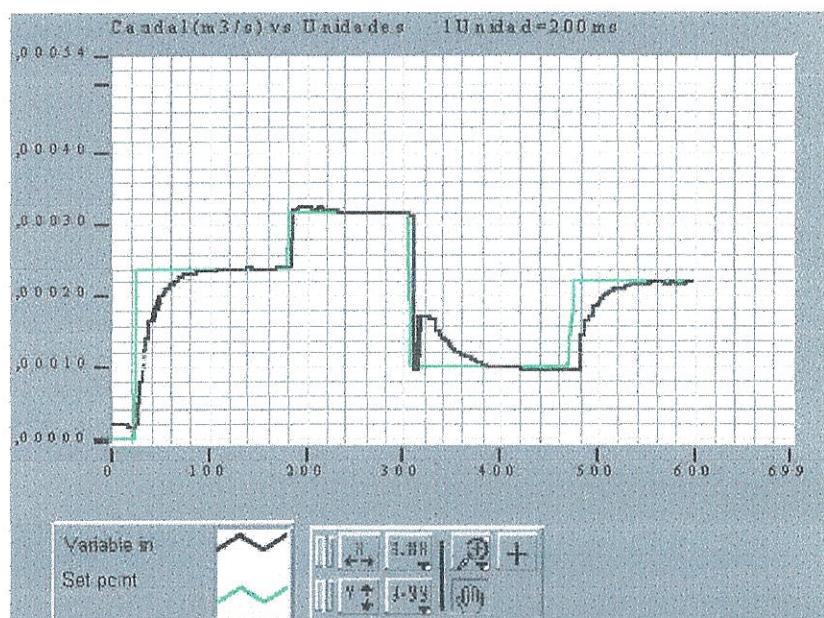


FIGURA 5.32. GRÁFICA DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA A VARIACIONES EN EL PUNTO DE CONTROL

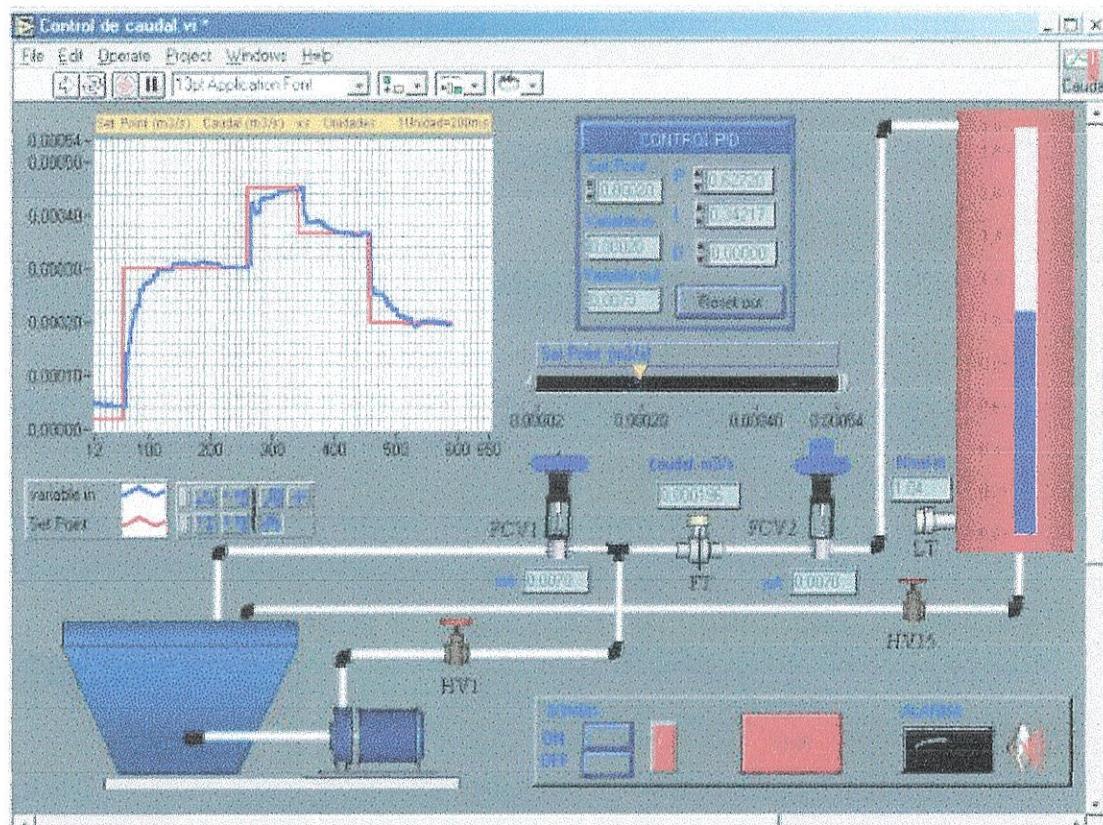


FIGURA 5.33. GRÁFICA DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA A VARIACIONES EN EL PUNTO DE CONTROL

La Figura 5.33 muestra al proceso controlado y se pueden apreciar los valores de las constantes de calibración PID, que se lograron obtener a través del método de ajuste de controlador de respuesta a la frecuencia o ganancia última.

### **5.3. Práctica de ajuste de controlador por el método de la curva de Reacción**

#### **Planta de procesos lazo de nivel**

##### **Introducción**

El lazo de nivel de la planta de procesos industriales fue diseñado para la presente práctica de ajuste de controladores. La función del lazo es mantener el nivel del tanque de proceso lo más cercano al punto de control, sin importar las perturbaciones a las cuales el sistema sea sometido.

La precisión de la respuesta del sistema a los cambios del mismo depende de la calibración del controlador.

La planta de procesos industriales fue automatizada por un programa de computadora creado bajo el software Lab VIEW de National Instruments. Este programa gráfico contiene el controlador proporcional integral derivativo. El control opera de modo numérico, la ventaja de este sistema contra los controladores neumáticos son amplias, principalmente en la facilidad y permanencia de la calibración.

### 5.3.1. Objetivos

Dar a conocer a los estudiantes algunos métodos empíricos por los cuales pueden se pueden determinar los valores de las constantes de calibración banda proporcional, tiempo integral y derivativo, (PID), para controladores

### 5.3.2. Teoría

La función del controlador es, basándose en el error entre el punto de control y la respuesta del sistema, corregir la variable controlada de tal modo que compense el error y la respuesta del sistema se aproxime al valor deseado.

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (5-15)$$

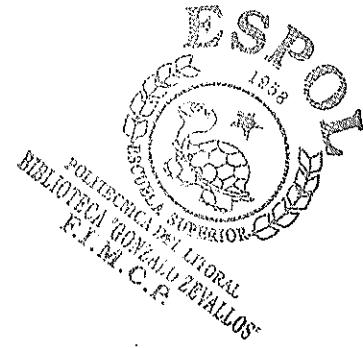
$$m(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int e(t) dt + k_c \tau_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (5-16)$$

$m(t)$  = Salida del controlador mA

$r(t)$  = Punto de control set point mA

$c(t)$  = Variable que se controla mA, señal que llega del transmisor.

$K_c$  = Ganancia del controlador mA/mA , %/%%.



$\tau_i$  = Tiempo de integración.

$\tau_d$  = Tiempo de derivación.

La ecuación 5-16 es el algoritmo matemático que rige el comportamiento del controlador, esta ecuación muestra la relación entre la salida del controlador  $m(t)$  y el error  $e(t)$ , generado por la diferencia entre el punto de control y la variable del proceso con respecto al tiempo.

La ecuación 5-16 es el algoritmo matemático típico para un controlador Proporcional Integral Diferencial (PID), con la suma de estas tres componentes se consigue una respuesta del sistema al controlador, la respuesta depende del ajuste de las constantes del controlador

$k_c$  P constante proporcional

$\frac{k_c}{\tau_i}$  I constante de integración

$k_c \tau_d$  D constante derivativa

Los métodos de ajuste son destinados a determinar estas constantes de la ecuación.

Existen varios métodos empíricos de calibración de controladores, no todos los método pueden ser validos para cada caso, debiendo el ingeniero de control buscar el que mejor se adapte a la personalidad del sistema. Para este sistema basándose en experimentación se determinó que el mejor método de calibración es el de la curva de reacción.

#### **Método de la curva de reacción:**

Este método, también se conoce como prueba de salto escalón, para realizar la prueba es necesario desconectar la acción del controlador, o dicho de otro modo la prueba se realiza en lazo abierto.

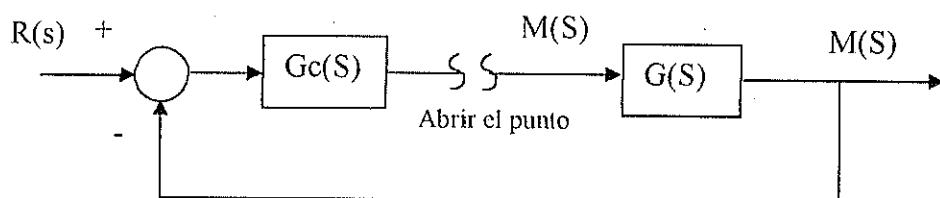


FIGURA 5.34. CIRCUITO DE CONTROL LAZO ABIERTO

Este método se basa en el análisis de la curva, con la que el sistema reacciona a un salto escalón en la salida del controlador. El método se origina con la aproximación del sistema a controlar

con un sistema de primer orden más tiempo muerto, sometido a un salto escalón. Para un cambio escalón de magnitud  $\Delta m$  en la salida del controlador y un modelo POMTM, se tiene

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \cdot \frac{\Delta m}{s} \quad (5-17)$$

El análisis de la curva de reacción, nos permite determinar, parámetros con los cuales se puede tabular las constantes de calibración de controlador para asentamiento de un cuarto. Estos parámetros son:  $K$  ganancia de estado estacionario,  $t_0$  tiempo muerto,  $\tau$  la constante de tiempo del sistema.

### 5.3.3. Procedimiento

1. Encienda el módulo de acuerdo al procedimiento.
2. Coloque el controlador de automático a manual, a través del botón del panel de control del programa Figura 5.35, con lo cual se desconecta la acción del controlador, y el sistema queda en lazo abierto.



FIGURA 5.35. BOTON AUTOMATICO A MANUAL



3. Con el nivel más bajo del tanque y en estado estable, se realiza un salto escalón de 4 mA a 7.5 mA, a la salida del controlador  $m(t)$  estos valores se cargan en el casillero alado derecho del botón de automático o manual.

4. La respuesta de la señal de salida del transmisor  $c(t)$ , como la salida del controlador  $m(t)$ , se registran en las dos gráficas de la pantalla principal de procesos. De estas dos gráficas se obtiene el parámetro  $K$ :

$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta m}$$

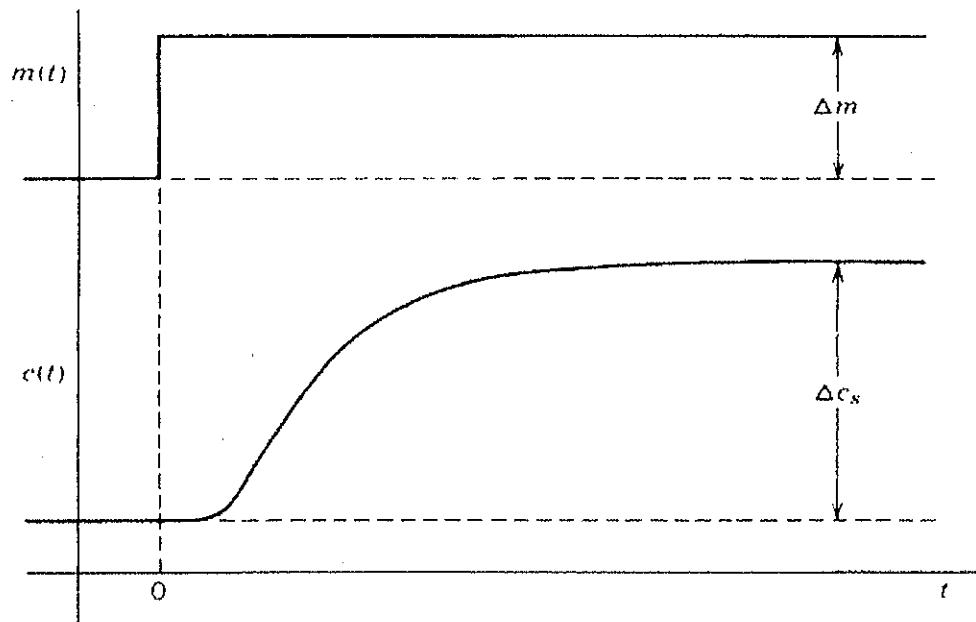


FIGURA 5.36. RESPUESTA DE UN SISTEMA A UN SALTO ESCALON

5. Las constantes de tiempo muerto  $t_0$ , de tiempo  $\tau$  del sistema se obtienen también de la gráfica de  $c(t)$

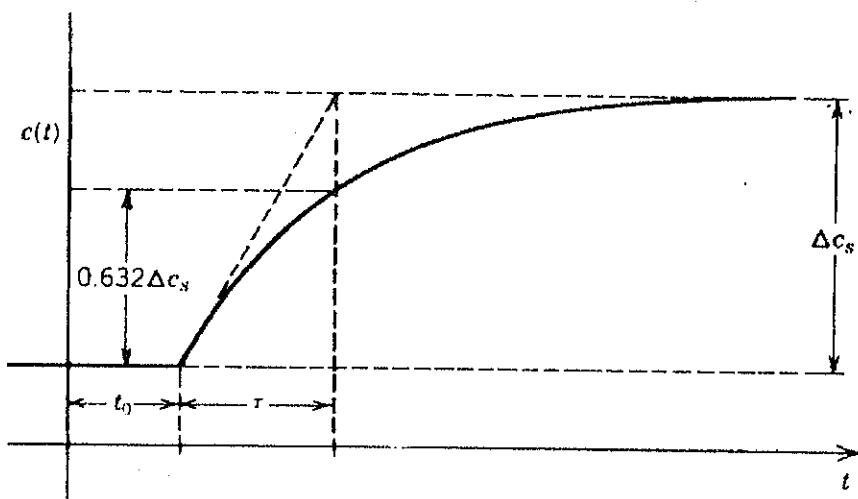
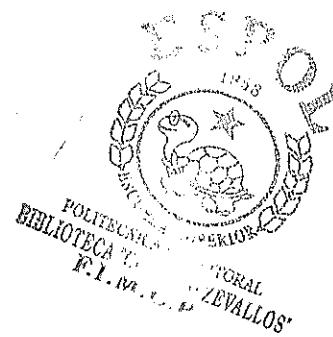


FIGURA 5.37. PARÁMETROS DEL MODELO POMTM EN LA RESPUESTA DE UN SISTEMA A UN SALTO ESCALON

6. Una vez determinados estos tres los parámetros del sistema, calcule las constantes de calibración del controlador PID para asentamiento de un cuarto, en la tabla 23.
7. Ajuste el controlador y pruebe la respuesta del sistema.



### 5.3.4. Cálculos

La práctica empieza cambiando el control del módulo de automático a manual mediante el botón en panel frontal del programa de control, con esto se desconecta la acción del controlador y el sistema solo responde a los valores de salida en amperios para la válvula de control FCV2, cargados en la casilla a la derecha del botón auto/ manual, el operador introduce los valores de salida en el rango de 4-20 mA, un cambio súbito de estos valores genera el salto escalón, de la experimentación se a determinado que el mejor valor para el salto escalón es de una abertura de válvula de 7.5 mA o 0.0075 A.

El salto se produce en el nivel más bajo estable posible, y se genera la gráfica de la curva de reacción Figura 5.38, en el graficador de nivel vs. unidades o tiempo, a demás se requiere de la gráfica de la salida del controlador que en este caso es manual, en donde se aprecia el salto escalón, Figura 5.39.

De estas dos curvas se extraerán los parámetros para el cálculo de las constantes de ajuste de controlador **PID** para respuestas de la razón de asentamiento de un cuarto.

A continuación se presentan las gráficas que se obtuvieron de la respuesta del sistema para un salto escalón de 4 a 7.5 mA en la válvula de control.



FIGURA 5.38. RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL A UN SALTO ESCALON.

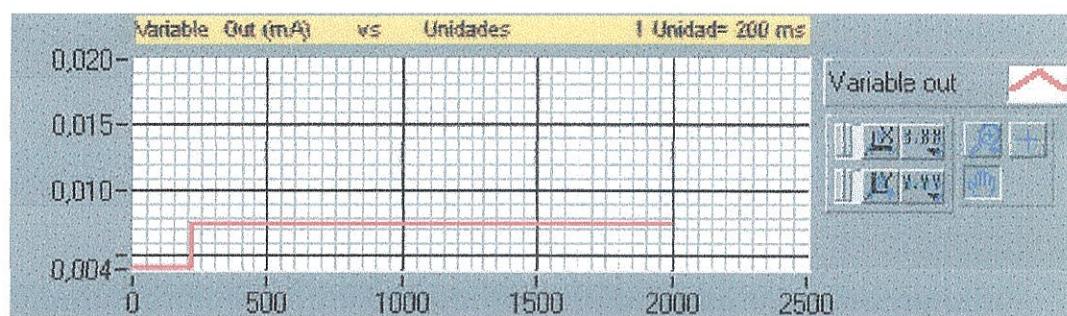


FIGURA 5.39. SALTO ESCALON EN LA APERTURA DE LA VÁLVULA DE CONTROL DE 4 -7.5 mA.

Para la obtención de las constantes de calibración del controlador se requiere primero determinar : K ganancia de estado estacionario,  $t_0$  tiempo muerto,  $\tau$  la constante de tiempo del sistema. Según el método de la curva de reacción se puede determinar estos parámetros de la curva obtenida:

$$K = \frac{\Delta C_s}{\Delta m}$$

La altura en la que el sistema se estabilizo después del salto escalón fue a los 0.175 m de altura dentro del tanque principal, cuya máxima altura es de 1.90 m.

$$\Delta C_s = \frac{(0.175 - 0)m}{1.90m} * 100\% = 9.21\%$$

$$\Delta m = \frac{(7.5 - 4)mA}{(20 - 4)mA} * 100\% = 21.87\%$$

$$K = \frac{\Delta C_s}{\Delta m} = \frac{9.21\%}{21.87\%} = 0.4211 \frac{\%}{\%}$$

La ganancia en estado estacionario del sistema K es de 0.4211%/%, resta calcular,  $t_0$  tiempo muerto,  $\tau$  la constante de tiempo del sistema.

Para el cálculo del tiempo muerto  $t_0$  se analizaran las curvas del sistema, y utilizando las herramientas de manipulación se reajustara la escala para que nos permita conocer el instante mismo del salto escalón y el momento en que el sistema comienza a responder.

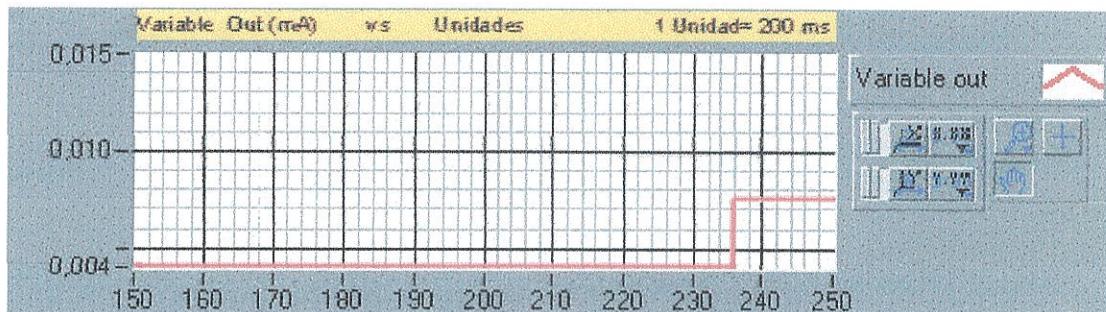


FIGURA 5.40. INSTANTE EN EL QUE SE PRODUCE EL SALTO ESCALON.

De la Figura 5.40 se determina que el salto escalón fue producido en a las 236 unidades, como ambas gráficas parten el mismo instante,  $t_0$  sería la diferencia entre las 236 unidades y el instante en que el sistema empieza a responder, de igual manera utilizando la herramienta de zoom en la paleta manejo de gráficas se puede determinar en que este punto, por simple inspección en la gráfica de la curva de reacción.



Aplicando un zoom sobre la gráfica de nivel vs. unidades se puede aclarar el punto en que el sistema comienza a responder.

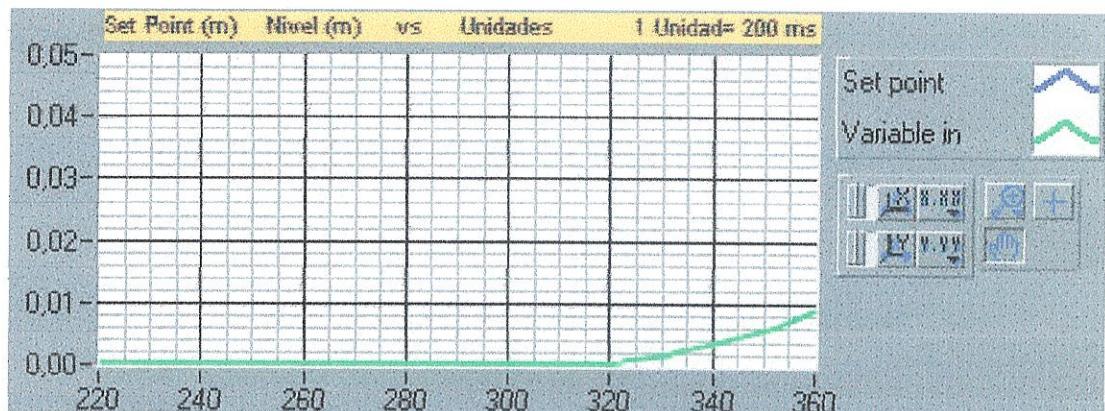


FIGURA 5.41. INSTANTE EN EL QUE SE PRODUCE LA REACCION AL EL SALTO ESCALON EN EL SISTEMA.

Según muestra la gráfica el sistema responde a las 322 unidades.

La diferencia de estos dos instantes es el tiempo muerto  $t_0$ , cada unidad dentro de este programa de control dura 200 mseg.

$$t_0 = (322 - 236) \text{unidades} * 200 \frac{\text{mseg}}{\text{unidad}} * \frac{1\text{seg}}{1000\text{mseg}} = 17.2\text{seg}$$

El tiempo muerto  $t_0$  para este sistema es de 17.2 seg, solo resta calcular la constante de tiempo  $\tau$  del sistema.

Para calcular la constante de tiempo  $\tau$  del sistema según el método de la curva de reacción se lo determina primero el  $0,632\Delta C_s$  sobre la gráfica de la curva de reacción del sistema y la constante de tiempo  $\tau$  es la proyección de este valor sobre el eje de el tiempo o las unidades en este caso.

$$0,632\Delta C_s = 0,632 \cdot 0,175 = 0,1106 \text{ m}$$

Manipulando las herramientas de gráficas se ubica este valor sobre la curva de reacción y se busca el corte con el eje de las unidades.

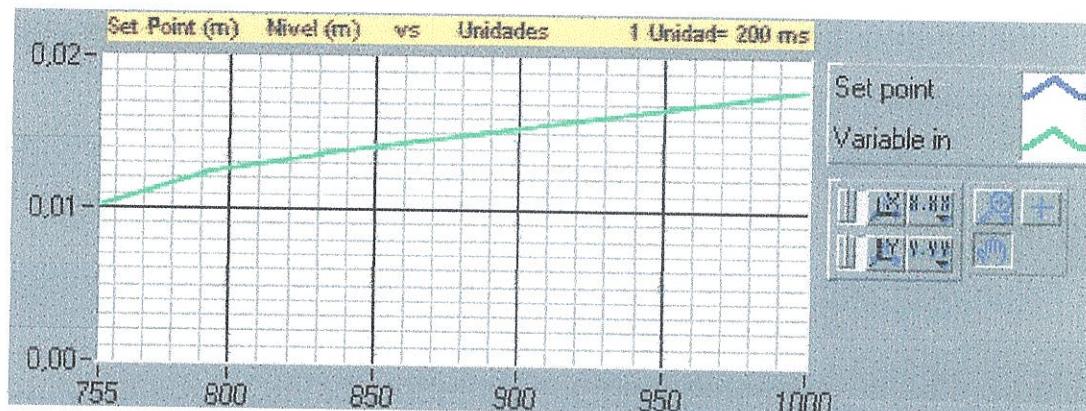


FIGURA 5.42. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO DEL SISTEMA.

De la Figura 5.42 se puede apreciar que para un nivel de 0,1106 m el corte con las unidades es en 755 unidades.



Con este valor podemos calcular la constante de tiempo  $\tau$  del sistema.

$$\tau = (755 - 322) \text{unidades} * \frac{200 \text{mseg}}{\text{lunidad}} * \frac{1 \text{seg}}{1000 \text{mseg}} = 86.6 \text{seg}$$

Una vez determinados estos tres parámetro se puede utilizar la tabla 23 para ajuste de controlador para respuesta de razón de asentamiento de un cuarto.

$$K = 0.4211 \frac{\%}{\%}$$

$$t_0 = 17.2 \text{seg}$$

$$\tau = 86.6 \text{seg}$$

Tipo de controlador	$K_c$	Ganancia proporcional	Tiempo de integración	Tiempo de derivación
		$t_I$	$t_D$	
Proporcional	P	$\frac{1}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
Proporcional-integral	PI	$\frac{0.9}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_0$	-
Proporcional-integral-derivativo	PID	$\frac{1.2}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0 t_0$	$\frac{1}{2} t_0$

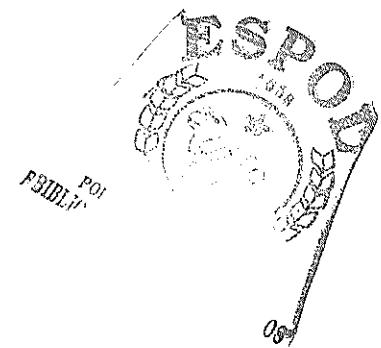
TABLA 23: FORMULAS PARA AJUSTE DE RAZÓN DE ASENTAMIENTO DE UN CUARTO

De las prácticas realizadas al sistema se determina que el mejor tipo de controlador para este sistema es el proporcional integral PI, dando mejores resultados que un controlador PID, debido a que es un sistema de respuesta rápida. La constante derivativa se mantiene en cero en el programa cancelando su acción.

Mediante la tabla 23 para ajuste de controlador PI con asentamiento de un cuarto se tabula los valores de ganancia proporcional  $K_c$  y tiempo de integración  $\tau_i$ .

$$K_c = \frac{0.9}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1} = \frac{0.9}{0.4211} \frac{\%}{\%} \left( \frac{17.2 \text{ seg}}{86.6 \text{ seg}} \right) = 9.47 \frac{\%}{\%}$$

$$\tau_i = 3.33 t_0 = 57.27 \text{ seg}$$



Finalmente para cargar estos valores en el programa se requiere convertirlos en las constantes proporcional P e integral I.

$$P \text{ (constante proporcional)} = K_c = 9.47 \% / \%$$

$$I \text{ (constante de integración)} = \frac{k_c}{\tau_i} = \frac{9.47 \% / \%}{57.27 \text{ seg}} = 0.165 / \text{seg}$$

Con el valor de las constantes calculadas para un controlador PI, en base a la práctica, y cargadas en las casillas correspondientes del programa, se puede apreciar el funcionamiento del sistema de control para el lazo de nivel, al variar el punto de control, o al introducir perturbaciones al proceso como obstrucciones de la tubería el controlador responde, reajustando la salida para alcanzar al punto de control tratando de controlar al proceso.

Figura 5.43, muestra una prueba del sistema de control de nivel.

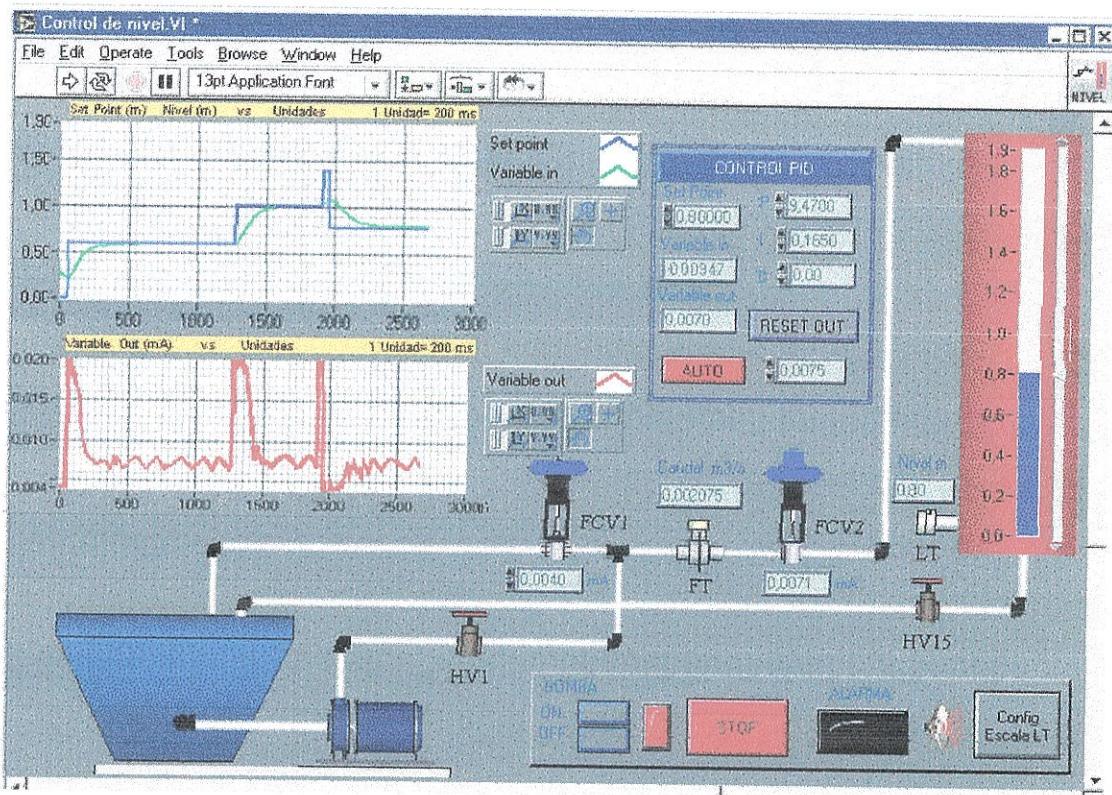


FIGURA 5.43. GRÁFICA DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA A VARIACIONES EN EL PUNTO DE CONTROL



# **CAPITULO 6**

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 Conclusiones y recomendaciones**

#### **Conclusiones**

El proyecto expuesto en esta tesis de grado produjo una solución innovadora y de última tecnología, para el mejoramiento del módulo de control de nivel y caudal de la planta de procesos de la FIMCP, con la implementación de un sistema SCADA, la creación de un controlador digital virtual, y software que se encarga de la tarea controlar y comandar al módulo de control de nivel y caudal, convirtiéndolo en una herramienta valiosa para el estudio de los sistemas de control e instrumentación Industrial.

El uso de tecnología de última generación en el campo de la adquisición de datos y programación, facilitó los estudios y cálculos necesarios para la implementación del sistema de control y se logró reemplazar dispositivos convencionales, demostrando que es posible, mediante software mejorar sistemas tradicionales y alcanzar alta confiabilidad y eficiencia.

El programa de control creado bajo Lab View, para el control del módulo permite un fácil acceso y manejo de las operaciones desde una computadora, se implementaron sistemas auxiliares para el control de encendido de todos los elementos que conforman el sistema, protecciones tanto para el programa como para los equipos, lo que convirtió al módulo en un robusto sistema de adquisición y control.

Los controladores PID virtuales creados para el módulo de control de nivel y caudal, con las mismas características matemáticas expuestas en las teorías de controladores, pero con la facilidad y permanencia de la calibración, que nos permite un software de computadora, nos provee de un satisfactorio control de los procesos del módulo.

El resultado del proyecto es un equipo dotado de las últimas tecnologías capas de ser utilizado como una herramienta de estudio y



experimentación en el campo de la automatización e instrumentación industrial. La aplicación de este tipo de tecnológicas es amplia en la industria y debería ser más desarrollada en nuestro medio.

### **Recomendaciones**

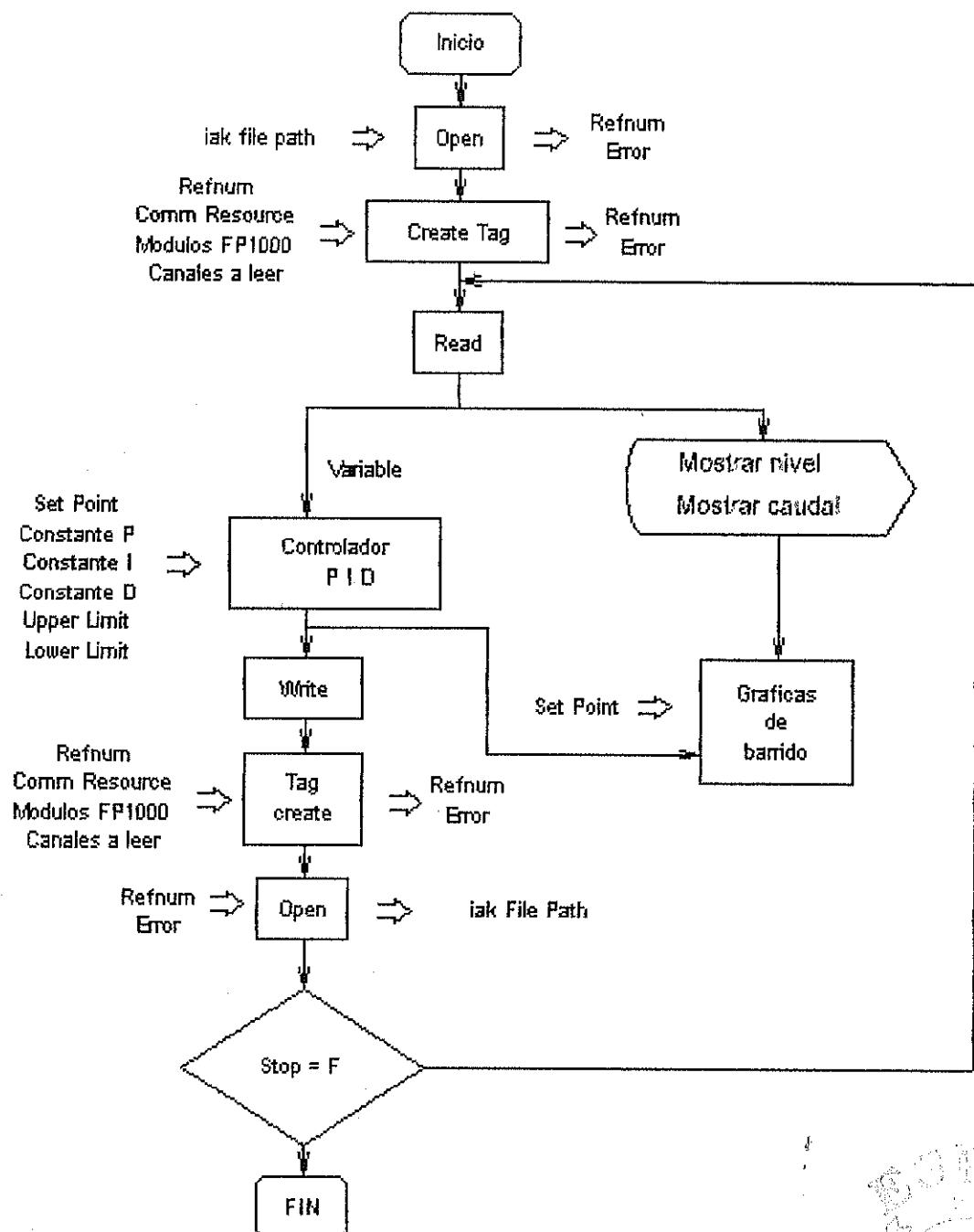
En base a los resultados obtenidos en este proyecto se podría pensar la posibilidad de aplicar este tipo de tecnologías en otros equipos y sistemas de los laboratorios de la FIMCP. Incluso es posible seguir desarrollando aplicaciones para el módulo de nivel y caudal, como enlazarlo a la red informática de la facultad lo que permitiría controlar el módulo desde un salón de clase por ejemplo.

La planta de procesos no solo ofrece la posibilidad de ejecutar prácticas de calibración de controladores sino de una gama de instrumentos que se encuentran operando en el módulo, lo que podría ser aprovechado por los estudiantes de instrumentación industrial.

## **APÉNDICES**

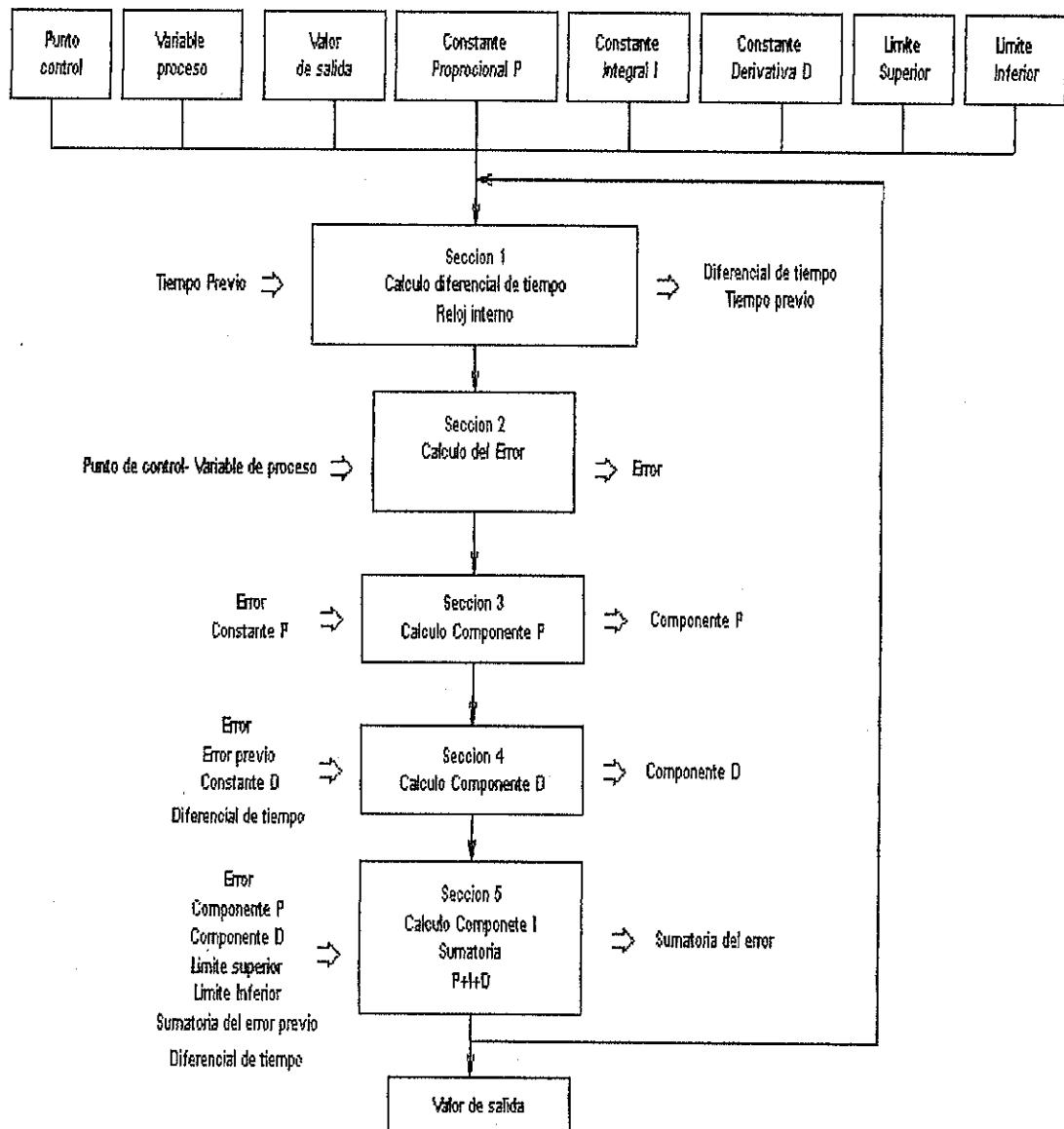
## APENDICE A

### DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL

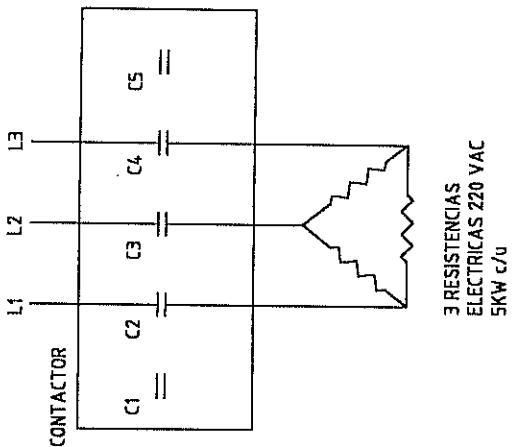
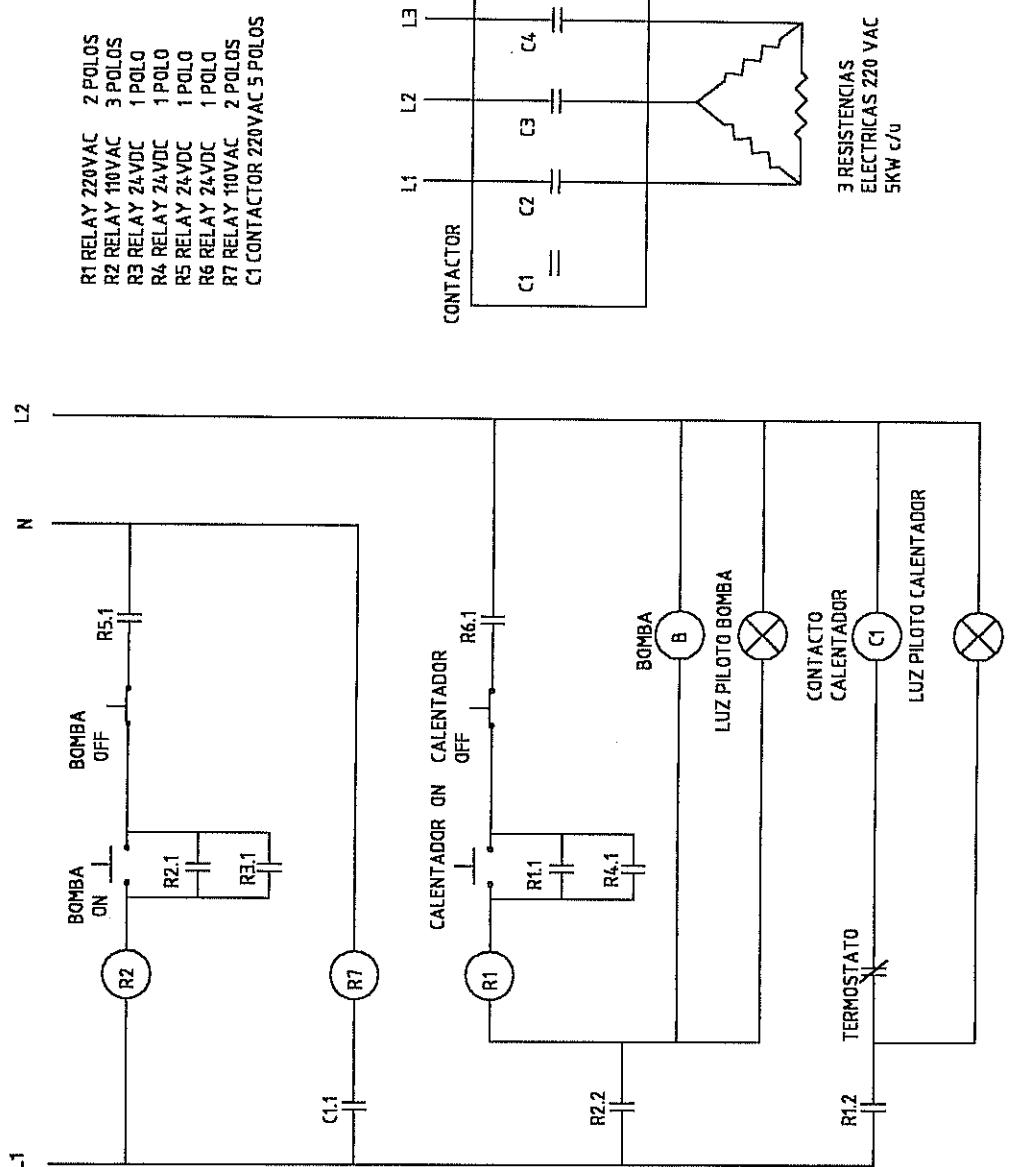


## APÉNDICE B

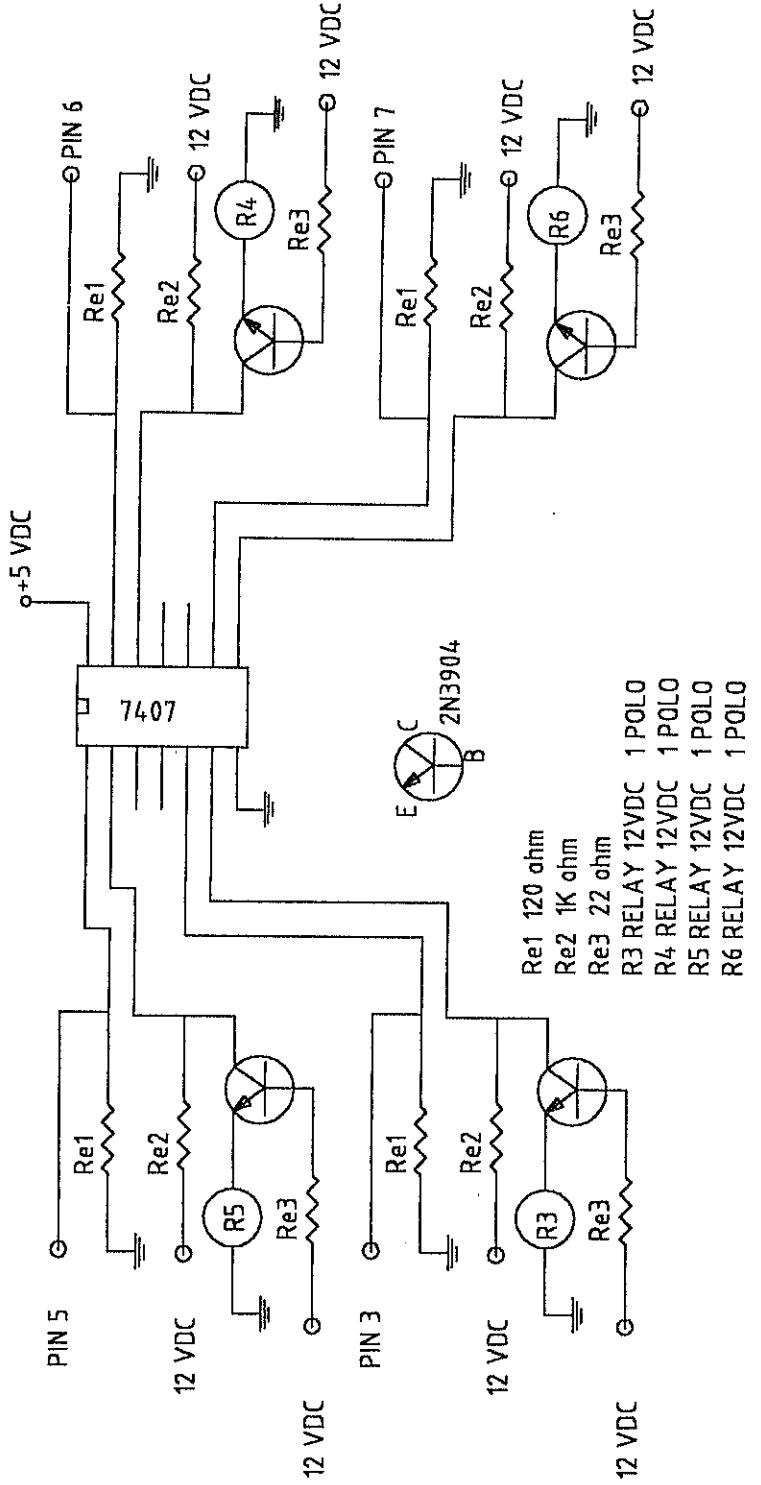
### DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROLADOR PID



# **PLANOS**

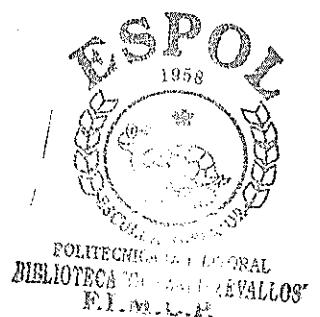
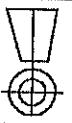


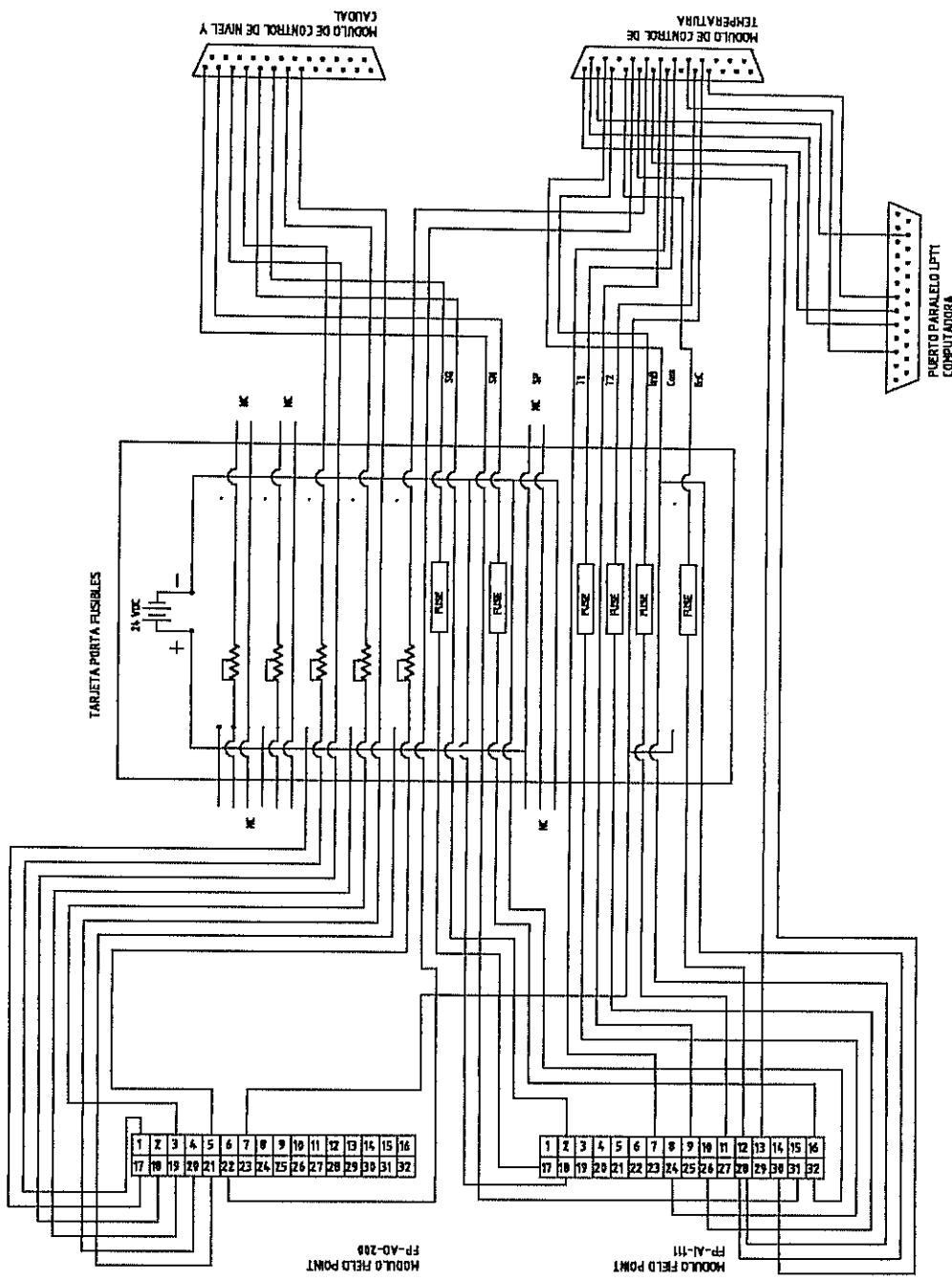
OBRA: MÓDULO DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL				ESCALA CIRCUITO UNIFILAR DE ACTIVACIÓN DE BOMBA YCALENTADOR	PLANO N°: 1/3	MATERIAL:
Edi.	Modific.	Fecha	Nombre	Dib.	Fecha	Nombre
				25/2/2004		Jaime Ríos
				Rev.		
				Apro.		
<b>ESPOL</b>						



## MÓDULO DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL

OBRA: MÓDULO DE CONTROL DE NIVEL Y CAUDAL			
CONTIENE:	ESCALA		
CIRCUITO DE ACTIVACIÓN DE BOMBA Y CALIENTADOR POR PUERTO LPT1			
PLANO No: 2/3			
ESPOL			
Edi.	Modific.	Fecha	Nom bre





OBRAS: MÓDULO DE CONTROL DE  
NIVEL Y CAUDAL

ESCALA

CONTIENE:

DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LA  
INTERFASE FIELD POINT

PLANO N°: 3/3

MATERIAL:

**ESPOL**

Edi. Modific. Fecha Nombre



## Bibliografía

1. SMITH CORRIPIO, Control automático de procesos teoría y práctica,  
Editorial Limaza 1997.
2. OGATA, PRENTICE HALL, Ingeniería de control moderna.
3. ING. SIMONETTA JOSE, Servomecanismos, Editorial H.A.S.A 1981.
4. NATIONAL INSTRUMENTS, Measurement and Automation  
Catalogue, 2002.
5. FIELD POINT, User Manual, National Instruments Corporation, 1999.
6. LAB VIEW 5, User Manual, National Instruments Corporation, 1999.
7. Pico Luis, "Simulador de Control para Proceso de  
Temperatura", (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la  
Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral 2001)

8. Bonifaz Celia, "Desarrollo de un Sistema de Adicción de Datos para la Maquina Universal de Ensayos del Laboratorio de Sólidos de la FIMCP", (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral 2002)
9. <http://www.ni.com>, National Instruments, pagina web.
10. <http://zone.ni.com/devzone/labviewzone.nsf/OpenPage?openagent&lvsection=labviewzone>, Soporte de Lab View, National Instruments, pagina web.

