



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TFG Nº: **770G01A45**

TÍTULO: **Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios**

AUTOR: **LÓPEZ VARELA, ÁLVARO**

TUTORES: **MEIZOSO LÓPEZ, MARÍA DEL CARMEN**
SUÁREZ PEÑARANDA, VICENTE

FECHA: **SEPTIEMBRE DE 2014**

Fdo.: EL AUTOR

Fdo.: LOS TUTORES

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO: Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios

ÍNDICE GENERAL

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2014

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ÁLVARO LÓPEZ VARELA

I	ÍNDICE GENERAL	3
	Índice de figuras	11
	Índice de tablas	15
II	MEMORIA	17
	Índice del documento Memoria	21
1	Objeto	23
2	Alcance	25
3	Antecedentes	27
	3.1 Control	29
	3.1.1 Control discreto	30
	3.1.2 Tipos de control	30
4	Normas y referencias	35
	4.1 Bibliografía	35
	4.2 Programas de cálculo	35
	4.3 Otras referencias	36
5	Definiciones y abreviaturas	37
6	Requisitos de diseño	39
7	Análisis de las soluciones	41
	7.1 Descripción de la planta	41
	7.1.1 Planta	42
	7.1.2 Sensores	43
	7.1.3 Actuadores	48
	7.1.4 Panel de mando	53
	7.1.5 Cuadro de Control y Distribución	55

8	Resultados finales	67
8.1	Puesta en marcha	67
8.1.1	Valoración inicial de la planta e identificación de fallos	67
8.1.2	Cambios en la planta	69
8.1.3	Programa de test	72
8.2	Gestión de etapas	82
8.2.1	Gestión de seguridad	84
8.2.2	Gestión de mando	88
8.2.3	Gestión de funcionamiento	89
8.3	Control de nivel mediante PID simple	92
8.3.1	Programación del PID	92
8.3.2	Obtención de parámetros	93
8.3.3	Resultados	95
8.4	Control de nivel mediante PID adaptativo	97
8.4.1	Método RLS	98
8.4.2	Autoajuste del PID	100
8.4.3	PID	102
8.4.4	Regulador	104
8.4.5	Pantalla de explotación	106
8.5	SCADA	107
8.5.1	Conexión con la planta	107
8.5.2	Usuarios	109
8.5.3	Funciones	110
III	ANEXOS	125
	Índice del documento Anexos	129
9	Documentación de partida	131
9.1	Propuesta inicial de asignación del TFG	131
9.2	Datos de partida	134
9.2.1	Lista de variables inicial	134
9.2.2	Programa disponible como datos iniciales	139
10	Cálculos	145
10.1	Obtención de parámetros de escalado de nivel	145
10.2	Obtención de parámetros del PID SIMPLE	146
10.3	Autoajuste	147
10.3.1	1 polo	147

10.3.2 2 polos	149
10.4 Cálculo de potencia	150
11 Programación	151
11.1 Lista de variables	151
11.2 Bloques de función derivados	162
11.2.1 Desescalado	162
11.2.2 Escalado	163
11.2.3 VÁLVULA	164
11.2.4 PID SIMPLE	165
11.2.5 REGULADOR	167
11.2.6 RLS 1 POLO	169
11.2.7 RLS 2 POLOS	174
11.2.8 AUTO 1 POLO	181
11.2.9 AUTO 2 POLOS	183
11.3 Secciones	185
11.3.1 SEGURIDAD	185
11.3.2 MANDO	187
11.3.3 FUNCIONAMIENTO	188
11.3.4 ENTRADAS_ANALOG	194
11.3.5 CONTROLES	197
11.3.6 PID	200
11.3.7 ACCIONES	203
11.3.8 SCADA	208
12 Páginas del SCADA	211
IV PLANOS	219
Índice de los Planos	223
Esquema de potencia	225
Esquema de control	227
Salidas digitales	229
Entradas digitales	231
Esquema de control 2	233
Entradas analógicas	235
Salidas analógicas	237

V	PLIEGO DE CONDICIONES	239
13	Condiciones de funcionamiento	245
13.1	Colocación de la planta	245
13.2	Líquidos de la planta	245
13.3	Presión ambiental	245
13.4	Temperatura ambiente	246
13.5	Humedad y proyecciones de líquidos	246
13.6	Polvo	246
13.7	Alimentación	246
13.8	Comunicación con PC	246
VI	PRESUPUESTO	247

Índice de figuras

3.0.0.1	Planta	27
3.1.0.2	Sistema controlado con realimentación	29
3.1.2.1	Variación de la posición de los polos con el tiempo de muestreo	31
3.1.2.2	PID estándar	33
7.1.0.1	Esquema de la planta de Controles Varios	41
7.1.2.1	Detector de nivel	43
7.1.2.2	Sensor de temperatura	44
7.1.2.3	Caudalímetro Sitrans F M de Siemens	45
7.1.2.4	Sensor de presión	46
7.1.2.5	Sensor de nivel	46
7.1.3.1	Bomba centrífuga de Saci	49
7.1.3.2	Bomba de circulación Saci VA 35/130	50
7.1.4.1	Panel de mando	53
7.1.5.1	Procesador TSX P57 104M	55
7.1.5.2	Módulo TSX ETY 5103	56
7.1.5.3	Módulo TSXDEY16FK	57
7.1.5.4	Módulo TSXDSY08T22	57
7.1.5.5	Módulo TSXAEY810	58
7.1.5.6	Módulo TSXASY800	58
7.1.5.7	Características de los relés	59
7.1.5.8	Características de los contactores	59
7.1.5.9	Características de los relés	60
7.1.5.10	Variador de frecuencia ATV 31HU11M2A de Telemecanique	61
7.1.5.11	Características del variador ATV 31HU11M2A de Telemecanique	61
7.1.5.12	Base Telefast ABE-7CPA31	63
7.1.5.13	Base Telefast ABE-7CPA02	63
8.1.1.1	Entrada analógica	69
8.1.2.1	Configuración del tiempo de aceleración	70
8.1.2.2	Configuración del tiempo de deceleración	70

8.1.2.3	Configuración de entrada desde el PLC	71
8.1.3.1	Escalado de presión	72
8.1.3.2	Escalado de nivel	73
8.1.3.3	Bloque de función de escalado de entradas analógicas	73
8.1.3.4	Escalado de temperatura	74
8.1.3.5	Escalado de caudal	75
8.1.3.6	Activación del variador	75
8.1.3.7	Bloque de función de desescalado	76
8.1.3.8	Control de consigna del variador	76
8.1.3.9	Bloque de función válvula	77
8.1.3.10	Control de posición de válvula	77
8.1.3.11	Activación de la electroválvula	77
8.1.3.12	Activación del calentador	78
8.1.3.13	Activación de la bomba circuladora	78
8.1.3.14	Control de niveles	79
8.1.3.15	Control de térmicos	79
8.1.3.16	Control de confirmación de contactor de la bomba centrífuga	80
8.1.3.17	Control de confirmación de contactor del calentador	80
8.1.3.18	Control de confirmación de contactor de la bomba circuladora	81
8.1.3.19	Control de comunicación	81
8.2.0.20	Guía GEMMA	83
8.2.0.21	Procesos de la guía GEMMA	84
8.2.1.1	Flujograma de la sección de seguridad	85
8.2.1.2	Configuración de los estados en una situación de fallo	86
8.2.1.3	Flujograma de salida de situación de fallo o de emergencia	87
8.2.2.1	Flujograma de salida de recalibración de nivel	89
8.2.3.1	Flujograma de funcionamiento automático	90
8.3.1.1	Bloque de función de PID simple	93
8.3.2.1	Obtención de parámetros de PID	94
8.3.3.1	Control PID simple calculado mediante Ziegler y Nichols	95
8.3.3.2	Control PID simple calculado mediante Åmström y Hägglund	95
8.3.3.3	Control PID simple con parámetros optimizados y activación de la electroválvula	96
8.3.3.4	Control PID simple con parámetros optimizados con cambio de consigna	96
8.4.0.5	Esquema de PID adaptativo	97
8.4.1.1	Bloque de función de identificación RLS	100
8.4.2.1	Bloque de función de autoajuste del PID	101

8.4.3.1	Control PID avanzado con RLS de 1 polo sin modificar	102
8.4.3.2	Control PID avanzado con RLS de 1 polo y $K_M=0.45$	103
8.4.3.3	Control PID avanzado con RLS de 2 polos y $K_M=0.45$	103
8.4.4.1	Control mediante regulador 1 polo con $K_M=0.8$	104
8.4.4.2	Control mediante regulador 1 polo con $K_M=0.45$ y activación de la electroválvula	105
8.4.5.1	Pantalla de explotación	106
8.5.1.1	Configuración de dispositivo de entradas externo	108
8.5.1.2	Elección del PLC y la comunicación	108
8.5.1.3	Configuración de direcciones	108
8.5.1.4	Importación de variables	109
8.5.2.1	Registro de usuario	109
8.5.3.1	Página de inicio de SCADA <i>CONFIG</i>	110
8.5.3.2	Página de SCADA <i>MANUAL</i>	112
8.5.3.3	Página de SCADA <i>MANUAL</i> con elementos actuados	112
8.5.3.4	Página de SCADA <i>PID SIMPLE</i>	113
8.5.3.5	Página de SCADA <i>TREND</i> para visualizar tendencias	115
8.5.3.6	Página de SCADA <i>RLS PID</i>	118
8.5.3.7	Página de SCADA <i>CAMBIO DE NIVEL</i>	119
8.5.3.8	Página de SCADA <i>PLANTA EN FALLO</i>	120
8.5.3.9	Página de SCADA <i>PLANTA EN FALLO</i> lista para rearme	121
8.5.3.10	Alarmas a pie de página	123
9.2.2.1	Sección <i>Arranque Bomba</i>	139
9.2.2.2	Sección <i>Control_Desbordamiento</i>	140
9.2.2.3	Sección <i>Apertura_Valvulas</i>	140
9.2.2.4	Sección <i>Apertura_Valvulas</i>	141
9.2.2.5	Sección del bloque <i>Escala_Convers_Entrada_Analog</i>	142
9.2.2.6	Sección del bloque <i>Escala_Convers_Entrada_Analog</i>	143
10.4.0.1	Cálculo de potencias	150
11.2.1.1	Sección del bloque <i>Escala_Convers_Entrada_Analog</i>	162
11.2.2.1	Sección del bloque <i>Escala_Convers_Entrada_Analog</i>	163
11.3.1.1	Sección de <i>SEGURIDAD</i>	185
11.3.1.2	Transición <i>ERRORES</i> de la sección <i>SEGURIDAD</i>	185
11.3.1.3	Transición <i>NOT ERRORES</i> de la sección <i>SEGURIDAD</i>	186
11.3.2.1	Sección de <i>MANDO</i>	187
11.3.2.2	Transición <i>MANUAL</i> de la sección <i>MANDO</i>	187

11.3.2.3	Transición <i>AUTO</i> de la sección <i>MANDO</i>	187
11.3.2.4	Transición <i>ON AND CAMBIO LIQ</i> de la sección <i>MANDO</i>	187
11.3.2.5	Transición <i>NOT ON OFF OR NOT AUTO MAN</i> de la sección <i>MANDO</i>	188
11.3.2.6	Transición <i>FIN CAMBIO OR NOT ON</i> de la sección <i>MANDO</i>	188
11.3.3.1	Sección de <i>FUNCIONAMIENTO</i>	189
11.3.3.2	Transición <i>C INICIALES</i> de la sección <i>FUNCIONAMIENTO</i>	191
11.3.3.3	Transición <i>T 30s</i> de la sección <i>FUNCIONAMIENTO</i>	191
11.3.3.4	Transición <i>CAMBIO LIQ AND INICIAR</i> de la sección <i>FUNCIONA-</i> <i>MIENTO</i>	191
11.3.3.5	Transición <i>C INI AND MARCHA</i> de la sección <i>FUNCIONAMIENTO</i>	191
11.3.3.6	Transición <i>C INI AND MARCHA2</i> de la sección <i>FUNCIONAMIENTO</i>	191
11.3.3.7	Transición <i>A6 AND REARME</i> de la sección <i>FUNCIONAMIENTO</i> . .	192
11.3.3.8	Transición <i>A6 AND REARME2</i> de la sección <i>FUNCIONAMIENTO</i> .	192
11.3.3.9	Transición <i>FV21 CERRADA</i> de la sección <i>FUNCIONAMIENTO</i> . . .	192
11.3.4.1	Sección <i>ENTRADAS_ANALOG</i>	195
11.3.5.1	Sección <i>CONTROLES</i>	198
11.3.6.1	Sección <i>PIDs</i>	201
11.3.7.1	Sección <i>ACCIONES</i>	206
11.3.8.1	Sección <i>SCADA</i>	209
12.0.8.1	Página de inicio de SCADA <i>CONFIG</i>	212
12.0.8.2	Página de SCADA <i>MANUAL</i>	213
12.0.8.3	Página de SCADA <i>PID SIMPLE</i>	214
12.0.8.4	Página de SCADA <i>TREND</i> para visualizar tendencias	215
12.0.8.5	Página de SCADA <i>RLS PID</i>	216
12.0.8.6	Página de SCADA <i>CAMBIO DE NIVEL</i>	217
12.0.8.7	Página de SCADA <i>PLANTA EN FALLO</i> lista para rearme	218

Índice de tablas

7.1.3.1	Partes del calentador	48
7.1.3.2	Características eléctricas del calentador	49
7.1.3.3	Características bomba centrífuga	49
7.1.3.4	Características eléctricas de la bomba circuladora	50
7.1.3.5	Características de funcionamiento de la bomba circuladora	51
7.1.3.6	Características eléctricas de las válvulas servopilotadas	52
7.1.3.7	Características de la electroválvula	53
7.1.5.1	Características de las fuentes de alimentación	64
7.1.5.2	Características del interruptor diferencial	64
7.1.5.3	Características de los interruptores magnetotérmicos	65
8.1.2.1	Características de la electroválvula modificada	71
8.3.2.1	Métodos de obtención de parámetros de PID en lazo abierto	94
8.5.3.1	Tags de Alarma	123
10.1.0.1	Medidas para el escalado de nivel con la temperatura	145
11.1.0.1	Lista de las variables de programa	161

MEMORIA

TÍTULO: Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios

MEMORIA

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2014

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ÁLVARO LÓPEZ VARELA

1 Objeto	23
2 Alcance	25
3 Antecedentes	27
3.1 Control	29
3.1.1 Control discreto	30
3.1.2 Tipos de control	30
3.1.2.1 Tipos de PID	31
4 Normas y referencias	35
4.1 Bibliografía	35
4.2 Programas de cálculo	35
4.3 Otras referencias	36
5 Definiciones y abreviaturas	37
6 Requisitos de diseño	39
7 Análisis de las soluciones	41
7.1 Descripción de la planta	41
7.1.1 Planta	42
7.1.2 Sensores	43
7.1.2.1 Sensores todo-nada	43
7.1.2.2 Sensores de medida	44
7.1.3 Actuadores	48
7.1.4 Panel de mando	53
7.1.5 Cuadro de Control y Distribución	55
8 Resultados finales	67
8.1 Puesta en marcha	67
8.1.1 Valoración inicial de la planta e identificación de fallos	67
8.1.2 Cambios en la planta	69
8.1.3 Programa de test	72
8.2 Gestión de etapas	82
8.2.1 Gestión de seguridad	84
8.2.2 Gestión de mando	88
8.2.3 Gestión de funcionamiento	89
8.3 Control de nivel mediante PID simple	92
8.3.1 Programación del PID	92

8.3.2	Obtención de parámetros	93
8.3.3	Resultados	95
8.4	Control de nivel mediante PID adaptativo	97
8.4.1	Método RLS	98
8.4.2	Autoajuste del PID	100
8.4.3	PID	102
8.4.4	Regulador	104
8.4.5	Pantalla de explotación	106
8.5	SCADA	107
8.5.1	Conexión con la planta	107
8.5.2	Usuarios	109
8.5.3	Funciones	110
8.5.3.1	Página <i>CONFIG</i>	110
8.5.3.2	Página <i>MANUAL</i>	111
8.5.3.3	Página <i>PID SIMPLE</i>	113
8.5.3.4	Página <i>TREND</i>	115
8.5.3.5	Página <i>RLS PID</i>	117
8.5.3.6	Página <i>CAMBIO DE NIVEL</i>	119
8.5.3.7	Página <i>PLANTA EN FALLO</i>	120
8.5.3.8	Alarmas	122

Capítulo 1

Objeto

El presente proyecto tiene como objeto configurar la planta de laboratorio de controles varios del Laboratorio de Optimización y Control de la Escuela Universitaria Politécnica, de forma que sus elementos sean controlables manualmente desde un SCADA. Por otro lado, se programara en la misma un control de nivel en dos grados: un control PID simple y un control PID avanzado.

Capítulo 2

Alcance

El presente proyecto pretende servir de aproximación pedagógica al control para futuros alumnos de la Escuela Universitaria Politécnica de Serantes. Por lo tanto, el proyecto debe ser especialmente explicativo y visual, en concreto y fundamentalmente el SCADA.

El proyecto consta de 5 partes bien diferenciadas:

1. Puesta en marcha de la planta de controles varios y realización de un programa de test que permitirá comprobar el correcto funcionamiento de los sensores y actuadores visualmente mediante una pantalla de explotación, así como monitorizar problemas en la planta y obtener los valores reales de los sensores
2. Implementación del control de nivel mediante un controlador PID
3. Identificación de la planta mediante RLS
4. Implementación del control de nivel mediante un controlador PID autoajustable
5. Realización de un SCADA

Capítulo 3

Antecedentes

La planta de laboratorio de Controles Varios está totalmente conformada con todos sus elementos, tanto estructurales (depósitos, soportes ...), de potencia (fuentes de alimentación, motores ...) como de control (relés, variador, PLC ...) (ver apartado 7.1). Sin embargo, a pesar de estar totalmente conformado el cuadro de control con todos sus elementos constitutivos, hasta el momento de comenzar el proyecto no se había llevado ninguna puesta en marcha de la planta, así como ningún lazo de control.



Figura 3.0.0.1 – Planta

La planta lleva un cierto tiempo sin usarse ni revisarse, por lo que se desconoce el estado de sus elementos. Por ello, cobrará especial relevancia la puesta en marcha, pues hasta el momento en la planta sólo se pueden actuar los elementos que se pueden activar manualmente a través de pulsadores situados en el cuadro de mando (detrás de la planta). Sin embargo, existe un pequeño programa en el cual están declaradas todas las variables de la planta, pero que sólo realiza acciones puntuales (ver el apartado 9.2 de anexos *Datos de partida*).

El control a realizar se basa en mantener un nivel estable, especificado por el usuario de la planta, en el depósito de control de nivel (DEP3). El depósito se llena a través de una tubería que tiene en su parte inferior y que está conectada a una bomba centrífuga, que a su vez está conectada con un depósito de suministro (DEP2) y a una válvula servopilotada. Cualquiera de estos dos actuadores (válvula y bomba) podrían ser el elemento controlador, pero en el presente trabajo se elige la bomba principalmente por su mayor rapidez de respuesta (ver apartado 7.1). Por otro lado, el depósito se vacía por su parte inferior a través de una servoválvula y de una electroválvula todo-nada.

Estos elementos mencionados forman el «circuito de proceso», pero existen otros 2 circuitos: el «circuito de enfriamiento», por el que circula agua presumiblemente más fría que la de proceso, y que tiene una servoválvula para controlar la entrada de líquido, y el «circuito de calentamiento», que consta de un calentador conectado a una bomba circuladora y a una servoválvula de 3 posiciones. Los tres circuitos se encuentran separados físicamente, de forma que intercambian agua, pero no energéticamente, pues a través de 2 intercambiadores de calor caleantan o enfrían el líquido de proceso.

En el control, intervienen de forma directa o indirecta, todos y cada uno de los elementos de la planta. Por ejemplo, un cambio en la apertura de la válvula de agua fría supone un grado de enfriamiento del agua de proceso diferente, y por lo tanto una densidad diferente en la misma. El sensor de nivel es un sensor de presión (ver apartado 7.1.2.2) por lo que la lectura del sensor será diferente a la esperada con otra temperatura. A pesar de esto, todas las variaciones en las variables de la planta a excepción de la consigna del variador serán consideradas como perturbaciones, y no formarán parte de los modelos de control (la temperatura de proceso se considerará como parámetro de medida de nivel, y no como variable de control).

3.1. Control

El control es la base de cualquier planta o proceso industrial en la actualidad. Desde hace décadas, el control, ya sea realizado por microcontroladores, autómatas o computadores, ha venido sirviendo de continua mejora en la producción y ha servido para optimizar los procesos (tanto técnica como económicamente), mejorar las condiciones de los operarios, y como base para la evolución industrial.

El control industrial hace referencia al conjunto de técnicas orientadas a obtener un resultado de una planta o proceso con la mínima intervención humana. El control es posible gracias a la monitorización de una serie de variables, y en su sentido más básico, de las entradas y salidas de una planta. Los términos «entrada» y «salida» son términos relativos, y dependen de las características de la planta y/o de lo que se desee controlar y cómo.

Las técnicas de control analógico fueron las primeras en aparecer, y sirvieron y sirven como solución a múltiples sistemas y procesos. La base de cálculo en este tipo de regulación es la transformada s , gracias a la cual se puede pasar un sistema del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. En esta rama del control, las entradas y salidas, así como las variables de estado y las perturbaciones, quedan relacionadas a través de funciones de s , y aplicando criterios de estabilidad se puede determinar las características del regulador óptimo para el proceso.

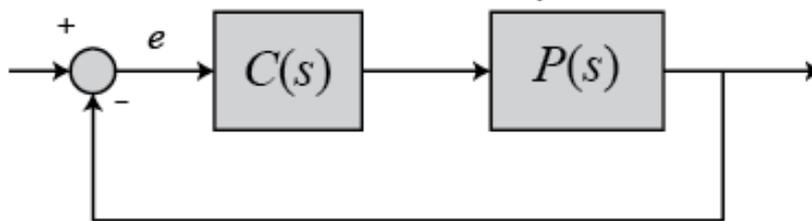


Figura 3.1.0.2 – Sistema controlado con realimentación

Existen muchos procesos que son estables por naturaleza en los que las salidas son una función directa de las estradas. Para el resto de sistemas, se utilizan técnicas de control que realimenten la señal de salida al sistema, y una de ellas es la realimentación negativa. La realimentación negativa consiste en tomar la señal de salida (debidamente tratada) y restársela a la señal de consigna deseada. De tal forma, la variable que trata el regulador es la señal de error entre la salida y la consigna, siendo la señal de salida la de operación de la planta.

3.1.1. Control discreto

Con el desarrollo de la tecnología digital, los elementos y técnicas de control se han adaptado, dando lugar al control discreto. Este tipo de control se caracteriza por que las estradas y/o las salidas del proceso están muestreadas, es decir, se miden cada cierto tiempo y no constantemente. Por ello, con este tipo de control se introduce una nueva variable fundamental de la cual dependerá la respuesta del sistema: el tiempo de muestreo. Este nuevo parámetro ha de cumplir dos condiciones fundamentales: que sea acorde con la dinámica del sistema (no es lo mismo un control de temperatura para una habitación que un control de posición de ejes) y que sea estable.

En los sistemas de control discreto, a diferencia de los analógicos, se opera con la transformada z , que transforma las ecuaciones en diferencias lineales e invariantes en el tiempo en ecuaciones algebraicas en z . De esta forma es posible afrontar el diseño de sistemas de control de forma análoga a los sistemas de control analógicos. Por lo tanto, la inclusión de muestreadores y retenedores, siempre que sean adecuados al proceso, no supone ningún perjuicio para el control, sino una mejora en la simplicidad de los medios de control. La evolución constante de la tecnología digital también contribuye a esta mejora.

3.1.2. Tipos de control

Dentro del control discreto existen varias técnicas para determinar la estabilidad de un sistema, de forma que cualquier tipo de control es válido mientras que consiga la estabilidad en todas las regiones de funcionamiento y para las condiciones del sistema. La forma más básica de comprobar su estabilidad es visualizando la posición de los polos del sistema en bucle cerrado en el plano Z . La condición de estabilidad en este caso es que todos los polos se encuentren dentro del círculo de radio unidad. En este caso, no sólo influyen las características del sistema, sino también el tiempo de muestreo, pues uno inadecuado puede empeorar el control y hasta puede acarrear la inestabilidad del sistema.

Uno de los principales problemas por un tiempo de muestreo inadecuado es el llamado «aliasing», que supone una adquisición de datos errónea debido a un periodo de muestreo superior a la frecuencia natural del sistema. Para evitarlo, siempre es conveniente muestrear por debajo de la frecuencia del sistema, y según el teorema de Shannon, la frecuencia de muestreo debe ser con mínimo dos veces la natural del sistema, aunque convencionalmente para un correcto funcionamiento se toman entre 8 y 10 veces la frecuencia del sistema.

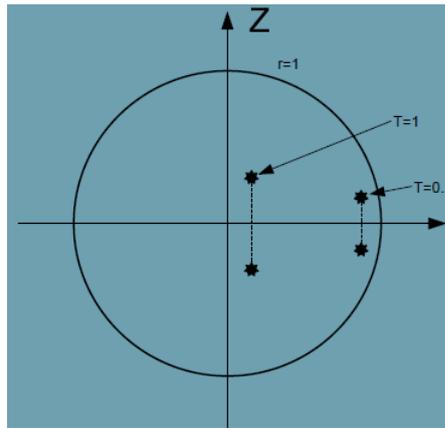


Figura 3.1.2.1 – Variación de la posición de los polos con el tiempo de muestreo

Tanto en base a este criterio como a otros criterios de estabilidad, se pueden diseñar todo tipo de reguladores, y en la mayoría de los casos pueden ser válidos varios reguladores completamente distintos. Sin embargo, existen estándares o reguladores convencionales que se basan en técnicas simples y que aportan buenos resultados. Los más básicos son el control proporcional, el controlador integral- proporcional, el controlador proporcional-derivativo, y el más conocido y que más se ha venido utilizando, el regulador PID (proporcional, integral y derivativo).

3.1.2.1. Tipos de PID

El regulador PID se basa en la suma de las acciones de los reguladores proporcional, integral y derivativo. Cada parte tiene un efecto determinado y diferente en el control, según se explica a continuación.

- Parte proporcional

La parte proporcional es el producto de una constante, llamada constante proporcional, por error actual de la planta, es decir, de la constante por la diferencia de la consigna y la señal de salida. Esta parte pretende que el error en estado estacionario tienda a cero, pero los valores sólo son válidos para un determinado rango.

$$u_c(t) = k_P e(t) \quad (3.1.2.1)$$

$$U_c(s) = k_P E(s) \quad (3.1.2.2)$$

- Parte integral

La parte integral integra el error, de forma que pretende eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral mide la desviación entre la variable y la consigna, integrando esta desviación en el tiempo y multiplicandola por una constante integral. Esta acción tiene efecto acumulativo, de forma que para saturación de la salida la acción integral coltinuará funcionando, provocando un fallo en el control. Para evitar dicho fallo se crean los sistemas anti-windup, que controlan exclusivamente la acción integral.

$$u_c(t) = k_I \int e(\tau) d\tau \quad (3.1.2.3)$$

$$U_c(s) = \frac{k_I}{s} E(s) \quad (3.1.2.4)$$

- Parte derivativa

Si un controlador puede usar la tasa de cambio de la señal de error, entonces esto introduce un elemento de predicción en la acción de control. La acción derivativa usa esa tasa de cambio multiplicada por una constante. Esta acción, dentro del controlador PID, supone un aumento de la velocidad del sistema, pero puede provocar sobreoscilaciones muy pronunciadas, por lo que hay que cuidar la constante derivativa

$$u_c(t) = k_D \frac{de}{dt} \quad (3.1.2.5)$$

$$U_c(s) = [k_D s] E(s) \quad (3.1.2.6)$$

Con estos 3 términos, se pueden crear una gran variedad de controladores PID. Sin embargo, la opción más estandarizada es la de ISA (Instrumentation, Systems and Automation Society), que tiene la siguiente estructura:

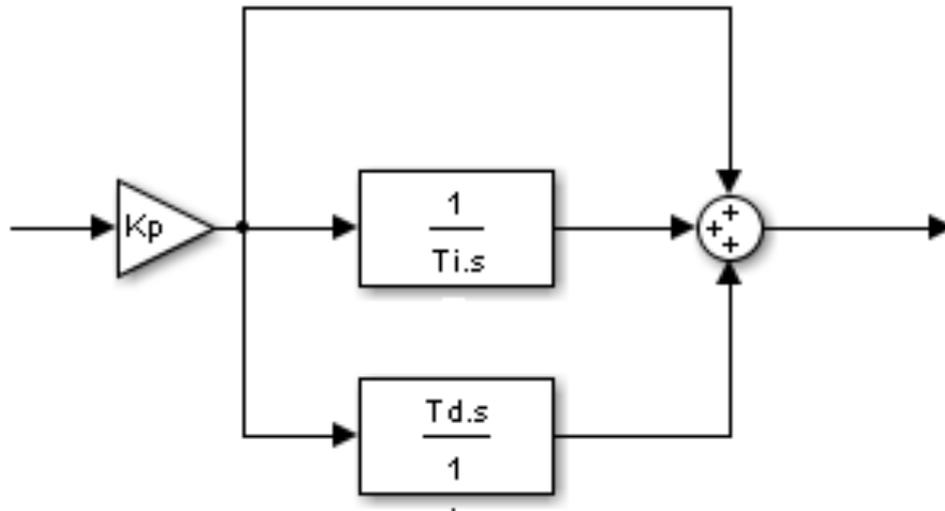


Figura 3.1.2.2 – PID estándar

$$G(s) = k_P \left[1 + \frac{1}{T_I s} + s T_D \right] \quad (3.1.2.7)$$

Esta es la formulación de PID analógico. A la hora de discretizar, aumenta el número de posibilidades de PID. Principalmente se distinguen 2 formulaciones: la forma posicional del algoritmo PID discreto, y la forma de velocidad o incremental del algoritmo PID discreto. La integral y la derivada, al discretizar, es necesario simplificarlas: la parte derivativa se calcula como la pendiente de la recta que forma el error entre el instante actual y el anterior; y la parte integral, se calcula como el área de la función de error en los instantes anteriores, y tiene carácter acumulativo.

■ Forma posicional:

$$u(t) = k_P \left[e(t) + \frac{T_c}{T_I} \sum_{i=1}^t e(i) + \frac{T_d}{T_c} [e(t) - e(t-1)] \right] + u(0) \quad (3.1.2.8)$$

- Es necesario comprobar la componente integral para evitar su saturación
- Requiere el conocimiento de la posición inicial del actuador
- Mantiene el significado intuitivo de los parámetros K_p , T_i y T_d semejante a los reguladores PID analógicos

■ Forma incremental:

$$u(t) = k_P \left[(e(t) - e(t-1)) + \frac{T_c}{T_I} e(t) + \frac{T_d}{T_c} (e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)) \right] + u(t-1) \quad (3.1.2.9)$$

- No requiere comprobar la componente integral para evitar su saturación, aunque sí hay que establecer límites a los incrementos de la variable de control
- Si el actuador es incremental, no se precisa conocimiento de la posición inicial del actuador
- Se desvirtúa el significado de los parámetros K_p , T_i y T_d .
- Trabaja con la segunda derivada del error, lo cual puede ser un inconveniente en presencia de ruido

Capítulo 4

Normas y referencias

4.1. Bibliografía

- [1] Aguado Behar, Alberto, y Martínez Iranzo, Miguel (2003), *Identificación y Control Adaptativo*, 1ª ed. Prentice Hall. ISBN: 84-205-3570-2.
- [2] Åmström, K. y Hägglund (1995), *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, 2ª ed. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society. ISBN: 1-55617-516-7.
- [3] Johnson, Michel A. y Moradi, Mohammad H. (2005), *PID Control. New Identification and Design Methods*. Springer. ISBN: 1-85233-702-8.
- [4] Ogata, Katsuhiko (1996), *Sistemas de control en tiempo discreto*, 2ª ed. Prentice Hall. ISBN: 0-13-034281-5.
- [5] Bailey, David y Wright, Edwin (2003), *SCADA for Industry*. Elsevier. ISBN: 0-7506-5805-3.

4.2. Programas de cálculo

- *Unity Pro XL*
- *Vijeo Citect 7.2*
- *Matlab 2011.b* (como ayuda a la hora de realizar la identificación)

4.3. Otras referencias

Como procesador de textos, se utiliza el sistema \LaTeX . \LaTeX es un sistema de composición de textos muy utilizado para la elaboración de documentos científicos, y que se caracteriza por funcionar como un lenguaje de programación.

Para poder elaborar un documento \LaTeX , son necesarios los siguientes programas:

- *Miktex* (como compilador)
- *TexnicCenter* (como editor)
- *Gsview* (como intérprete de documentos .ps)
- *Ghostscript*
- *Adobe Reader* (como visualizador de documentos .pdf)

Capítulo 5

Definiciones y abreviaturas

- PLC: controlador lógico programable, autómata
- SP: set point
- PV: process value
- LD: lenguaje de contactos
- DFB: bloque de función derivado
- FBD: lenguaje basado en bloques de función
- SFC: lenguaje gráfico de funciones secuenciales
- ST: lenguaje estructurado
- U: Señal de entrada de la planta
- Y: Señal de salida de la planta
- E: Error entre el set point y la salida del proceso

Capítulo 6

Requisitos de diseño

El objetivo, como ya se mencionó, es poner en marcha la planta y programar un control de nivel. En la planta se pueden establecer 4 lazos de control: control de nivel, control de caudal, control de temperatura y control de presión. En el lazo de nivel, no se establecen especificaciones determinadas en los resultados, sólo que la planta sea estable. Cabe destacar que la planta está orientada a un uso didáctico, por lo que es necesario que la programación de la misma permita al usuario establecer los parámetros de control en cada caso.

Todo el control lo llevará a cabo un autómatas TSX Premium de Schneider. El presente proyecto incluye la programación del mismo, así como la programación y descripción del funcionamiento del SCADA y demás datos técnicos y de interés.

La programación del PLC ha de ser:

- Robusta, en cuanto a que responda de la forma esperada ante situaciones de fallo o imprevistos.
- El periodo de muestreo ha de ser estable, aunque no tiene por qué operar todos los elementos con igual periodo.
- La programación ha de ser clara para poder realizar modificaciones en futuros trabajos, pues parte de esta programación está orientada a este fin (gestión de etapas).
- La programación ha de estar claramente documentada, sin que la información sea excesiva.
- La programación se procurará, en medida de lo posible, que sea modular, es decir, que los módulos que se creen sean exportables y que sirvan para otros proyectos, del mismo modo que se contribuye a la claridad.

- Por último, y más importante, la programación ha de ser efectiva, pues debe de cumplir todas las funciones para las que fue diseñada.

En cuanto al SCADA:

- Debe ser claro, sin dar lugar a dudas o malas interpretaciones, pues tiene finalidad didáctica.
- Debe ser funcional, es decir, simple y directo.
- La información que dá al usuario será en su justa medida, pues se debe poder identificar de un vistazo el estado de la planta.
- Su uso no debe presuponer conocimientos de control del usuario que lo maneje, por lo que tanto el SCADA como la programación deben poder gestionar cualquier cambio que introduzca el usuario a través del SCADA
- Por otro lado, se programará un usuario a un nivel superior para aquellos que tengan conocimientos de control, pero para ello es necesario registrarse con usuario y contraseña. Los usuario a nivel inferior sólo podrán modificar, en las secciones de control, la apertura de las válvulas y el tipo de control.

Capítulo 7

Análisis de las soluciones

7.1. Descripción de la planta

La planta de laboratorio de controles varios es una planta específicamente diseñada para su utilización por parte de alumnos, de modo que está estructurada de un modo más visual y fácilmente comprensible que optimizado. En ella se pueden llevar a cabo diferentes lazos de control (presión, caudal, temperatura y nivel) mediante la programación del autómatas con el que cuenta la planta.

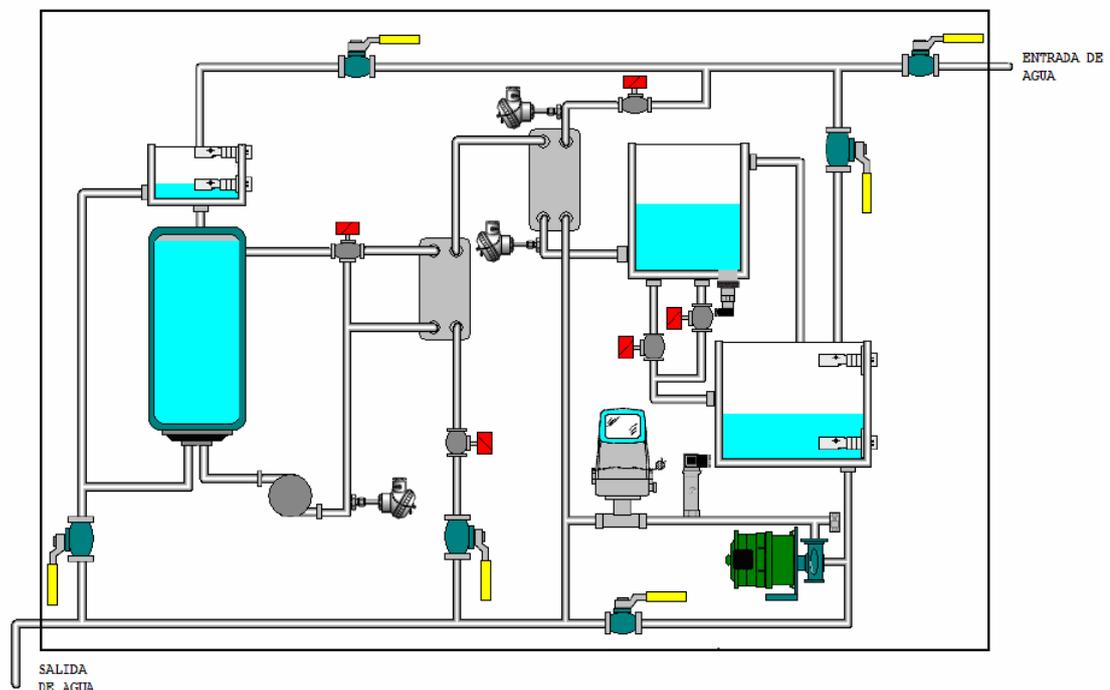


Figura 7.1.0.1 – Esquema de la planta de Controles Varios

En primer lugar se describirán los elementos de la parte frontal de la planta, donde se encuentran sensores y actuadores, y a continuación los elementos de control,

señalización y maniobra de la parte posterior de la misma.

7.1.1. Planta

Sin tener en cuenta los elementos de control y de monitorización, la planta se compone estructuralmente de lo siguiente:

- **Placa estructural de sujeción:**

Es una plancha de acero colocada verticalmente y soldada a un armazón de tubo de hierro sobre la cual se sujetan el resto de los elementos de la planta.

- **Depósitos:**

Los depósitos están específicamente diseñados para instruir a los alumnos y poder observar su nivel fácilmente gracias a que una de las caras del paralelepípedo que los conforma está construida con metacrilato. Los depósitos tienen cada uno una función específica en la planta. Para simplificar, los depósitos se numeran, de la siguiente forma: el depósito 1, situado en la parte superior izquierda, es un depósito de expansión del calentador, de forma que será necesario vigilar su nivel para que el calentador pueda funcionar y no rebose. El número 2 es el depósito almacén de agua del proceso, situado en la parte inferior derecha, y que debe tener agua suficiente para que la bomba no funcione en vacío sin que el depósito rebose. Por último, el depósito 3, en la parte superior derecha, es el de control de nivel, para el cual es muy útil la pared de cristal del depósito.

- **Tuberías y elementos de unión:**

Las tuberías son cilindros de una pulgada de diámetro por las cuales circula el agua de la planta. Para la instalación del caudalímetro fue necesario reducir el diámetro de una de sus tuberías, de forma que para no producir un incremento de presión se decidió colocar un segundo tubo en paralelo, del mismo diámetro que el anterior.

- **Intercambiadores de calor:**

Éstos son elementos fundamentales de la planta, y sin ellos quedaría falta de sentido. La planta consta de un circuito de agua caliente, otro de agua fría, y otro de agua de proceso, de la cual se desea controlar su temperatura. En un intercambiador, el circuito de agua caliente transfiere calor al circuito de proceso, y en el otro es el agua de proceso la que transfiere calor al circuito de agua fría. Los intercambiadores constan de 2 entradas y dos salidas, y en ningún caso

se comunican los flujos de agua caliente, fría y de proceso, de forma que cada circuito permanece físicamente aislado del resto (aunque no energéticamente). Si no existiesen estos intercambiadores, los circuitos quedarían aislados, y si bien es cierto que el control de nivel seguiría siendo posible, uno de los controles para el que fue diseñado (el control de temperatura) quedaría imposibilitado.

7.1.2. Sensores

Los sensores cumplen el papel fundamental en la planta de obtener los datos y transmitírselos al autómata, dando una medida que ha de ser tratada por el autómata. A continuación se clasificarán en sensores binarios o analógicos en función de la medida que obtienen, sin tener en cuenta el tipo de comunicación con el autómata.

7.1.2.1. Sensores todo-nada

Los sensores binarios dan una medida todo-nada de la magnitud que están midiendo

- **Detectores de nivel:**

Consisten en un flotador, montado sobre un brazo móvil y acoplado magnéticamente a un microinterruptor (externo al proceso). De este modo, los sensores dan una señal 'a nivel alto' cuando el líquido los actúa, y un 'nivel bajo' cuando el nivel de líquido es inferior.



Figura 7.1.2.1 – Detectores de nivel

Los sensores de nivel utilizados en la maqueta son los LCS-02 de GENTECH INTERNATIONAL LTD. Estos sensores servirán para controlar el nivel máximo y mínimo en el vaso de expansión del calentador (depósito 1) y en el depósito de almacenaje (depósito 2), así como el nivel máximo en el depósito de control de nivel.

7.1.2.2. Sensores de medida

■ Sensores de Temperatura:



Figura 7.1.2.2 – Sensor de temperatura

Estos sensores están basados en la variación de la resistencia con la temperatura que se produce en una PT100. El sensor está encapsulado de tal forma que no le afecten variaciones de temperatura ambientales, y está debidamente acondicionado y linealizado para dar una medida real de la temperatura. La situación de los sensores, en tubos ciegos, es importante, para no modificar las condiciones del flujo. Esto hace que los sensores sean un poco más lentos que si estuviesen colocados directamente en las tuberías de circulación de agua, lo cual modifica los parámetros a la hora de realizar un control de temperatura.

Los sensores de temperatura utilizados son captadores RTD del tipo CR-BNNs de Desin Instruments. Se trata de sondas autoportantes de cabeza pequeña que presentan como elemento sensible un sensor Pt 100 estratificado. Para la transmisión de la temperatura al controlador se colocan en la cabeza de los captadores los transmisores CM-40 de Desin Instruments. El CM-40 es un transmisor de temperatura con salida 4-20mA a 2 hilos asociada al margen de medida.

Este transmisor permite ser configurado en entrada y rango mediante «straps» (puentes de soldadura) permitiendo seleccionar:

- T.P. J (Fe-Const) en 4 rangos. T.P. K (NiCr-NiAl) en 3 rangos.
- RTD Pt 100 en 40 rangos linealizados.

La configuración Pt 100 dispone de un linealizador de escala que establece una proporción lineal entre entrada y salida.

■ Caudalímetro:



Figura 7.1.2.3 – Caudalímetro Sitrans F M de Siemens

Este sensor mide el caudal de líquido de proceso a la salida de la bomba centrífuga y envía el valor al autómata. Este caudalímetro, debido a condiciones de disponibilidad de mercado, es de 1/2 pulgada, mientras que las tuberías del proceso son de 1 pulgada. Por ello, fue necesario montar tuberías de 1/2 pulgada para instalarlo, pero para no variar las condiciones de proceso y tener puntos de alta presión y bajo caudal se decidió colocar otra tubería de 1/2 pulgada en paralelo con el caudalímetro. En cualquier caso, la medida del caudalímetro es la mitad de la real, de forma que es necesario tenerlo en cuenta a la hora de hacer un control de caudal.

El caudalímetro completo usado en la instalación para visualizar y controlar el caudal consiste en un sensor de medida MAG 1100 de referencia 7ME610-1VA10-1AA0 y el correspondiente transmisor SITRANS F M MAGFLO MAG 5000 de referencia 7ME6910-1AA10-1AA0 de Siemens. La lectura de caudal efectuada por el caudalímetro será enviada a través de una señal de 4-20mA al PLC. Este valor de caudal se puede ver en el display del mismo caudalímetro, que ya está configurado para que muestre el valor real del caudal (el doble del medido).

La medición de caudal se basa en la ley de inducción electromagnética de Faraday, según la cual el sensor de medida convierte el caudal en un voltaje eléctrico proporcional a la velocidad de flujo. Este tipo de medición implica que el líquido de proceso debe ser conductor, pues de otro modo no funcionaría.

- **Sensor de presión:**



Figura 7.1.2.4 – Sensor de presión

Este sensor mide la presión a la salida de la bomba centrífuga y envía la medida al autómeta. El sensor de presión se sitúa lo más próximo posible a la bomba para que la pérdida de presión inherente a cualquier fluido circulando por una tubería no altere la medida. Por otro lado, la medida de la presión es exclusiva de ese punto y no puede extrapolarse a otro punto del circuito de proceso, aunque sí aproximarse.

En la maqueta se utiliza un transmisor de presión TPR-18 de Desin Instruments. cuya medida se usará para realizar el lazo de control de presión. El TPR-18 es un transmisor de presión relativa con sensor cerámico. Montado en caja inoxidable de pequeño formato con salida a 4-20mA para conector normalizado.

- **Sensor de nivel:**



Figura 7.1.2.5 – Sensor de nivel

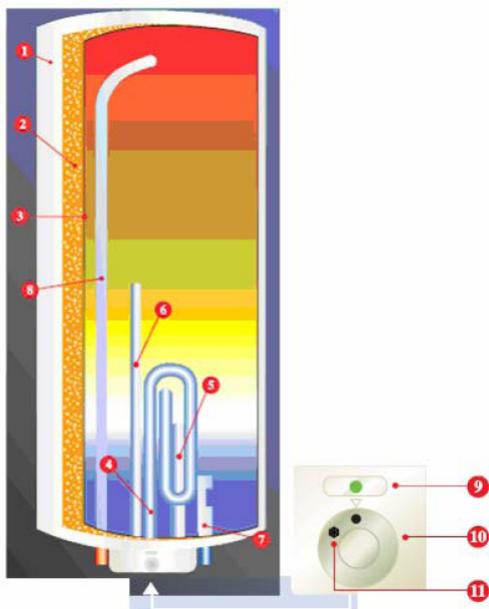
El sensor de nivel mide la altura de la columna de agua que tiene el depósito de control de nivel, de forma que la medida de presión expresada en metros de columna de agua (m.c.a) indica el nivel del depósito. El sensor está colocado en la parte inferior del depósito de control de nivel prácticamente al mismo nivel que la base del tanque. Hay que tener en cuenta que se está trabajando con agua, ya que si se varía el líquido del proceso o se adultera con líquidos antioxidantes o limpiadores, habría que hacer las reconsideraciones oportunas en la evaluación del nivel de la planta. Por ejemplo, si en lugar de agua se utilizara mercurio como líquido de proceso, al ser más denso el mercurio que el agua, la presión medida sería mayor a igual nivel de líquido, lo que implica que la medida de 0,4 m.c.a equivaldría a menos de 0,4 metros de mercurio.

El sensor consiste en un transmisor de nivel con membrana para montaje exterior tipo TNE-16 de Desin Instruments. Este tipo de transmisor presenta un sensor cerámico capacitivo y permite la medición de nivel continuo en tanques abiertos. La columna de líquido sobre el transmisor genera una presión, que se transfiere vía diafragma a través del aceite inerte de relleno hacia el elemento sensor, que es proporcional al nivel líquido, en señales de salida estándares de corriente (4- 20mA 2 hilos). Requiere de una tensión de alimentación entre 13 y 36Vcc y presenta un rango entre 0 a 200 mca.

7.1.3. Actuadores

■ Calentador:

Para calentar el agua se utiliza un termo eléctrico vitrificado modelo SDC 30 V de Saunier Duval. Este termo, de capacidad 30 litros, incorpora una resistencia envainada de 1.800W. Se trata de una resistencia eléctrica sobre soporte de esteatita, protegida por una vaina que aumenta la capacidad de transmisión de calor, reduce las deposiciones de cal y alarga la vida del termo.



1. Carcasa metálica blanca
2. Aislamiento de espuma de alta densidad
3. Cuba vitrificada
4. Resistencia envainada
5. Ánodo de magnesio especial con detección de desgaste
6. Termostatosde regulación y seguridad
7. Entrada de agua fría
8. Salida de agua caliente
9. Testigo de funcionamiento y desgaste de ánodo
10. Mando de regulación de temperatura
11. Seguridad antihielo

Tabla 7.1.3.1 – Partes del calentador

Consiste en un termo con una capacidad de 30 litros. El calentador permite incrementar la temperatura del depósito 25°C en un tiempo de 30 minutos, pudiendo modificarse la consigna del depósito de forma manual. El calentador permanece funcionando hasta que se consigue la temperatura deseada, indicando su fun-

cionamiento un LED verde en su parte inferior. Al conseguirse la temperatura deseada, el LED se apaga y el calentador deja de funcionar.

Modelo	Capacidad (L)	Potencia (W)	Tensión (V)	Tiempo de calentamiento ■ t 25°C (min)	Consumo mantenimiento a 65°C kWh/24h
SDC30V	30	1.800	230	30 min	0,68

Tabla 7.1.3.2 – Características eléctricas del calentador

■ **Bomba centrífuga:**

La bomba centrífuga utilizada es la K 8-T de Bombas Saci. Es una bomba de tipo monoturbina, encargada de bombear el líquido de proceso a través de todo el circuito hasta el tanque de control de nivel. La bomba funciona en el rango de -10 a 50°C, por lo que para controles de temperatura se tomarán un rango más prohibitivo para no causar problemas. El motor acoplado a la bomba permite una conexión en estrella o en triángulo, siendo la utilizada la conexión en estrella por ser necesaria para utilizar el variador de velocidad para controlarla. La máxima presión de trabajo es 6Kg/cm².



Figura 7.1.3.1 – Bomba centrífuga de Saci

Potencia		Caudal m ³ /h.								Diámetro		
		1,2	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4	9,6			10,8
C.V.	K.W.	Altura m.c.a.								Asp.	Imp.	
1	0,74	35	32,5	28,5	25	20,5					1"	1"

Tabla 7.1.3.3 – Características bomba centrífuga

■ **Bomba circuladora:**

La bomba es del tipo VA 35/130 de Bombas Saci. Esta es la bomba encargada de circular el líquido caliente al calentador, de forma que fuerza el movimiento del agua en el interior del calentador para conseguir una temperatura del líquido lo más homogénea posible. Cuando se encienda el calentador es conveniente activar del mismo modo la bomba. Además, esta bomba también es necesaria para recircular el líquido por un intercambiador de calor para calentar el líquido de proceso (la entrada de líquido en el intercambiador está regido por una válvula).



Figura 7.1.3.2 – Bomba de circulación Saci VA 35/130

MODELO	ALIMENTACION 50 hZ	ENTRE BOCAS mm	DATOS ELECTRICOS						MINIMA PRESION DE ASPIRACION
			VEL.	n r.p.m.	P1MAX W	In A	CONDENSADOR		
							μF	Vc	
VA 35/130	Monofásica 230V	130	3 2 1	2456 1723 1315	78 58 39	0.33 0.27 0.18	2	450	t°+90C m.c.a. 1.5

Tabla 7.1.3.4 – Características eléctricas de la bomba circuladora

La bomba cuenta con 3 velocidades, tomándose la de funcionamiento la intermedia para no dificultar la refrigeración de la propia bomba y para disminuir su consumo. La velocidad de la bomba sólo es configurable manualmente y es necesario hacer el ajuste con la bomba parada.

Campo de funcionamiento	De 0,5 a 5 m ³ /h con alturas hasta 6.5 metros.
Campo de temperatura del líquido.	De +2°C a +110°C (es conveniente que la temperatura del líquido bombeado debe sea superior a la temperatura ambiente para evitar el fenómeno de condensación en el interior del motor).
Líquido bombeado.	Limpio, libre de sustancias sólidas y aceites minerales, no viscoso, químicamente neutro y próximo a las características del agua.
Máxima presión de ejercicio.	10 bar (1000 kPa).
Instalación.	Con el eje motor horizontal sobre la tubería de impulsión o retorno, con la boca de aspiración lo más cerca posible del vaso de expansión, sobre el nivel máximo de la caldera, y lo más lejos posible de curvas, desviaciones o derivaciones.
Tensión de serie.	Monofásica 230V / 50Hz
Grado de protección.	IP44
Clase de aislamiento.	F
Pasa cables.	PG 11

Tabla 7.1.3.5 – Características de funcionamiento de la bomba circuladora

■ Válvulas servopilotadas:

Éstas son válvulas conectadas a un servomotor, de forma que la apertura de éstas puede ser controlada por un autómatas. Las válvulas de control utilizan los servomotores AXM 117S F302 de Sauter. Las válvulas tardan 1 minuto en recorrer todo su rango de funcionamiento, es decir, de estar totalmente abiertas a cerradas o viceversa. No pueden ser modificadas manualmente, pero sí su configuración (mediante jumpers).

Alimentación (Vdc)	Consumo (VA)	Tensión de control (V)	Corriente de control máx (mA)
24	5	0 a 10	0,5

Tabla 7.1.3.6 – Características eléctricas de las válvulas servopilotadas

En el momento de la puesta en funcionamiento (con la válvula ajustada), el actuador se mueve a las dos posiciones finales y memoriza el número de pasos que ha realizado. La señal de control 0 a 10 V es entonces asignada linealmente a la carrera. Si después de 2 horas, la tensión de mando no evolucionó (en el rango 0 a 0.5 V), el motor corre brevemente a las posiciones finales y corrige (si es necesario) su memorización de posición. Cada 24 horas, se efectúa un ciclo completo. El indicador LED se enciende cuando es aplicada una tensión sobre el servomotor y destella si el motor está en funcionamiento.

Existen dos tipos de válvulas en función de su uso: las válvulas de salida de la bomba centrífuga, de vaciado del tanque de control de nivel y la de paso de agua fría sólo permiten o interrumpen el paso de un líquido a través de ellas; en el caso de la de paso de agua caliente, realiza la función de seleccionar el camino de circulación del agua caliente, funcionando como una válvula de 2 vías. Esta válvula de 2 vías permite el paso de agua por el intercambiador de calor a 10 V de alimentación, la recircula para 0 V y para un valor intermedio regula la cantidad de agua que entra al intercambiador.

■ Electroválvula:

La electroválvula que inicialmente tiene la maqueta es de la serie 86 de Ceme. Se trata de una electroválvula de 2/2 vías N.C, que exige una presión mínima para su activación de 0.3 bares, o lo que es lo mismo, 3 metros de columna de agua.

REFERENCIA	C.E.M.E. 8616NN025s
TIPO	Normalmente cerrada
PRESIÓN DE TRABAJO	0.3-10 Bar
ROSCA	Rosca G hembra de 1"
ACCIONAMIENTO	AC 230V 50 Hz

Tabla 7.1.3.7 – Características de la electroválvula

7.1.4. Panel de mando

El panel de mando y señalización de la maqueta de laboratorio cuenta con un número limitado de elementos para poder realizar operaciones básicas manualmente en la planta sin la necesidad de que el autómatas controle dichas acciones. Estos elementos están especialmente diseñados para operaciones de arranque de la planta y comprobaciones en la misma. El panel de mando se sitúa en la parte posterior de la planta, contraria a los actuadores, sensores, depósitos y demás elementos.



Figura 7.1.4.1 – Panel de mando

■ Selector de encendido:

Situado en la parte superior del panel, conecta o desconecta la planta de la alimentación de red. El selector tiene dos posiciones, ON y OFF, y tiene poder de corte suficiente para la potencia que demanda la planta. El selector tiene anexo

un indicador lumínico que se activa cuando la planta está alimentada. De este modo, cualquier usuario de la planta puede comprobar que la planta está conectada a red mediante el selector y mediante el indicador, especialmente indicado para aquellos casos en los que se coloque el selector en ON pero la planta no esté conectada físicamente a red o en los que las protecciones de la toma de fuerza donde se conecte estén activadas.

■ **Selector de 3 posiciones:**

En el centro del panel a la izquierda se encuentra un selector de 3 posiciones identificado como «CALENTADOR». Dicho selector permite activar el calentador de forma manual («MAN»), de forma automática controlado por el autómatas («AUTO») o inhabilitarlo («OFF»). Al igual que en el caso anterior, cuenta con un indicador lumínico que se activa al seleccionar la opción «AUTO». Cuando se trabaje con el SCADA se procurará que este selector esté en modo «AUTO». Con los contactos auxiliares, tanto de este selector como el de dos posiciones de la bomba circuladora, se asocia cada posición a una entrada digital para poder visualizar su estado desde el PLC.

■ **Selector de 2 posiciones:**

A la derecha del selector anterior, el identificado como «CIRCULADORA» controla el modo de activación de la bomba de circulación del circuito de agua caliente. El modo «MAN» permite habilitar la bomba desde 2 pulsadores, mientras que el modo «AUTO» controla su activación desde el autómatas. Cuando se trabaje con el SCADA se procurará que este selector esté en modo «AUTO».

■ **Pulsadores:**

Dichos pulsadores controlan la activación y parada de la bomba circuladora siempre y cuando el selector colocado en su parte superior indique funcionamiento manual. Los pulsadores no son de enclavamiento, por lo que es necesario «memorizar» la pulsación.

■ **Pilotos:**

En la parte inferior, tres indicadores de color rojo informan al usuario de los fallos térmicos de los guardamotors que controlan el calentador, la bomba circuladora y la bomba centrífuga. Para apagar los indicadores tras ser detectado el problema, es preciso rearmar los guardamotors correspondientes (ver plano 2).

■ **Seta de emergencia:**

El paro de emergencia consiste en una seta situada en el lateral izquierdo del Cuadro de Control y Distribución y que permite detener el proceso que se esté llevando a cabo en caso de emergencia. A nivel de PLC consiste en una entrada digital que activa un enclavamiento de seguridad del programa de control. Es un detector de seguridad (normalmente cerrado), por lo que por defecto se recibe un 1 en el bit correspondiente. Tras una parada de emergencia la seta debe desenclavarse girándola hacia cualquier lado.

7.1.5. Cuadro de Control y Distribución

■ **PLC:**

El equipo que realiza las tareas de control, supervisión y comunicación está basado en un autómatas TSX Premium de Telemecanique. Los procesadores Premium TSX P57 gestionan toda una estación del autómatas formada por:

- Módulos de entradas/salidas TON
- Módulos de entradas/salidas analógicas
- Módulos de funciones específicas (contaje, comando de ejes, comando paso a paso, comunicación, etc.), que se pueden repartir entre uno o varios racks conectados en el Bus X.

El procesador utilizado es el TSX P57 104M. Se trata de un procesador de formato simple sin puerto Ethernet TCP/IP integrado.



Figura 7.1.5.1 – Procesador TSX P57 104M

A continuación se indican las principales características de este procesador:

- El procesador limita las entradas sobre el rack sobre el que está dispuesto (512 E/S digitales, 24 E/S analógicas y 8 vías específicas para aplicación)
- Tiene una conexión integrada compuesta por un enlace serie con 2 conectores (TER y AUX) 19,2 kbit/s

- El procesador limita el número máximo de conexiones (1 red Ethernet TCP/IP, Fipway, Ethway o Modbus Plus, 2 buses AS-i y 1 bus CANopen)
- La memoria del procesador máxima es de 96 kb prog.+ datos, ampliable mediante una tarjeta PCMCIA (224 kb prog.+ datos).

En este caso, el procesador dispone de una tarjeta PCMCIA de ampliación de memoria. La referencia de la tarjeta es TSXMFPP224K.

La comunicación entre el PLC y el ordenador es posible gracias a un módulo acoplador Ethernet TCP/IP de referencia TSX ETY 5103 con caudal 10/100 Mbit/s y clase Transparent Ready C30.



Figura 7.1.5.2 – Módulo TSX ETY 5103

El módulo ofrece, entre otros, los siguientes servicios:

- Gracias a la funcionalidad del agente SNMP, uno o dos administradores SNMP pueden supervisar los módulos.
- Gracias a la Exploración de E/S, pueden controlar entradas/salidas remotas en la red Ethernet.
- Incluyen un servidor HTTP integrado.
- Gracias a Datos globales, los módulos permiten el intercambio de datos entre estaciones de PLC estándar IEC.
- El control de ancho de banda permite verificar la reparación de las utilidades de los módulos.
- La utilidad Sustituir dispositivo defectuoso permite guardar la configuración del dispositivo en el módulo. En caso de avería, se podrá reiniciar otro módulo instalado vacío con los parámetros de configuración del anterior.
- El Servicio de notificación por correo electrónico envía mensajes de alarmas y eventos del controlador al destinatario designado.
- El Servicio de sincronización horaria actualiza los relojes del controlador con la hora universal coordinada (Universal Time Coordinated o UTC) desde un origen de referencia.

- El módulo TSX ETY 5103 ofrece la opción de crear páginas web de usuario y páginas de TCP abiertas.

Por otro lado, la comunicación del PLC con los sensores y actuadores de la planta se realiza a través de diversos módulos módulos, todos ellos alimentados a 24Vdc.

Para las entradas digitales se utiliza una tarjeta del tipo TSXDEY16FK, un módulo de 16 entradas Todo o Nada de conector de 16 vías rápidas de 24 Vcc y lógica positiva.



Figura 7.1.5.3 – Módulo TSXDEY16FK

Para las salidas digitales se utiliza un módulo del tipo TSXDSY08T22, de 8 salidas Todo o Nada de bloque de terminales de 8 vías estáticas protegidas de 24 Vcc para corriente continua (lógica positiva).



Figura 7.1.5.4 – Módulo TSXDSY08T22

Para las entradas analógicas se utiliza un módulo TSXAEY810. Se trata de una cadena de medida industrial de 8 entradas aisladas de alto nivel. Al estar asociado a los captadores o a los transmisores, permite realizar funciones de supervisión, de medida y de regulación de los procesos continuos. El módulo TSXAEY810 ofrece para cada una de sus entradas las gamas +/-10 V, 0..10 V, 0..5 V, 1..5 V, 0..20 mA o 4..20 mA, siendo la utilizada en la planta la última de ellas.



Figura 7.1.5.5 – Módulo TSXAEY810

Para las salidas analógicas se utiliza un módulo del tipo TSXASY800, un módulo con ocho salidas analógicas no aisladas entre sí que ofrece para cada una de sus entradas, y en función de la elección realizada en la configuración, las gamas: ± 10 V, 0..20 mA y 4..20 mA, siendo la utilizada en la planta la última de ellas.



Figura 7.1.5.6 – Módulo TSXASY800

■ **Relés:**

El conexionado requiere la existencia de relés que permitan activar los actuadores de la planta manteniendo aisladas las señales de control del resto de elementos de potencia. Los utilizados son relés de propósito general, de 2 polos, enchufables y con indicador LED verde que indica su estado, con pulsador de prueba modelo RSB de Telemecanique (unos se alimentan a 24Vdc y otros a 230Vac). Están instalados en las bases de 12A y 2NANC tipo RSZ.

Tensión de control	Corriente térmica	Número de contactos	Referencia	Identificación en la maqueta
24Vdc	8A	2NANC conmutados	RSB2A080BD + RSZE1S48M + RZM031RB	KQ10, KQ20, KQ30, KQ40, KQ50, KQ100, KQ110, KQ120, KQ130, KQ140
230Vac	8A	2NANC conmutados	RSB 2A080P7 + RSZE1S48M + RZM031RB	KQ60, KQ70, KQ80

Figura 7.1.5.7 – Características de los relés

■ **Contactores:**

En la planta hay instalados cuatro contactores, con los que se gobierna el autómata, la bomba centrífuga, la bomba circuladora y el calentador de agua. Los contactores instalados son tripolares para uso normal de tipo LC1K0610M7. Estos contactores disponen de una entrada auxiliar para confirmación de contacto.

Potencias normalizadas	Corriente asignada			Referencia	Identif. en la maqueta
de los motores trifásicos 50/60Hz	de empleo en AC-3	Contactos auxiliares instantáneos			
en categoría	440 V hasta				
AC-3					
220V	400V				
230V	415V				
kW	kW	kW	A		
1,5	2,2	3	6	1 NA	LC1 K0610M7
					KM1, KM2, KM3, KM4

Figura 7.1.5.8 – Características de los contactores

■ Térmicos:

Los térmicos son interruptores que previenen de sobreintensidades que puedan causar daños en los actuadores. Con ellos se protegen la bomba circuladora, el calentador y la bomba centrífuga. Sólo son rearmables manualmente, pero disponen de una conexión con el autómatas que permite saber si están actuados o no. Del mismo modo, disponen de un indicador lumínico anteriormente mencionado.

Potencias normalizadas de los motores trifásicos 50/60Hz en categoría AC-3			Zona de ajuste de los disparadores térmicos	Corriente de disparo magnético $I_d \pm 20\%$	Ref.	Identif. en la maqueta
220V	400V					
230V	415V	440V				
kW	kW	kW	A	A		
0,06	0,09	0,09	0,25...0,40	5	GV2-ME03	Q6
		0,12				
1,5	3	4	6...10	138	GV2-ME14	Q5
2,2	4					
2,2	5,5	5,5	14	170	GV2-L16	Q4
3						

Figura 7.1.5.9 – Características de los relés

■ Variador de frecuencia:

Este es el elemento de control más relevante en la planta, debido a que es el que se encarga de regular la potencia entregada al motor acoplado a la bomba circuladora y de este modo permite controlar la velocidad del motor. Este elemento permite realizar los controles de nivel, caudal y presión, siendo de otro modo la instalación inútil. El variador, entre sus múltiples funciones, permite ajustar los tiempos de arranque y parada de la bomba para evitar picos de intensidad e inconvenientes mecánicos de la bomba centrífuga. El aparato consta de una pantalla de 7 segmentos y botones para realizar las configuraciones oportunas antes de ponerlo a funcionar.



Figura 7.1.5.10 – Variador de frecuencia ATV 31HU11M2A de Telemecanique

El variador utilizado es el ATV 31HU11M2A de Telemecanique, diseñado para motores de potencia 1,1kW y con tensión de alimentación monofásica de 230V. Este variador es un convertidor de frecuencia para motores asíncronos trifásicos de jaula. Para el arranque, el variador va asociado a un disyuntor (que protege de cortocircuitos accidentales y permite el seccionamiento) y a un contactor (realiza el control y la gestión de seguridad, así como el aislamiento del motor en la parada). Del mismo modo, el variador de velocidad Altivar 31 está protegido a través de su electrónica contra los cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra, por lo que garantiza la continuidad de servicio, así como la protección térmica del motor.

Motor		Red				Altivar 31			
Potencia indicada en la placa		Corriente de línea	de	Potencia aparente	Icc presumible máx.	Corriente nominal	Corriente transitoria máx. durante 60s.	Potencia disipada con carga nominal	Referencia
		en U ₁	en U ₂						
1,1	1,5	12,1	10,2	2,4	1	6,9	10,4	74	ATV31HU11M2A

Figura 7.1.5.11 – Características del variador ATV 31HU11M2A de Telemecanique

■ Base de simulación

La base de simulación Telefast *ABE7 – TES160* permite tener acceso a las entradas y salidas digitales del autómatas de una manera mucho más cómoda, tanto por el cableado del mismo, como por la posibilidad de accionar las mismas de forma manual mediante los interruptores de que viene provisto. Este módulo va alimentado a +24V y tiene un pequeño fusible de protección capaz de soportar una corriente máxima de 2A. En la parte inferior de la base se pueden ver las borneras de conexión, a las que llega el cableado tanto de los sensores como el de los relés de control.

Cada interruptor del módulo *ABE7-TES160* tiene tres posiciones. Así, según la posición elegida, podemos disponer a través de dicha botonera de un máximo de 16 entradas, 12 salidas o cualquier combinación que no supere la asignación de 16 contactos.

Las posibilidades son las siguientes: Interruptor en posición 0 (centro): salida digital correspondiente del autómatas. Interruptor en posición 1 (derecha): entrada digital correspondiente del autómatas forzada a 1. Muy útil para comprobar el correcto funcionamiento del programa sin necesidad de estar el proceso en ejecución. Interruptor en posición 2 (izquierda): entrada y salida digital correspondiente del autómatas esperando señal externa o enviando señal interna. Esta es la opción necesaria para poder activar y desactivar entradas digitales procedentes desde un dispositivo exterior, en nuestro caso serán los sensores, para activar y desactivar salidas digitales desde el autómatas. En todos los casos a la activación de una entrada o salida se ilumina un led al lado del interruptor que nos indica la posición activa en cada momento.

■ Base Telefast ABE-7CPA31

La conexión del módulo analógico TSX AEY 810 a un accesorio TELEFAST 2 se realiza mediante el cable TSX CAP 030 garantizando la continuidad del blindaje. La base ABE-7CPA31 presenta alimentación aislada de los bucles de los captadores 4..20 mA para ocho vías de entrada aisladas entre sí.

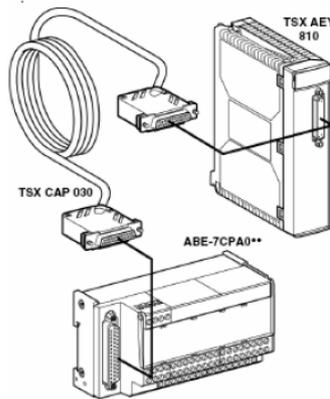


Figura 7.1.5.12 – Base Telefast ABE-7CPA31

■ Base Telefast ABE-7CPA02

Se trata de un accesorio de cableado TELEFAST2 analógico. Esta base distribuye ocho vías procedentes de un conector Sub-D de 25 puntos en bloques de terminales con tornillos. La conexión del módulo analógico TSX ASY 800 a un accesorio TELEFAST 2 ABE-7CPA02 se realiza a través del cable TSX CAP 030, lo que garantiza la continuidad del blindaje. Este accesorio es una base para conectar en el bloque de terminales con tornillos salidas de corriente y de tensión.

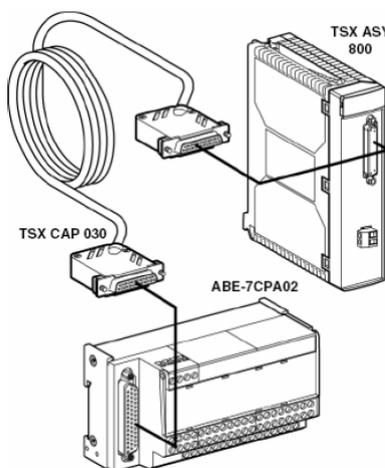


Figura 7.1.5.13 – Base Telefast ABE-7CPA02

■ Fuentes de alimentación:

Las fuentes de alimentación elegidas son los modelos ABL 7CEM y ABL 7RE de Telemecanique. Estas fuentes están destinadas a proporcionar la tensión continua necesaria para los circuitos de control de los equipos de automatismo. Con formato modular y conmutadas garantizan la calidad de la corriente de salida necesaria para los componentes alimentados. Estas fuentes de alimentación están equipadas con una protección electrónica.

En caso de sobrecarga o cortocircuito, la protección integrada interrumpe el suministro de corriente antes de que la tensión de salida descienda por debajo de 19 V. La tensión de salida recupera su valor nominal desde que desaparece el fallo, lo que evita cualquier intervención. Con una de las fuentes se alimentará la tarjeta de salidas digitales así como el transmisor de caudal de 4 hilos. Mediante otra fuente se alimentarán la tarjeta de salidas analógicas así como los servomotores que llevan las válvulas motorizadas.

Tensión de entrada	Secundario			Rearme	Referencia
	Tensión de salida	Potencia nominal	Corriente nominal		
100...240V -15%,+10% 50/60Hz	24Vdc	30W	1,2A	Automático	ABL7CEM24012
100...240V -15%,+10% 50/60Hz	24Vdc	72W	3A	Automático	ABLA7RE2403

Tabla 7.1.5.1 – Características de las fuentes de alimentación

■ Interruptor diferencial

Interrumpen automáticamente un circuito en caso de defecto de aislamiento entre conductores activos y tierra, igual o superior a 10, 30 o 300 mA. Los interruptores diferenciales ID se utilizan en el sector doméstico, terciario e industrial. El interruptor utilizado es de 30 mA, con un calibre de 25 A (ver figura 7.1.5.2).

N° POLOS	Sensibilidad (mA)	Calibre (A)	Referencia Referencia	Identificación en la maqueta
2	30	25	23523	ID

Tabla 7.1.5.2 – Características del interruptor diferencial

■ Interruptores magnetotérmicos

Son dispositivos de mando y protección contra las sobrecargas y cortocircuitos. Los interruptores utilizados son de 10 A (ver figura 7.1.5.3).

N° POLOS	Calibre (A)	Referencia Referencia	Identificación en la maqueta
1+N	10	27899	Q2, Q3

Tabla 7.1.5.3 – Características de los interruptores magnetotérmicos

Capítulo 8

Resultados finales

8.1. Puesta en marcha

8.1.1. Valoración inicial de la planta e identificación de fallos

A la hora de realizar la puesta en marcha es preciso analizar el correcto funcionamiento de todos los elementos de la misma. Para ello se dispone de un pequeño programa en Unity Pro XL (ver apartado 7.1) que permitía conectarse con la planta y encender, actuar y leer los diversos actuadores y sensores de la planta. Por lo tanto, la parte de conexionado del ordenador con el autómatas se dá por supuesta. Este programa simplifica mucho esta parte, ya que se pueden activar y leer datos simplemente utilizando una tabla de animación.

Entrando en el análisis de los elementos, el primer actuador comprobado fue el calentador, debido a que es posible activarlo sin necesidad de programación. Para activarlo, sólo es necesario situar el indicador del panel de mando en «MAN» e indicar una consigna manualmente en el mando frontal del calentador. Su funcionamiento se comprueba fácilmente si al mover el mando se enciende el piloto situado en el calentador. Este elemento no supuso ningún problema.

Siguiendo en el circuito de agua caliente, para que el calentador cumpla su función, es necesario que funcione solidariamente con la bomba circuladora. Esta bomba también puede ser activada desde el panel de mando posterior. Si embargo, en este punto se encuentra el **primer fallo**: la bomba circuladora se activa manualmente cuando el selector está en «AUTO» en lugar de cuando está en «MAN». A pesar de ese problema, al pulsar el pulsador «MARCHA» la bomba se activa, lo cual se puede comprobar mediante el indicador próximo al selector y colocando la mano sobre la propia bomba circuladora. Del mismo modo, el pulsador de «PARO» detiene la bomba. Al dejar fun-

cionando unos minutos la bomba se detecta que se calienta de forma anormal, lo cual podría ser debido a falta de uso, pero la bomba no logra refrigerarse y salta el térmico protector de la bomba de circulación situado en el panel de control. De este modo se detecta el **segundo fallo**.

El siguiente actuador a comprobar es el variador de frecuencia que controla la bomba. Para activarlo es necesario conectar la planta con el PC. Mediante el programa del que se dispone como datos de partida, se puede accionar el variador e introducirle la consigna, pero el programa no da los resultados esperados. Una vez comprobadas todas las condiciones de conexión en los planos, el variador se activa, pero no obedece a la consigna que se le indica en el PC, sino a la del mando del variador. Esto implica que hay que **reconfigurar el variador de frecuencia**. Sin embargo, esto se hará más adelante, y ahora proseguimos con el análisis de los elementos.

Aprovechando que ya está establecida la comunicación entre PLC y PC, se comprueban las válvulas servopilotadas. Enviando una consigna a las válvulas, se comprueba que todas responden correctamente. Su funcionamiento se puede evaluar comprobando que el piloto de cada una parpadee al cambiarle la consigna, y los extremos de «abierta» y «cerrada» se comprueban al hacer circular agua por el circuito correspondiente a cada una. Todas las válvulas servopilotadas funcionan bien.

Este no es el caso de la electroválvula, que si bien se activa el relé que la controla y presumiblemente también el solenoide de la misma, sigue sin permitir el paso de agua. En este punto se presentan tres opciones: que la válvula esté obstruida o su membrana rígida, para lo cual sería necesario abrirla y limpiarla, que el fallo sea un error de cableado, para lo cual habría que comparar la instalación con los planos, y que la válvula requiera una presión diferencial para actuarse mayor de la disponible. De este modo se observó que la electroválvula empleada necesitaba una presión diferencial de 0,5 bar para funcionar, o lo que es lo mismo, 5 metros de columna de agua por encima de ella para funcionar, condición física imposible en esta instalación. He aquí el **cuarto problema**, cuya solución no es otra que cambiar la electroválvula.

Manteniendo conectados PC y planta, se comprueban los sensores. En este punto no se valoran rangos de medida, sino el correcto funcionamiento y comunicación de los elementos con el autómatas. Los detectores de nivel son normalmente cerrados (NC), es decir, dan un nivel alto al activarse, cuando el nivel de líquido los alcanza. Los detectores funcionan todos correctamente, y cada uno se corresponde con su dirección. Por otro lado, se comprueban los sensores analógicos, para lo que hay que tener en cuenta la definición de las variables. Las variables analógicas se definen

como «canal» mediante 2 parámetros: el valor de la variable y un parámetro de error de canal que indica una mala conexión entre el autómata y el sensor.

	CH_Caudal	T_ANA_IN_GEN	%CH0.4.5	Medidor de caudal
	CH_ERR...	BOOL	%IO.4.5.ERR	Error de canal
	IN_Caudal...	INT	%IW0.4.5.0	Valor de entrada analógica

Figura 8.1.1.1 – Entrada analógica

En primer lugar, se comprueba el sensor de nivel, que es el que medirá el parámetro de control del presente trabajo. El programa no lee ningún valor, e indica un fallo en el parámetro de comunicación mencionado. Al inspeccionar el error, no se detecta ningún fallo apreciable, por lo que se plantea cambiar de canal. Este es el **quinto fallo**. El resto de sensores analógicos (caudalímetro, sensor de presión y medidores de temperatura) no indican ningún error de comunicación y dan valores conforme a lo esperado, aunque todavía no se valoran los rangos.

Por lo tanto, los fallos detectados son:

- Selector de la bomba circuladora mal conexionado
- Calentamiento anormal de la bomba circuladora
- Configuración errónea del variador de frecuencia
- Electroválvula no adecuada a las características de la planta
- Error en la comunicación con el sensor de nivel

8.1.2. Cambios en la planta

Los cambios a realizar son los siguientes

- **Selector de la bomba circuladora mal conexionado:**

La solución al problema es cambiar el conexionado, de forma que sólo es necesario invertir los cables de entrada al selector.

- **Calentamiento anormal de la bomba circuladora**

En primer lugar, para desmontar la bomba se vacía el circuito de agua caliente mediante una válvula manual de vaciado. Al vaciarlo, el calentador permanece lleno gracias a una válvula de purga con antirretorno colocada a la entrada de

agua fría al calentador (a la salida de la bomba). La bomba se desmota fácilmente, y se comprueba que está parcialmente obturada. Posteriormente se limpia y se vuelve a instalar, volviendo a llenar el circuito a través del depósito de expansión hasta que se alcanza un nivel superior al marcado por el detector de nivel inferior. Tras instalarla, se vuelve a probar la bomba, y tras drenar todo el aire, se comprueba que se autorrefrigera normalmente y funciona correctamente.

■ Configuración errónea del variador de frecuencia

Es necesario configurar el variador de frecuencia en cuanto a la entrada de la consigna desde el PC y las rampas de aceleración y deceleración de la bomba, aunque el variador permite muchas más opciones. En las figuras siguientes se indican las opciones seguidas en los menús del propio variador para ajustar su configuración.

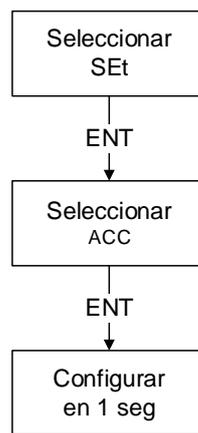


Figura 8.1.2.1 – Configuración del tiempo de aceleración

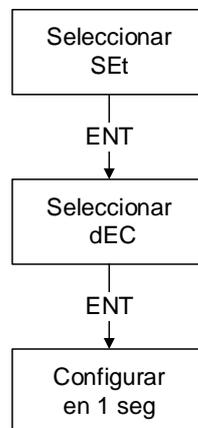


Figura 8.1.2.2 – Configuración del tiempo de deceleración

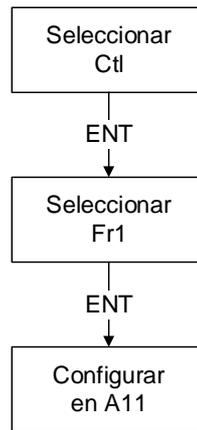


Figura 8.1.2.3 – Configuración de entrada desde el PLC

■ **Electroválvula no adecuada a las características de la planta**

La electroválvula disponible no puede ser actuada con los medios disponibles y no es adecuada para la instalación de la planta. Por lo tanto, se decide cambiar el modelo por otro que no necesite una presión diferencial para su funcionamiento. El modelo elegido es del mismo fabricante (CEME), pero no necesita una presión mínima para funcionar. Sus características se especifican en la siguiente tabla.

REFERENCIA	C.E.M.E. 8416
TIPO	Normalmente cerrada
PRESIÓN DE TRABAJO	0-10 Bar
ACCIONAMIENTO	AC 230V 50 Hz

Tabla 8.1.2.1 – Características de la electroválvula modificada

■ **Error en la comunicación con el sensor de nivel**

Como se comentó anteriormente, el canal establecido da errores cuyo origen no es sencillo de identificar, por lo que se decide cambiar el cableado para establecer el canal 6 como canal de comunicación, en lugar del canal 4 (ver plano **Entradas Analógicas 6**). Del mismo modo este cambio se extiende al direccionado de las variables del sensor de nivel (control de error y valor del sensor).

8.1.3. Programa de test

Una vez comprobado el funcionamiento de todos los elementos, es necesario realizar la programación del autómata para realizar un primer programa de test. En él, se deberá comprobar el correcto funcionamiento de los sensores y actuadores visualmente mediante una pantalla de explotación, así como monitorizar problemas en la planta y obtener los valores reales de los sensores.

De este modo, el siguiente paso es realizar el escalado de todas las variables analógicas para obtener los valores reales mediante las oportunas linealizaciones o cambios necesarios.

- Presión:** para el escalado de la presión se utiliza un medidor auxiliar de aguja que indica la presión en bares. Por ello, se evalúa la medida enviada al PLC y se compara con la del medidor, de forma que coincidan. El resultado es el mostrado en la figura 8.1.3.1, en la que se observa el escalado de la presión para obtener un valor real.

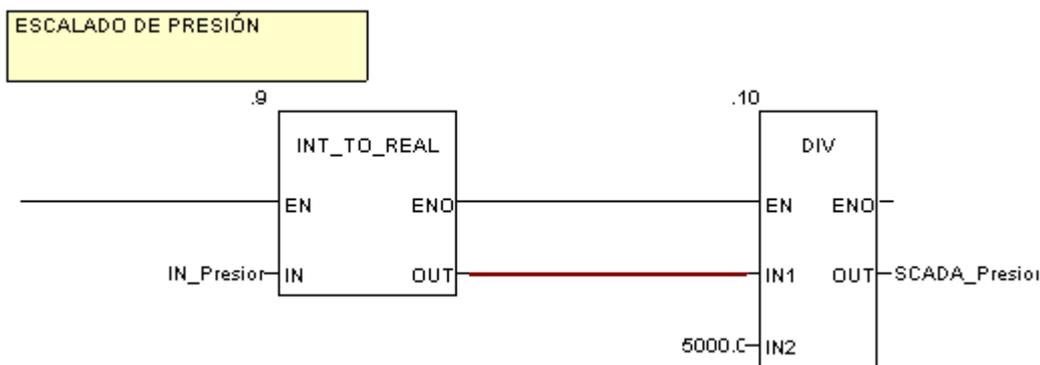


Figura 8.1.3.1 – Escalado de presión

- Nivel:** en el caso del escalado de nivel no se dispone de un medidor auxiliar, por lo que el método de calibración es diferente. Para ello se realizan dos medidas, una con el depósito vacío (con un poco de agua residual que queda debido a la colocación del medidor) y otra con el depósito lleno, y se linealiza el rango, dando una medida de 0 a 100%. Por otro lado, la temperatura es un parámetro fundamental que influye en el nivel de agua, por lo que es necesario realizar otro proceso de linealización. En este caso, se realiza una medida con el líquido de proceso a temperatura ambiente, y otra con el líquido a una temperatura superior. El líquido de proceso se calienta gracias al intercambiador de calor con el agua caliente, actuando el calentador, la bomba circuladora y la bomba centrífuga, manteniendo la válvula servopilotada de tres posiciones en la posición de intercambio de calor. Este proceso sólo se realiza una vez y para recalibraciones

de nivel, se mantiene el escalado de temperatura. La opción de recalibrado mediante temperatura no se contempla en este programa debido a que el tiempo de calentamiento del agua hasta una temperatura adecuada excede el tiempo de simulación permitida por el software de SCADA disponible (Vijeo Citect), que es de 15 minutos.

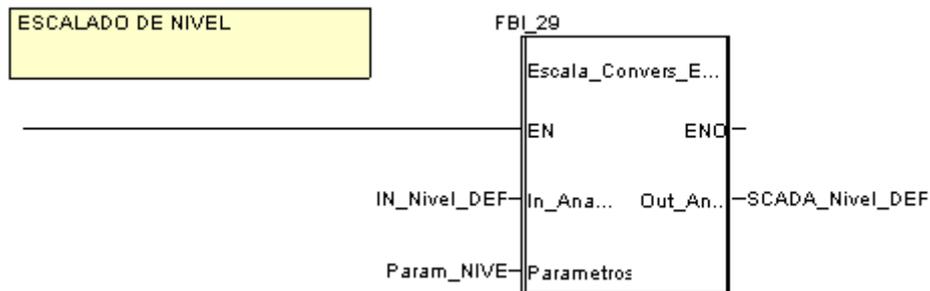


Figura 8.1.3.2 – Escalado de nivel

El escalado se realiza gracias a un bloque disponible como datos iniciales y previamente programado que consta de un redondeo y un escalado (ver el apartado 9.2 de anexos *Datos de partida*).

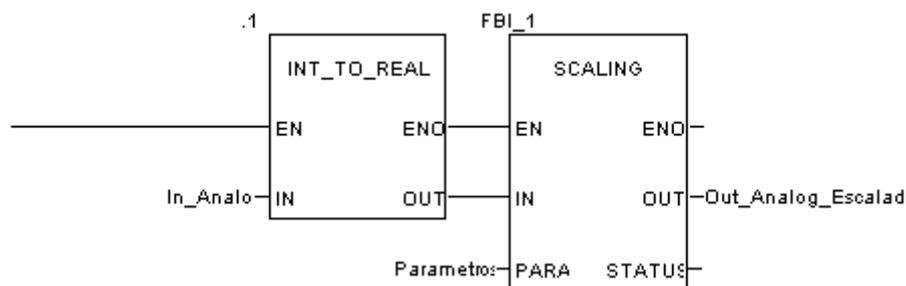


Figura 8.1.3.3 – Bloque de función de escalado de entradas analógicas

- Temperatura:** el escalado de temperatura se realiza de modo análogo al de presión, es decir, por comparación con un medidor ya calibrado. Como medidor auxiliar se utiliza un termómetro digital, que se introduce en el agua de proceso mientras ésta circula, para obtener una temperatura uniforme en todo el circuito de proceso. Como todos los sensores son del mismo tipo, sólo se calibra la medida de un sensor, y ésta se extrapola al resto.

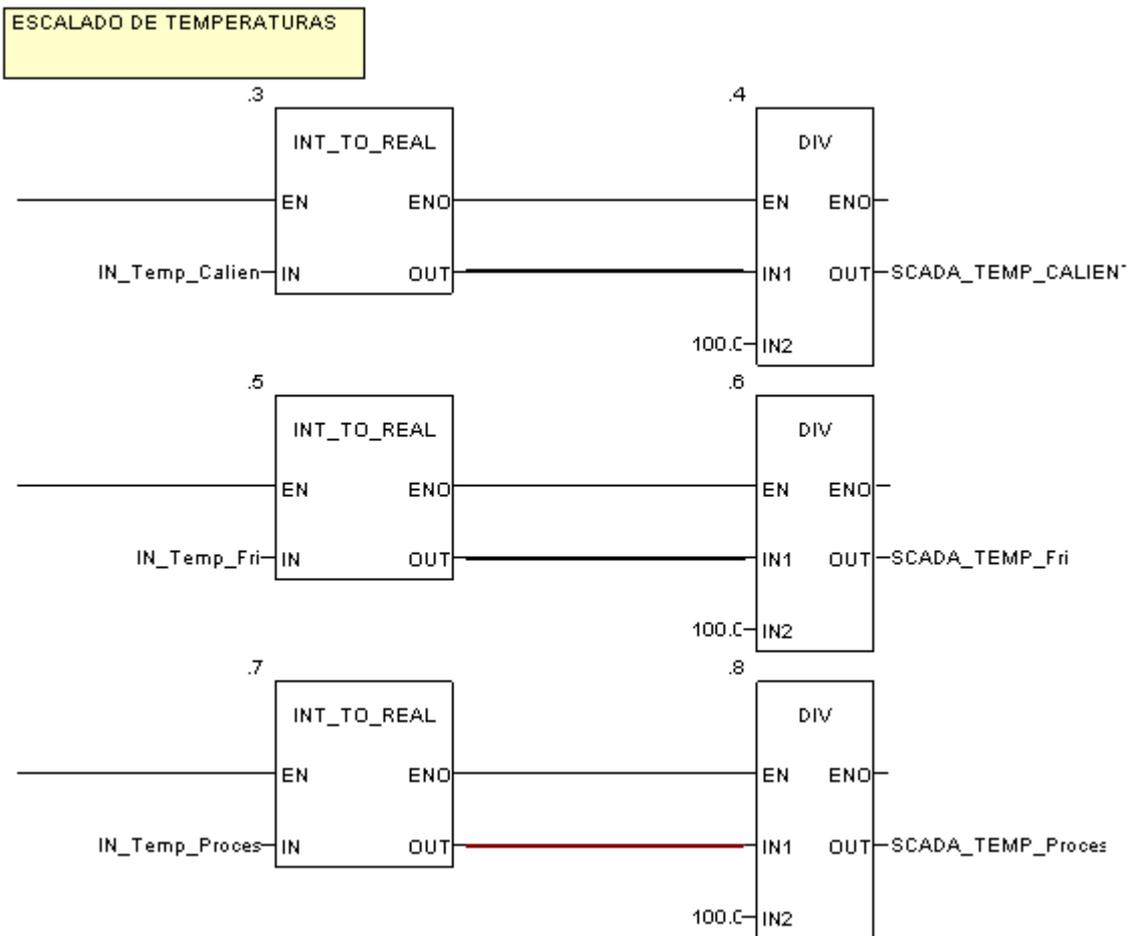


Figura 8.1.3.4 – Escalado de temperatura

- Caudal:** la medida de caudal está condicionada al diámetro nominal de la tubería sobre el que está instalado. De este modo, según la instalación, la medida de caudal es la mitad de la real. El caudalímetro, según indica el fabricante, mide en un rango de 0 a 7500 l/h, por lo que según la instalación, el caudal medido puede llegar a ser de 15000 l/h, siendo el caudal máximo entregado por la bomba de 10800 l/h. De este modo, como se muestra en la figura 8.1.3.5, se ajusta el valor de caudal multiplicándolo por 0.75 (el valor de entrada va de 0 a 10000) y luego por 2 (el doble de caudal), o lo que es lo mismo, por 1.5-

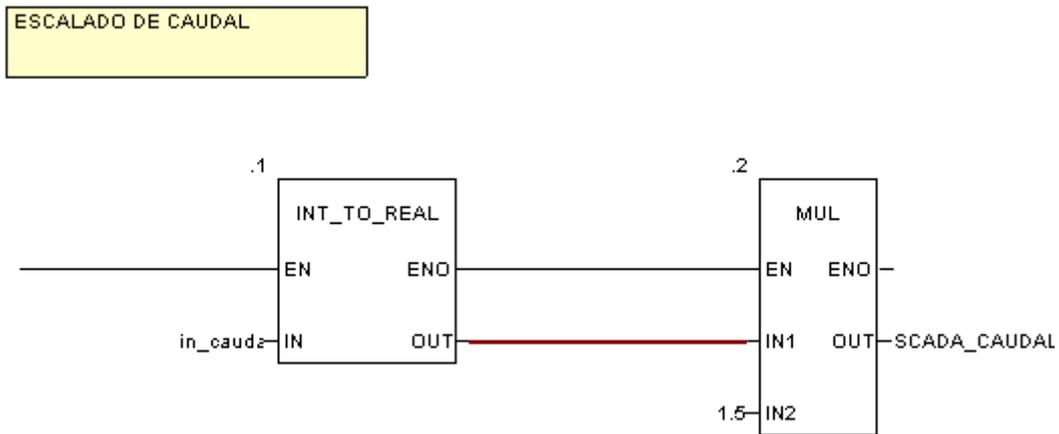


Figura 8.1.3.5 – Escalado de caudal

Por otro lado, es necesario relacionar las variables de control con las variables de actuación, para lo cual se requieren bloques que realicen la función inversa de los anteriores. Los elementos a actuar son:

- Bomba centrífuga y variador:** el variador de frecuencia se habilita accionando un contactor, por lo cual antes ponerlo en marcha se verifica la activación de dicho contactor mediante la variable *IN_Bomba_Confirm*. Además, hay que tener en cuenta que el presostato no esté acivado, así como el térmico de la bomba, como se muestra en la figura 8.1.3.6.

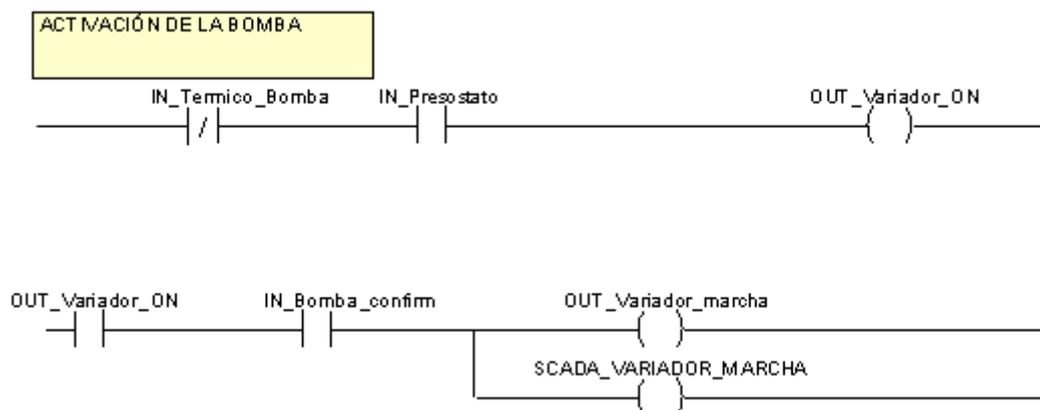


Figura 8.1.3.6 – Activación del variador

- Consigna del variador:** el variador de frecuencia que controla el funcionamiento de la bomba centrífuga se controla enviando un valor entero entre 0 y 10000, para lo cual se utiliza un bloque disponible como datos iniciales (ver el apartado

9.2 de anexos *Datos de partida*) y previamente programado que consta de un escalado, que convierte la consigna de 0 a 100 en un valor de 0 a 10000 para enviarlo al variador, y un redondeo, como se ve en la figura 8.1.3.7.

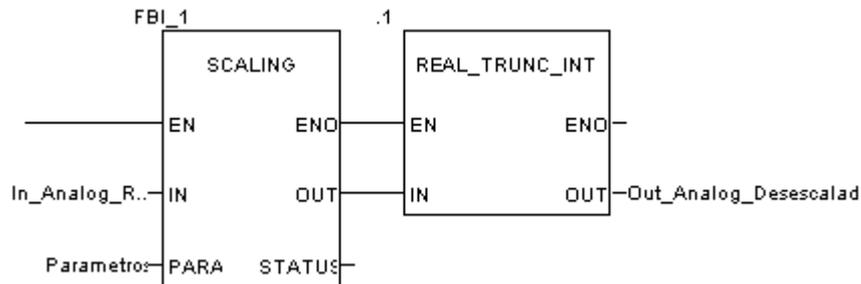


Figura 8.1.3.7 – Bloque de función de desescalado

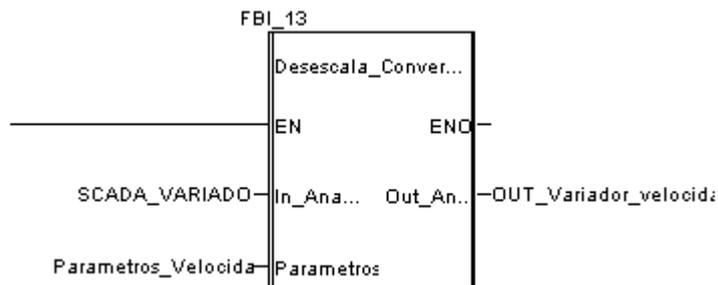


Figura 8.1.3.8 – Control de consigna del variador

- Válvulas servopilotadas:** al igual que el variador de frecuencia, las válvulas se controlan mediante un valor entre 0 y 10000. El parámetro de control varía entre 0 y 100, por lo que para enviar un dato a la servoválvula sólo es necesario una multiplicación por 100 y una conversión de real a entero. Las válvulas servopilotadas no se posicionan automáticamente, sino que tardan 1 minuto en desplazarse de totalmente abierto a totalmente cerrado, o lo que es lo mismo, se mueven 1.66% de su rango cada segundo. Por lo tanto, en el bloque de control de las válvulas también se calcula el valor actual y si está en movimiento la válvula o no, de forma que cada segundo el valor actual se actualiza (se le suma 1.66 o se le resta) en función de la consigna de la válvula.

```

IF SP<>ANTERIOR THEN OUT:=REAL_TO_INT(SP*100.0);
  ESTADO:=1;
  IF SP<ANTERIOR THEN ACTUAL:=ANTERIOR-1.66;
    IF SP>ACTUAL THEN ACTUAL:=SP;
      ESTADO:=0;
    END_IF;
  ELSIF SP>ANTERIOR THEN ACTUAL:=ANTERIOR+1.66;
    IF SP<ACTUAL THEN ACTUAL:=SP;
      ESTADO:=0;
    END_IF;
  END_IF;
END_IF;

```

Figura 8.1.3.9 – Bloque de función válvula

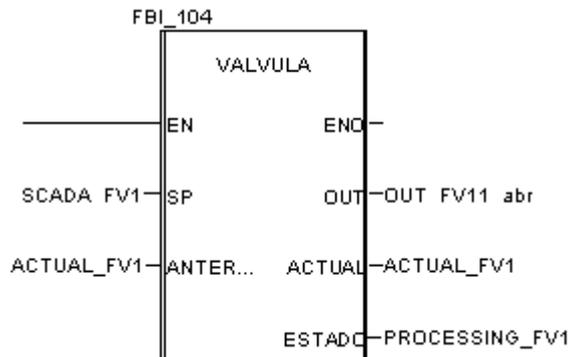


Figura 8.1.3.10 – Control de posición de válvula

- **Electroválvula:** la causa de que sea necesaria una variable auxiliar para actuar este elemento es que tanto desde la pantalla de explotación de Unity Pro como desde Vijeo Citect sólo se pueden modificar variables de memoria del PLC.



Figura 8.1.3.11 – Activación de la electroválvula

- **Calentador:** consta, al igual que la bomba centrífuga y la circuladora, de una protección térmica que inhabilita su funcionamiento cuando se activa.



Figura 8.1.3.12 – Activación del calentador

- **Bomba circuladora:** la circuladora está diseñada para funcionar de forma conjunta con el calentador, pero en este caso se considera su funcionamiento independiente.

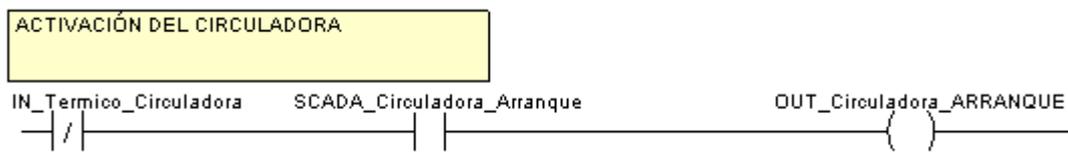


Figura 8.1.3.13 – Activación de la bomba circuladora

Por otro lado, es necesario garantizar el correcto funcionamiento de la planta, por lo que hay que realizar los continuos controles de todos aquellos parámetros que indiquen un funcionamiento inadecuado de la planta. Este control se realiza en una sección independiente en el programa del autómeta

- Control de niveles

Se evalúan los estados de los detectores de nivel, identificando sobreniveles y depósitos vacíos. Si se da alguno de estos supuestos, se desactiva el variador, como se puede ver en la figura 8.1.3.14

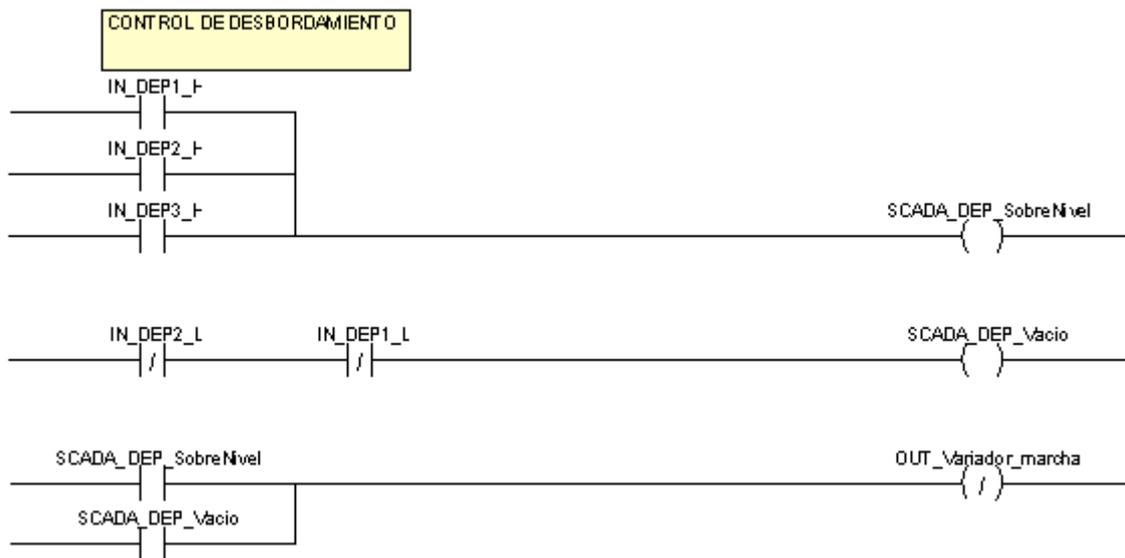


Figura 8.1.3.14 – Control de niveles

■ **Control de térmicos**

Se evalúa el estado de los térmicos, de forma que se pasan los valores de entrada de térmicos a memoria, estableciendo una variable global y otra específica para cada térmico, como se puede ver en la figura 8.1.3.15.

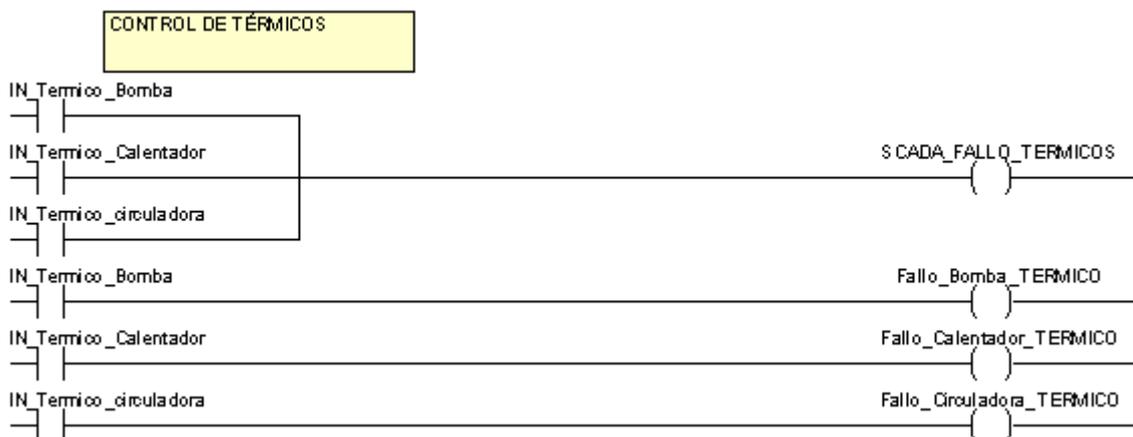


Figura 8.1.3.15 – Control de térmicos

■ Control de confirmación de contactor

Los contactores tienen una salida auxiliar que indica al autómatas cuando se actúan. Para dar tiempo a que se actúen antes de leer el estado de los mismos, se temporiza 0.5 seg, y si no se activa el contactor, se activa una variable de fallo, como se puede ver en las figuras 8.1.3.16, 8.1.3.17 y 8.1.3.18.

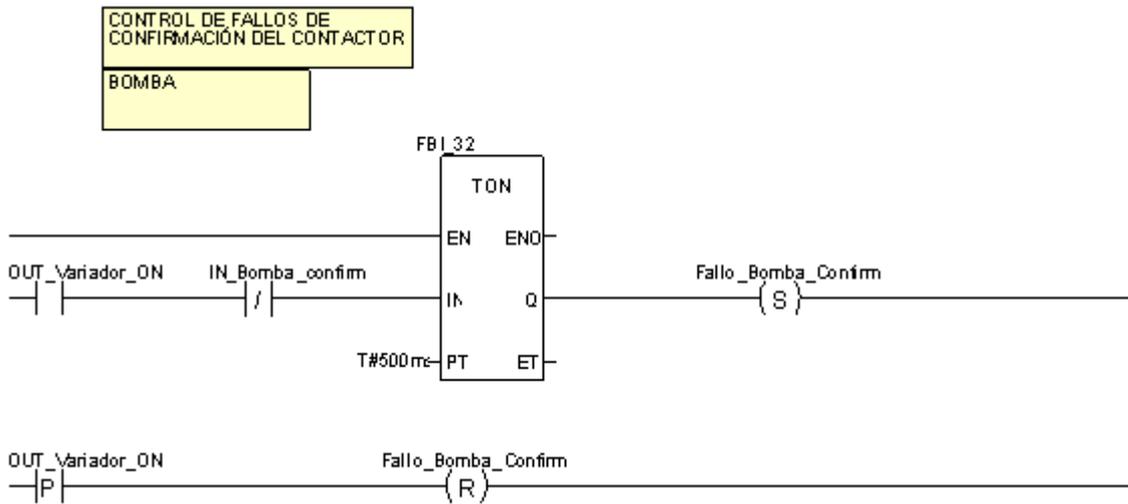


Figura 8.1.3.16 – Control de confirmación de contactor de la bomba centrífuga

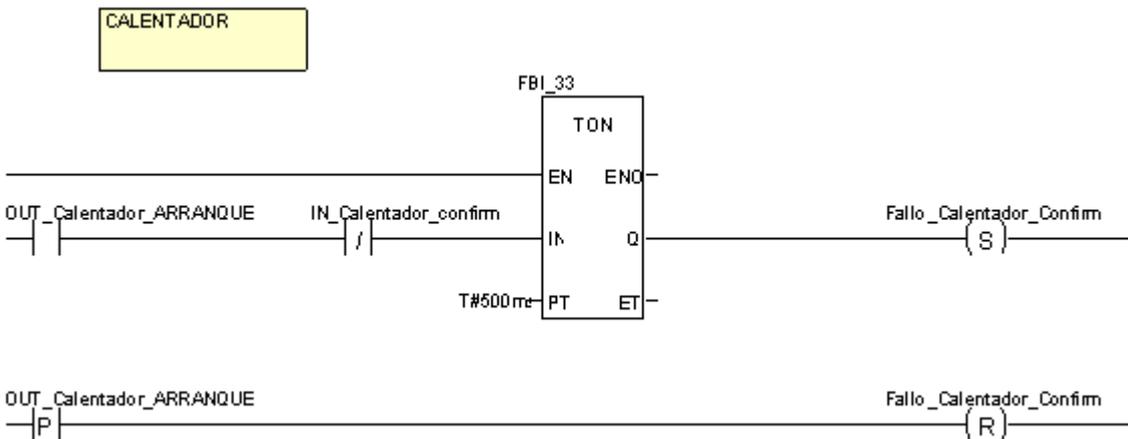


Figura 8.1.3.17 – Control de confirmación de contactor del calentador

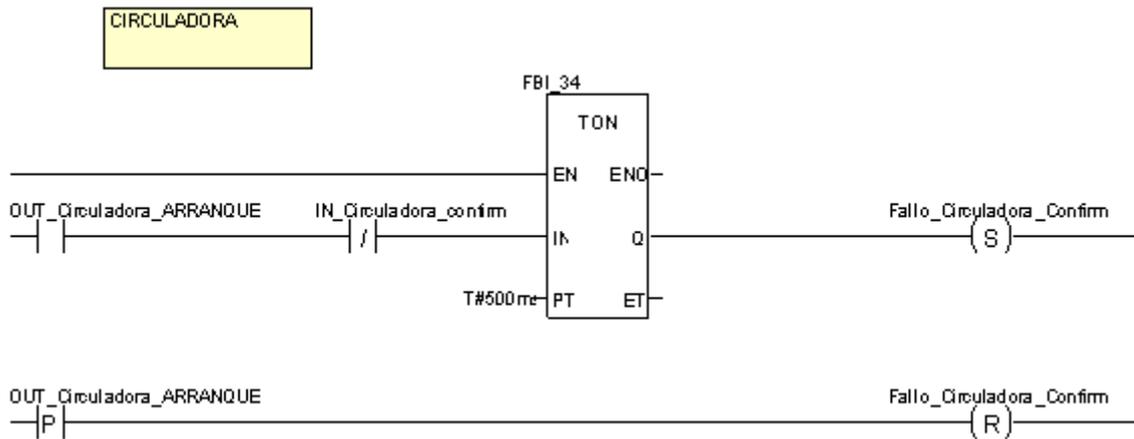


Figura 8.1.3.18 – Control de confirmación de contactor de la bomba circuladora

■ Control comunicación

Todas las variables de comunicación con los sensores y actuadores analógicos tienen una variable de monitorización de error. Estas variables se comprueban, y si se produce algún error, se activa la variable de memoria *SCADA_FALLO_CANAL*.

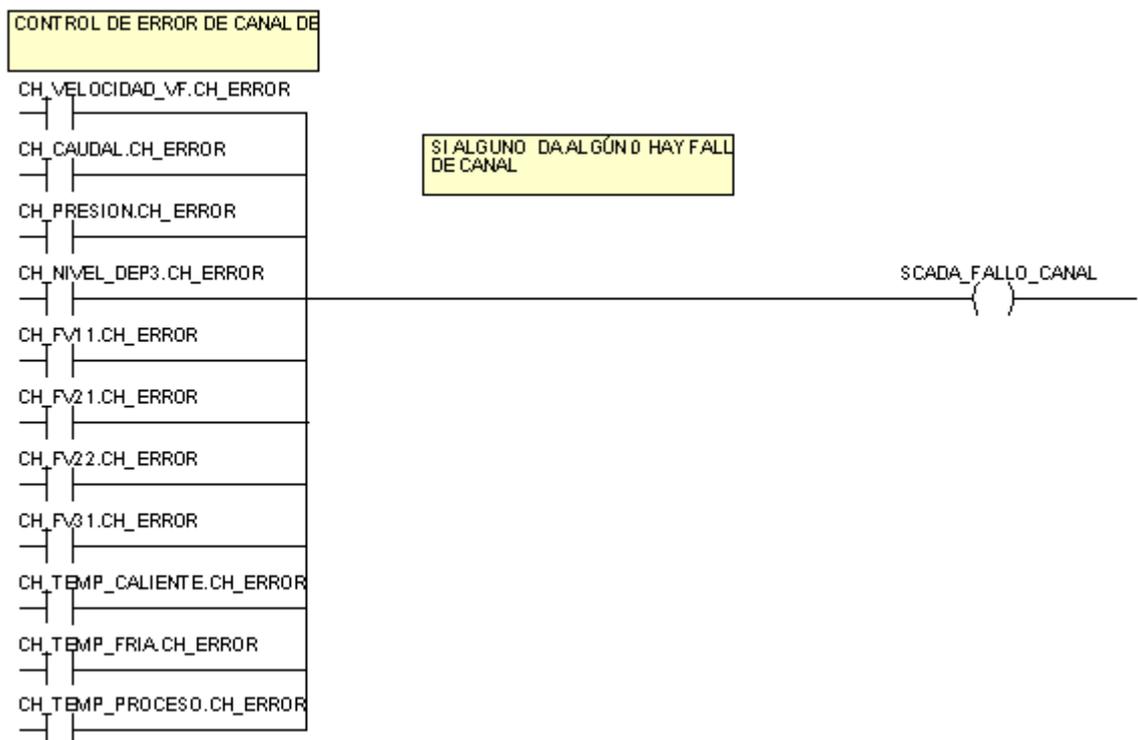


Figura 8.1.3.19 – Control de confirmación de comunicación

Una vez programado, se muestran todas las variables en una pantalla de explotación de Unity, para lo cual hay que asignarles direcciones de memoria. Este primer

programa sirve como una primera prueba del funcionamiento de todos los elementos, pero todavía no consta de una gestión de seguridad ni de mando, y el funcionamiento de la planta sólo se encuentra condicionado a las condiciones de cableado. De este modo el programa de test no es válido para gestionar la planta pero sirve como buena base para la programación más ampliada de la planta.

8.2. Gestión de etapas

Toda la programación de la planta se realiza en función de la guía GEMMA. La guía GEMMA es una guía para un estudio sistemático de todos los modos o estados en que se puede encontrar un proceso automatizado. Esta guía establece los diferentes estados que puede atravesar un sistema automatizado, y del mismo modo establece la denominación y características de cada uno de dichos estados. La base de esta programación es el funcionamiento por etapas, correspondiéndole a cada etapa una acción o un determinado grupo de acciones.

La programación se guía por las siguientes directivas:

- Las secciones correspondientes a la guía GEMMA se programarán en SFC
- Las acciones se programarán en una sección aparte y no en cada estado
- Se buscará el lenguaje más claro para cada parte de la programación
- Se procurará la claridad y simplicidad en el código, creando bloques de función derivados cuando sea necesario

La Guía GEMMA establece modos de funcionamiento «estándar», que se clasifican en modos de funcionamiento en fallo, cuando la planta trabaja en error, modos de parada, cuando el funcionamiento de la planta está detenido, y modos de funcionamiento, que pueden ser de diversos tipos, como se puede ver en la figura 8.2.0.21. En el presente proyecto se contemplan los siguientes estados de GEMMA:

- Proceso en funcionamiento
 - **F1**: estado en el que la máquina produce normalmente, que en este caso se corresponde con el modo automático.
 - **F4**: la máquina está bajo control del operario que realiza cualquier movimiento o determinados movimientos preestablecidos, y en este caso se corresponde con el modo manual.

- **F6**: realiza operaciones de ajuste y mantenimiento, y en este caso se corresponde con la recalibración de nivel.

■ Proceso en parada

- **A1**: estado de reposo de la máquina.
- **A4**: es un estado de reposo de la máquina distinto del estado actual, y se corresponde con la parada en modo manual.
- **A6**: operaciones necesarias para llevar al sistema al estado inicial desde situaciones diferentes a la de producción, y en la planta se utiliza para volver de un estado de fallo.

■ Proceso en fallo

- **D1**: estado al que evoluciona un sistema después de una parada de emergencia. Se activa con la seta de emergencia.
- **D2**: estado que permite el examen de una máquina para determinar los motivos de fallo. La planta va a este estado al producirse un fallo distinto a la seta de emergencia.

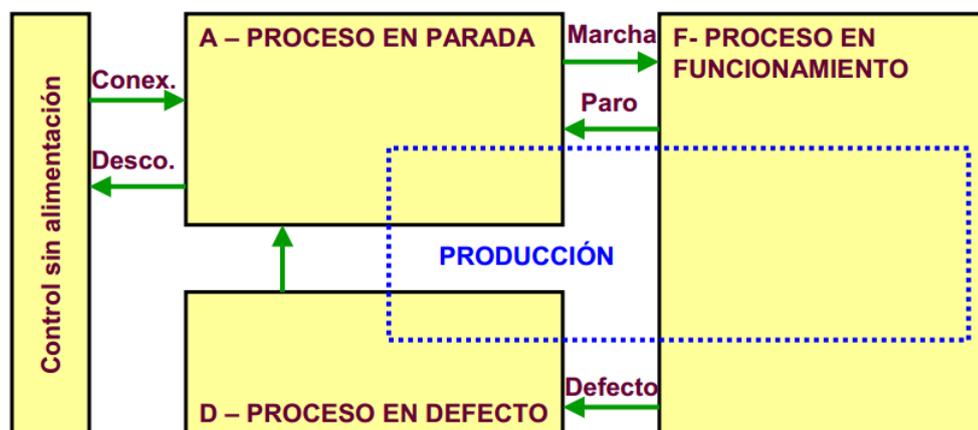


Figura 8.2.0.20 – Guía GEMMA

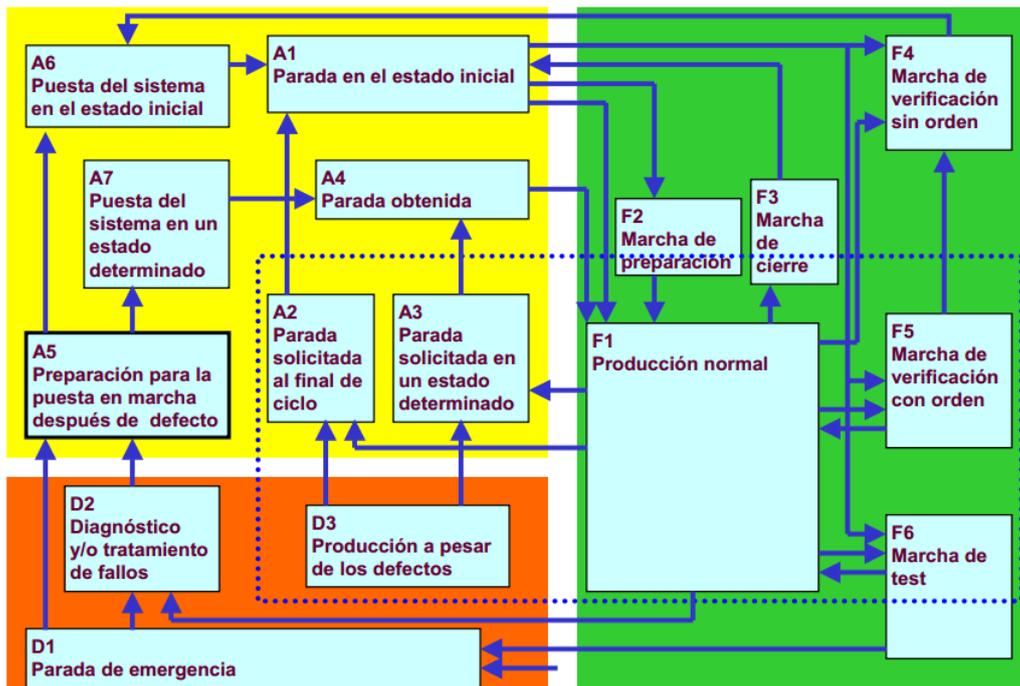


Figura 8.2.0.21 – Procesos de la guía GEMMA

8.2.1. Gestión de seguridad

La prioridad máxima en una automatización es la seguridad, de modo que ante una parada de emergencia o ante una situación de fallo el sistema debe evolucionar hacia un estado seguro. La gestión de seguridad se lleva a cabo en una sección SFC, que es la más importante y la que limita y controla el resto de secciones. En ella, se contemplan 2 situaciones: un fallo de emergencia causado por la pulsación de la seta, o un fallo producido por el funcionamiento de la planta (fallo por sobrenivel, fallo por térmico o fallo por sobrenivel o falta de agua en algún depósito). En cada caso, la planta evoluciona hacia un estado distinto, y estos serán programados en la sección de funcionamiento.

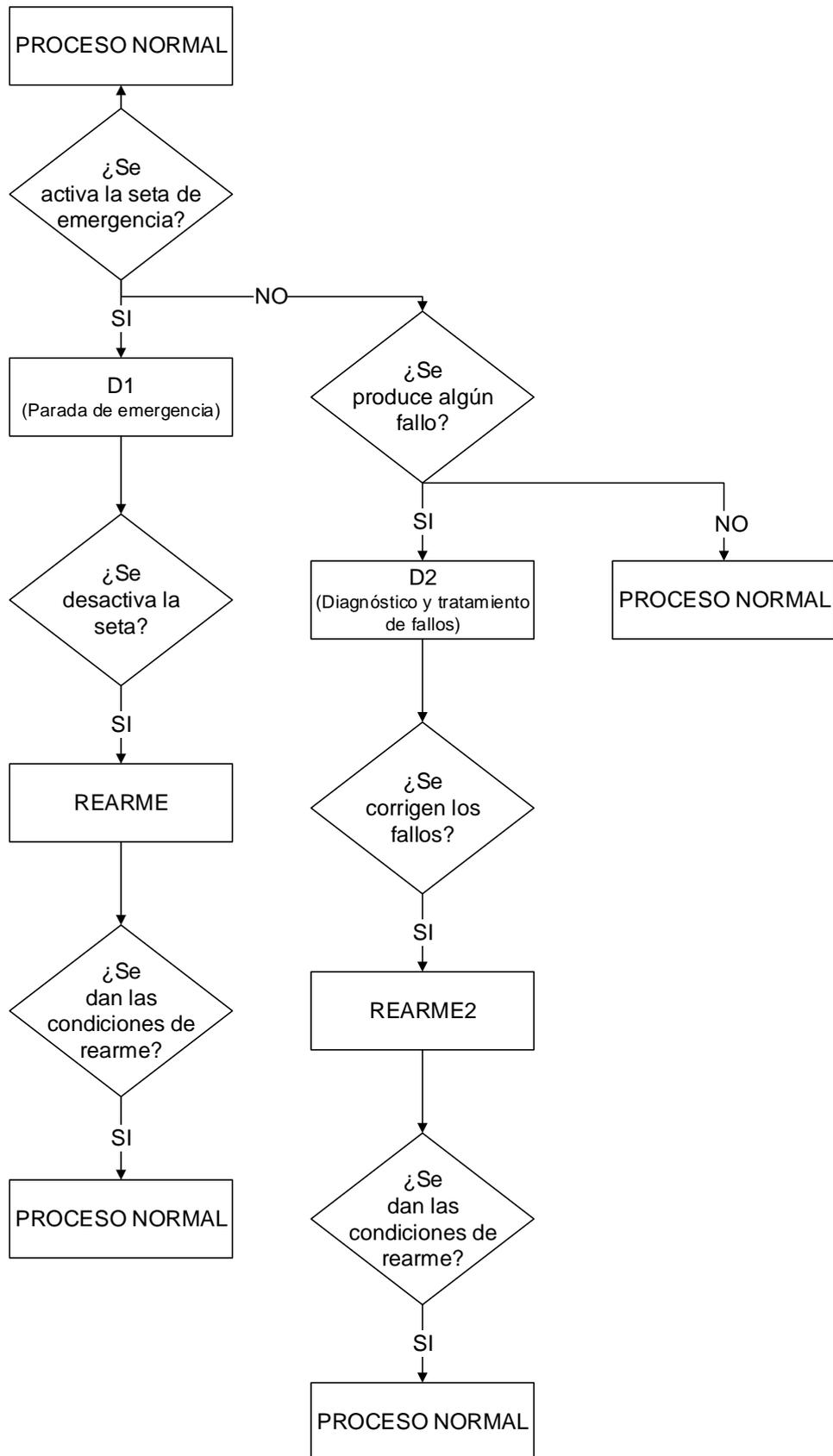


Figura 8.2.1.1 – Flujograma de la sección de seguridad

Al producirse alguna de las dos situaciones mencionadas (D1 o D2), es necesario deshabilitar el funcionamiento de los graficets de mando y de funcionamiento, y tras el rearme hay que partir de unos estados determinados. Cabe destacar que al modificar estas secciones, también se impide que se realice cualquier acción (condicionadas a las etapas), pero las secciones de control y escalado que no están ligadas a ninguna etapa siguen ejecutándose normalmente.

Los bloques utilizados para esta función son: «*CLEAR_CHART*», utilizado para inhabilitar el funcionamiento de cualquier etapa en una sección SFC determinada; «*SET_STEP*» para establecer el estado del que queremos que parta la sección en una situación de rearme; y «*INIT_CHART*», que activa el estado inicial o estados iniciales de la sección determinada.

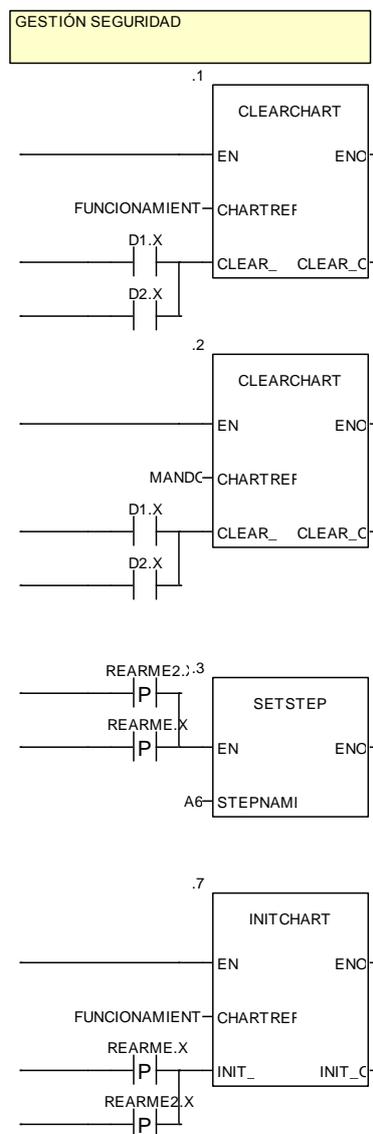


Figura 8.2.1.2 – Configuración de los estados en una situación de fallo

■ Parada de emergencia

La activación de la seta de emergencia supone, por hardware, la supresión de alimentación a todos los elementos actuables, de modo que mientras la seta permanezca pulsada no se podrán realizar acciones, aunque se siguen leyendo valores de los sensores, pues no se corta la alimentación del autómata. Por otro lado, una vez desbloqueada la seta (girándola hacia un lado) se produce una recalibración de las válvulas servopilotadas, por lo que es preciso esperar un tiempo prudencial antes de que la planta se encuentre en una situación controlada. El tiempo esperado son 120 segundos, tiempo suficiente para que cada válvula vaya de totalmente abierta a totalmente cerrada y para que se vuelva a posicionar totalmente abierta. Una vez transcurrido, es preciso pulsar marcha para que la planta vuelva a su funcionamiento normal en el momento determinado.

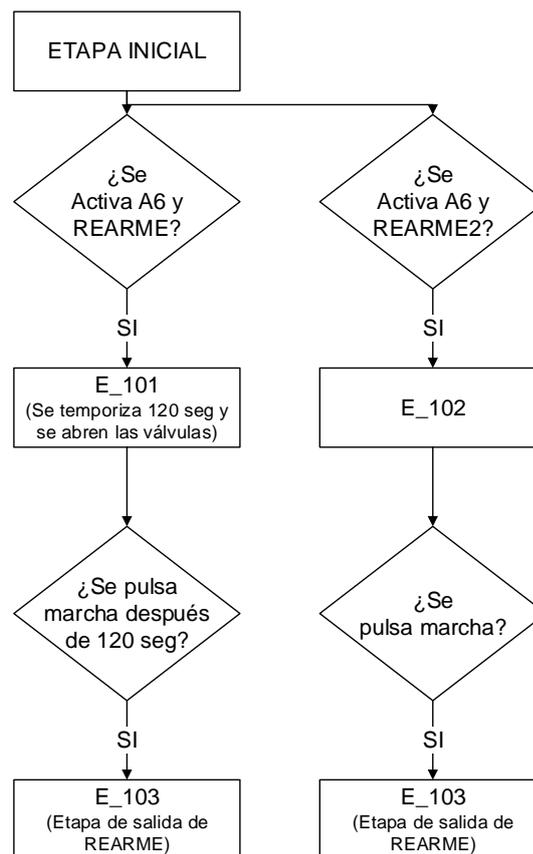


Figura 8.2.1.3 – Flujograma de salida de situación de fallo o de emergencia

■ Diagnóstico y/o tratamiento de fallos

La diferencia a la hora de gestionar los modos de funcionamiento en error (D1 y D2) es que en el rearme de la pulsación de la seta, se abren todas las válvulas para permitir el vaciado de los depósitos y para partir de una situación controlada, mientras que el rearme de la situación de fallo, no se realiza ninguna operación.

8.2.2. Gestión de mando

Desde la sección de mando se controlan los modos de funcionamiento generales de la planta sin entrar en las secuencias específicas de funcionamiento de la planta. En el presente proyecto se establecen 3 modos de funcionamiento:

- **MANUAL (F4)**: el modo manual es muy similar al programa de test descrito el apartado anterior. En este modo, se puede actuar cualquier elemento y llevarlo a cualquier estado, pero no se realizan funciones de control de nivel. Sin embargo, todas las funciones de seguridad y monitorización de variables siguen activas. Además, en este modo se pueden detener las acciones en la planta por medio de un pulsador de «PARO» y volver a activarlas mediante un pulsador de «MARCHA». En este modo se parte de un estado de parada obtenida A4, al cual se vuelve al pulsar «PARO».
- **AUTOMÁTICO (F1)**: en el modo automático es donde se realizarán los distintos controles de nivel planteados. La elección de uno u otro modo se decide en la etapa de funcionamiento.
- **RECALIBRACIÓN DE NIVEL (F6)**: en esta etapa, se recalibra el sensor de nivel, de forma que es necesario llenar el depósito de control hasta activar el detector de nivel situado en su borde superior para leer el valor de presión que da el sensor de nivel. Con este valor, es posible recalibrar los parámetros de nivel. La recalibración está pensada para un cambio de líquido y no para una recalibración de la planta con el mismo líquido, de forma que los parámetros de temperatura quedan anulados.

La recalibración se inicia con una pulsación de «MARCHA», con lo cual se comienza cerrando la servoválvula de vaciado del depósito y la electroválvula (que no se puede activar en este estado) y abriendo la de llenado. A continuación, se activa la bomba a máxima potencia y se llena el depósito hasta alcanzar el detector de nivel. En este momento, ya está disponible la medida del sensor con el depósito lleno, por lo que se recalculan los parámetros de control de nivel. Al acabar el llenado, se abren la servoválvula de vaciado y la electroválvula durante

60 segundos (tiempo para que la válvula motorizada se posicione), y se vuelve al funcionamiento normal.

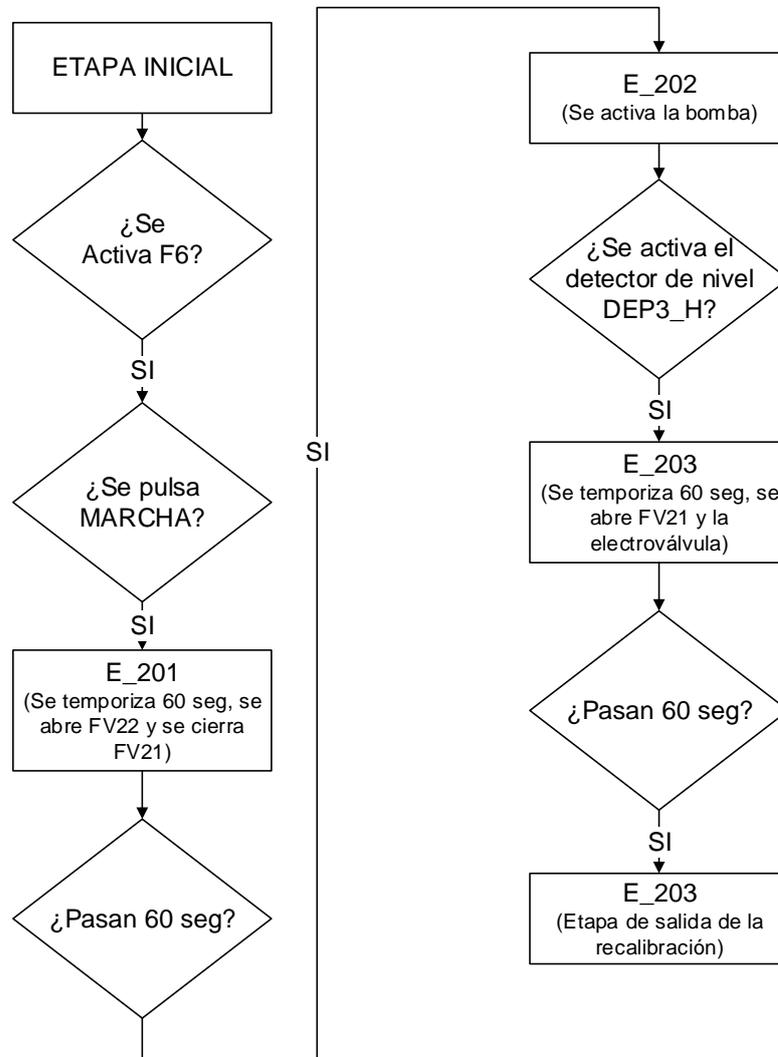


Figura 8.2.2.1 – Flujograma de salida de recalibración de nivel

8.2.3. Gestión de funcionamiento

En la sección de funcionamiento se establecen las etapas y las transiciones, de forma que se establecen unos flujos de funcionamiento de la planta. En este caso, al ser la planta fundamentalmente un proceso continuo, las etapas o estados no responden tanto a un proceso secuencial sino a las diferentes situaciones en las que puede estar funcionando.. En la sección de funcionamiento se programan tres flujogramas diferentes:

- Flujograma de **recalibración de nivel** (figura 8.2.2.1)

- Flujograma de **gestión de rearmes** (figura 8.2.1.3)
- Flujograma de **funcionamiento en modo automático**. Este flujograma responde a la necesidad de dividir los diferentes estados en los que puede operar la planta cuando se encuentra en modo automático.

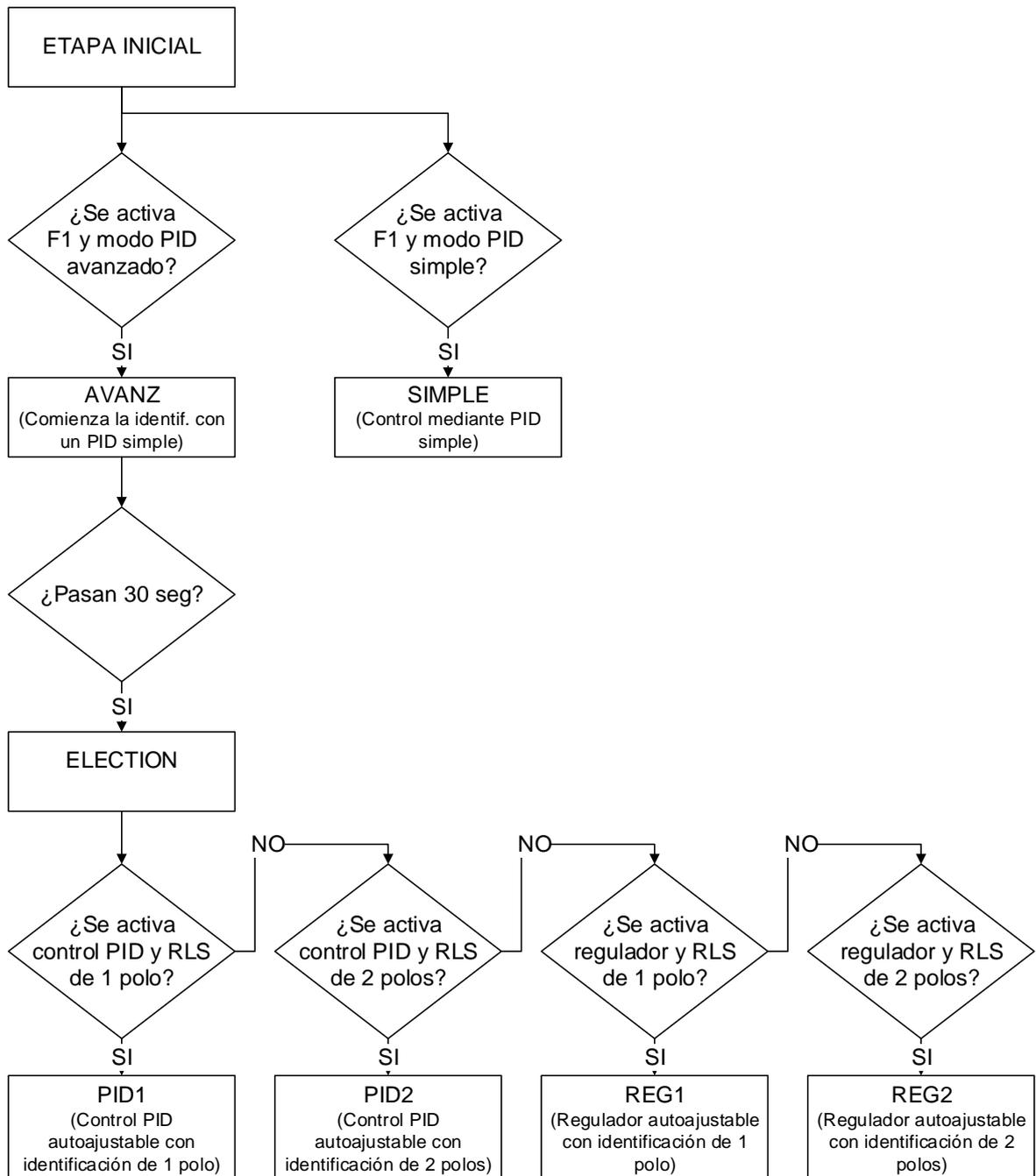


Figura 8.2.3.1 – Flujograma de funcionamiento automático

Como se puede ver en la figura 8.2.3.1, los modos de funcionamiento son:

- PID simple
- PID autoajustable con identificación RLS de 1 polo
- PID autoajustable con identificación RLS de 2 polos
- Regulador autoajustable con identificación RLS de 1 polo
- Regulador autoajustable con identificación RLS de 2 polos

8.3. Control de nivel mediante PID simple

Uno de los objetivos del presente proyecto es realizar un control de nivel en el depósito 3. Existen, como ya se ha mencionado en los antecedentes, múltiples y diversas formas de controlar una o más variables. Sin embargo, el control más extendido y más ampliamente utilizado en las últimas décadas es y ha sido el control PID. En su origen, el control PID había sido creado para control de procesos continuos (no discretos), por lo cual es preciso discretizar las ecuaciones del regulador. Por otro lado, al ser un control muy extendido, han surgido múltiples configuraciones de regulador, y siendo imposible valorarlas todas, partimos de la configuración del PID ISA.

El PID programado en el presente trabajo sigue la configuración incremental o de velocidad del PID discreto (3.1.2.9). En un primer lugar se programó un PID en la forma posicional con anti-windup, pero los resultados no fueron los esperados. El PID incremental, sin embargo, ofrece unos resultados aceptables.

En este punto es donde hay que tener en cuenta el periodo de muestreo. El parámetro a controlar es el nivel mediante la bomba circuladora, que es un sistema lento, pues como mínimo tarda 20 segundos en llenarse y 10 en vaciarse con todas las condiciones favorables. Por lo tanto, el periodo de muestreo debería estar por debajo de 5 segundos. El periodo elegido es de 1 segundo, lo cual garantiza una buena adquisición y respuesta de la planta. Para tiempos inferiores (probados), la variable de control (nivel) apenas experimenta cambios, y lo único que se consigue es introducir ruido. Por lo tanto, con el cambio a un tiempo mayor se disminuye la carga de cálculo del autómatas obteniéndose resultados mejores

8.3.1. Programación del PID

El regulador PID se programa en un bloque de función derivado para permitir que sea llamado varias veces, así como para contribuir a la simplicidad y modularidad del proyecto.

```
ERROR_2:=ERROR_1;  
ERROR_1:=ERROR;  
ERROR:=SP-Y;
```

```
AUX_1:=KP*((ERROR-ERROR_1)+ERROR/TI+TD*(ERROR-2.0*ERROR_1+ERROR_2))+U_1;
```

```
IF AUX_1-U_1<-33.4 THEN AUX_1:=-33.4+U_1;  
ELSIF AUX_1-U_1>33.4 THEN AUX_1:=33.4+U_1;  
END_IF;
```

```

IF AUX_1<=0.0 THEN U:=0.0;
ELSIF AUX_1>=100.0 THEN U:=100.0;
ELSE U:=AUX_1;
END_IF;

```

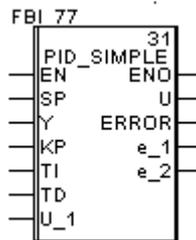


Figura 8.3.1.1 – Bloque de función de PID simple

8.3.2. Obtención de parámetros

La forma de obtener las constantes del PID es puramente empírica, pero en primer lugar se calculan unos parámetros base a partir de los cuales se realizará un barrido en torno a ellos para optimizarlos. La obtención de estos parámetros se realiza en lazo abierto según el siguiente procedimiento (ver figura 8.3.2.1):

1. Esperar hasta que la salida esté en estado estacionario
2. Provocar un salto en la variable manipulada
3. Monitorizar la salida hasta que alcance un nuevo valor estacionario
4. Obtener K como el cociente entre el rango de variación de la salida entre el de la entrada
5. Medir el instante en que la señal se encuentra al 28,3% y al 63,2%
6. Obtener $T_p = 1,5(t_2 - t_1)$ y $T_o = t_2 - T_p$.

Según este método se pueden obtener los siguientes parámetros. Éstos todavía no son óptimos, pero establecen una base para comenzar a experimentar. De este modo, con estos datos se van modificando los parámetros hasta obtener los resultados de control deseados.

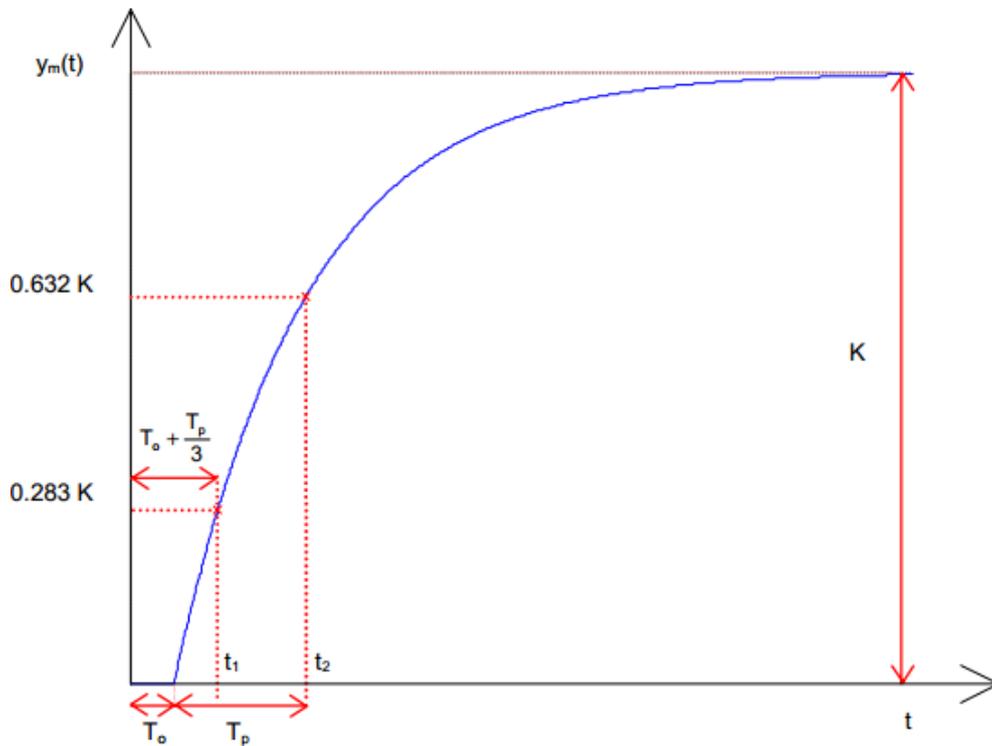


Figura 8.3.2.1 – Obtención de parámetros de PID

Con el procedimiento anterior, se han unos parámetros que caracterizan la función del sistema, pero no las constantes del PID. Éstas se pueden hallar por medio de dos métodos estándar: el método de *Ziegler y Nichols* o el de *Aström y Hägglund*. Para el cálculo del PID, las constantes se calculan como:

Método de Ziegler y Nichols

$$K_P = 1,5 * \frac{T_P}{K T_O} \quad (8.3.2.1)$$

$$T_I = 2 T_O \quad (8.3.2.2)$$

$$T_D = 0,5 T_D \quad (8.3.2.3)$$

Método de Åström y Hägglund

$$K_P = \frac{1}{K} * \left(0,2 + 0,45 \frac{T_P}{T_O} \right) \quad (8.3.2.4)$$

$$T_I = \frac{0,4 T_O + 0,8 T_P}{T_O + 0,1 T_P} * T_P \quad (8.3.2.5)$$

$$T_D = \frac{0,5 T_O T_P}{0,3 T_O + T_P} \quad (8.3.2.6)$$

Tabla 8.3.2.1 – Métodos de obtención de parámetros de PID en lazo abierto

8.3.3. Resultados

Con los parámetros calculados según las ecuaciones anteriores, se obtienen los siguientes resultados (todas las gráficas están calculadas con un 55% de apertura de la válvula de vaciado, una temperatura de proceso de 21°C y el resto de elementos sin actuar):

(*en amarillo, la señal de nivel, en rojo la consigna y en verde la señal de entrada al variador)

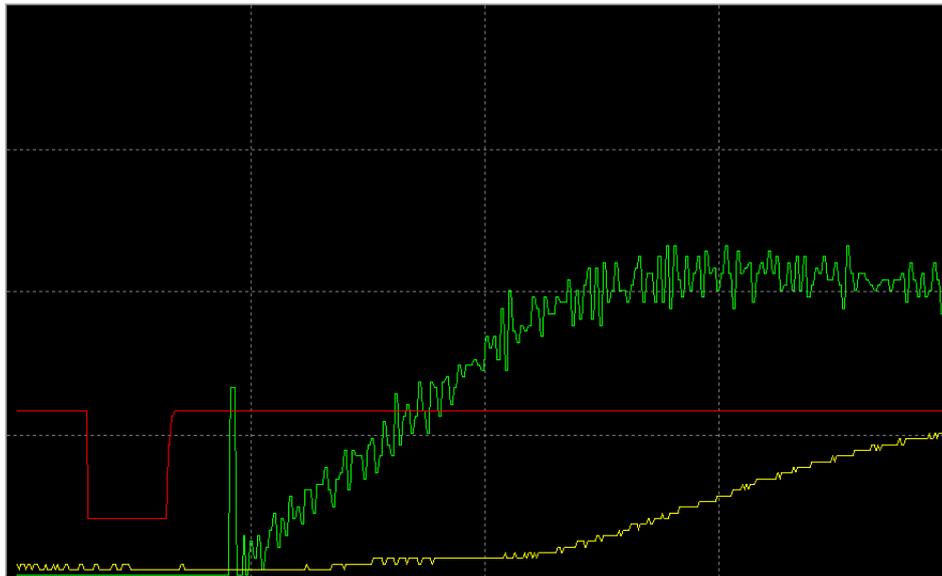


Figura 8.3.3.1 – Control PID simple calculado mediante Ziegler y Nichols (240seg)

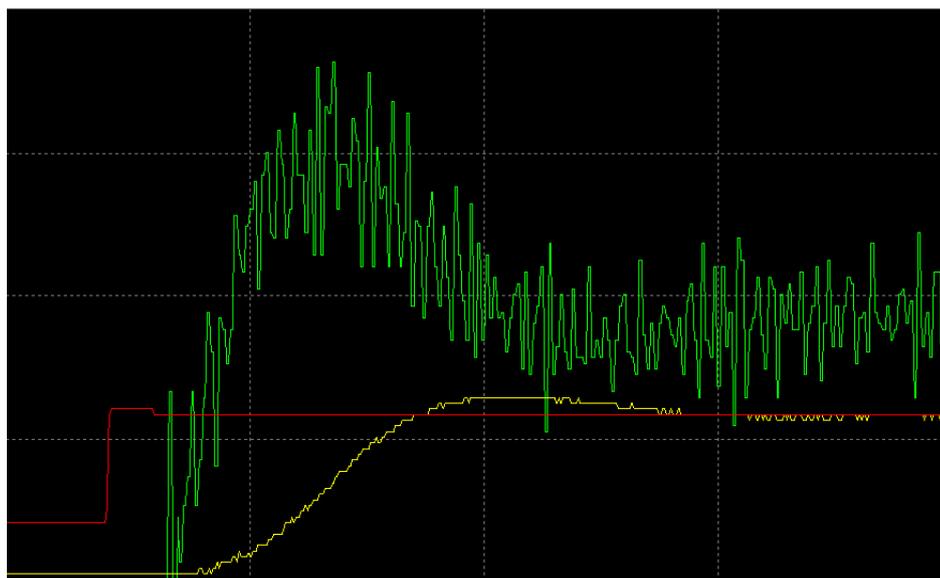


Figura 8.3.3.2 – Control PID simple calculado mediante Åmström y Hägglund (240seg)

como se puede observar en las figuras 8.3.3.1 y 8.3.3.2, el control eficaz pero muy lento, por lo que se modifican manualmente los parámetros hasta obtener otros mejores. Los parámetros óptimos calculados son: $K_p=7.3$, $T_i=4.3$ y $T_d=0.23$.

Como resultado se puede observar que la salida (nivel) sigue perfectamente a la consigna, y además esto se consigue para diversos valores de posición de las válvulas (perturbaciones) y para prácticamente todo el rango de la consigna.

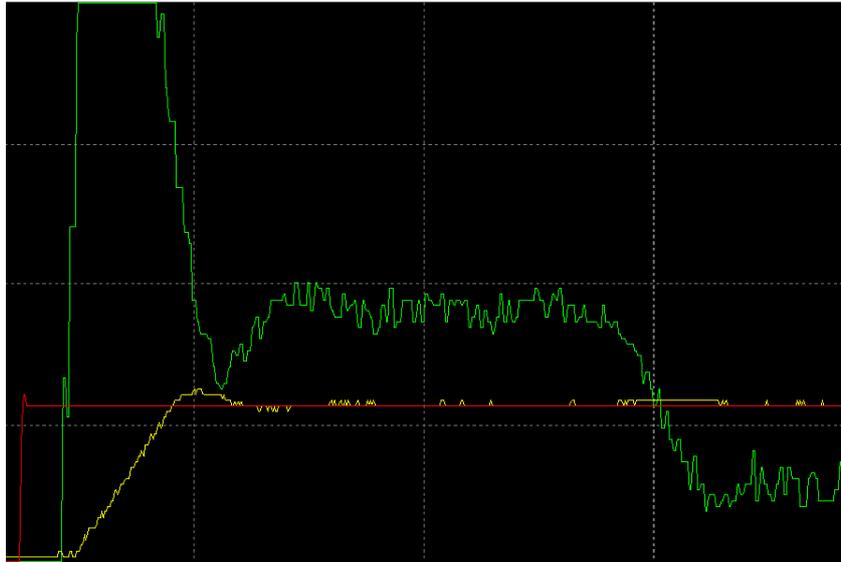


Figura 8.3.3.3 – Control PID simple con parámetros optimizados y activación de la electroválvula (207seg)



Figura 8.3.3.4 – Control PID simple con parámetros optimizados con cambio de consigna (207seg)

8.4. Control de nivel mediante PID adaptativo

En los últimos años, se han desarrollado múltiples acciones de control que mejoran las condiciones de los controladores clásicos. Este tipo de controladores utilizan técnicas novedosas, como son la predicción de los futuros estados de la planta, o el control multivariable. Sin embargo, debido a la extensión y popularidad de los controladores PID en el mercado, muchas de las soluciones consisten en mejorar los mecanismos de control ya establecidos haciendo una optimización de parámetros, la cual se puede realizar a través de una identificación de la planta.

Las distintas condiciones cambiantes de la planta que influyen directamente en la relación entre nivel y potencia de la bomba, exigen un tipo de control que se adecúe a ellas. Sin embargo, para realizar el control se seguirán tomando las señales de temperatura y apertura de válvulas como perturbaciones, es decir, el control seguirá siendo monovariable (una variable de entrada y otra de salida).

El control planteado se basa en la identificación de la función de transferencia que relaciona la potencia entregada al motor con el nivel del líquido en el depósito de control, de forma que con condiciones cambiantes, la función de transferencia se modifica. Con los parámetros identificados de la función anterior, es posible establecer, aplicando criterios de estabilidad, los parámetros del controlador PID más adecuados para la situación. En la siguiente figura se puede observar un diagrama de bloques del regulador adaptativo.

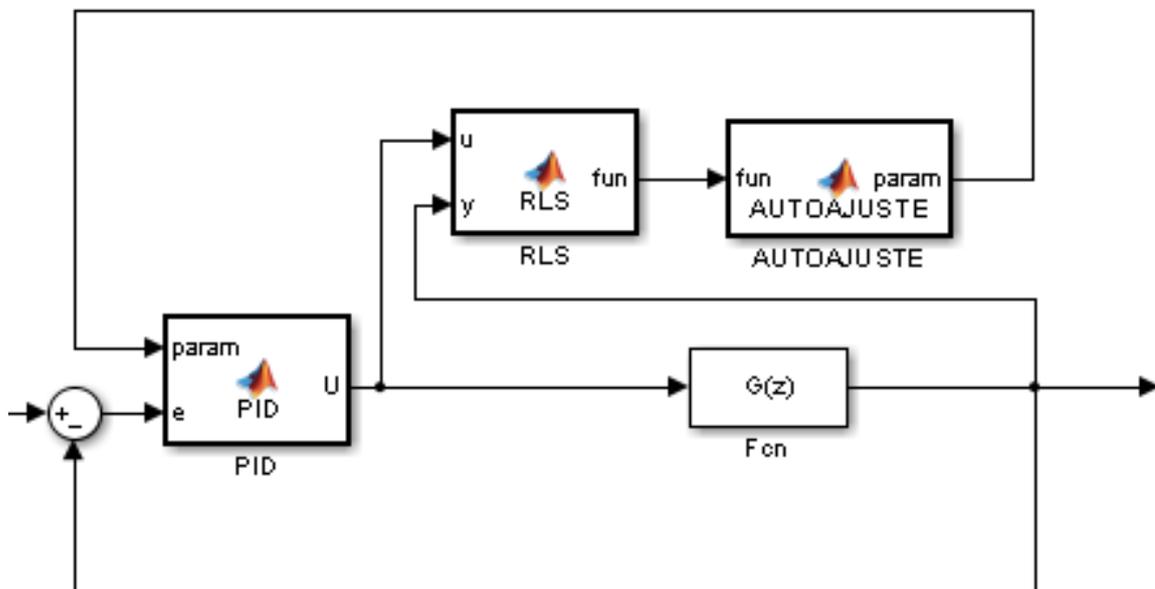


Figura 8.4.0.5 – Esquema de PID adaptativo

8.4.1. Método RLS

La identificación de la planta supone el fundamento de la mayoría de los controles adaptativos. Es preciso, por tanto, conocer el modo en que responde la planta en función de las entradas, para así poder aplicar criterios de estabilidad. Existen muchos tipos de identificación, aunque las planteadas en este trabajo son 2:

- **Identificación fuera de línea:**

La identificación fuera de línea consiste en almacenar todos los datos de entrada y salidas de una planta durante un determinado tiempo, para después identificar, por el método elegido, la función que relaciona entradas y salidas. Este método supone 3 problemas: en primer lugar, para que la identificación sea exitosa, es necesario excitar la planta con un conjunto de señales que comprendan todo el espectro de frecuencia del sistema (secuencias binarias pseudoaleatorias SBPA que se aproximan a ruido blanco), y en el rango correcto; en segundo lugar, la carga de datos puede ser muy importante, por lo cual sería preciso almacenar los datos en un fichero para no sobrecargar la memoria del autómatas; y en tercer lugar, la planta no estaría realizando ninguna acción productiva durante ese periodo, por lo que esta opción queda desechada. La única utilización que se le podría dar es como iniciación de los parámetros de la identificación RLS.

- **Identificación en línea:**

La identificación en línea supone una carga de cálculo un poco mayor en cada periodo, pero sigue siendo mínima. Sin embargo, la carga de datos se reduce en gran medida, pues se puede pasar, para una muestra de 300 datos en la identificación fuera de línea, a una matriz de 9 datos más 3 datos medidos. Del mismo modo, la identificación se puede realizar con la planta funcionando normalmente, es decir, no se necesita crear señales auxiliares para la identificación. Sí que es conveniente, en este caso, identificar la planta durante un tiempo largo para ver los coeficientes de la función una vez se estabilicen, así como los de la matriz auxiliar, para introducirlos como parámetros iniciales de la planta, para que la identificación sea válida desde el primer instante. La planta también funcionaría con parámetros puestos al azar, con la única condición de que la matriz no sea nula ni todos sus parámetros iguales, así como el vector de parámetros no tenga todos los parámetros iguales.

La identificación en línea sigue el método de mínimos cuadrados recursivos RLS (*Recursive Least Squares*). Este método se basa en el algoritmo de mínimos cuadrados, que busca la función que minimiza el error cuadrático.

$$E_{CM}(f) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (e_k)^2}{n}} \quad (8.4.1.1)$$

El algoritmo de identificación mediante mínimos cuadrados se puede expresar de distintas formas. Sin embargo, se elige el que se describe a continuación debido a que supone una menor carga de cálculo, así como que no es preciso realizar inversas de matrices.

1. Dar valores iniciales a P y G
2. En cada instante k:
 - a) Leer los valores de y(k) y u(k).
 - b) Formar el vector regresor m(k).
 - c) Calcular P(k) mediante:

$$P(k) = \frac{1}{F_{OLVIDO}} * \left(P(k-1) - \frac{P(k-1) * m^T(k) * m(k) * P(k-1)}{F_{OLVIDO} + m(k) * P(k-1) * m^T(k)} \right) \quad (8.4.1.2)$$

- d) Calcular K(k) según la expresión:

$$K(k) = \frac{P(k-1) * m^T(k)}{F_{OLVIDO} + m(k) * P(k-1) * m^T(k)} \quad (8.4.1.3)$$

- e) Calcular G(k):

$$\hat{G}(k) = \hat{G}(k-1) + K(k) * [y(k) - m(k) * \hat{G}(k-1)] \quad (8.4.1.4)$$

Como se puede observar, no es necesario calcular la inversa de ninguna matriz. Por otro lado, la identificación se puede controlar mediante un factor de olvido, que indica la importancia que tienen los datos anteriores almacenados en las matrices de cálculo sobre los nuevos datos. Un factor de olvido mayor hace el sistema más reactivo al cambio, mientras que un factor de olvido menor hace que el sistema sea más cambiante. Un factor de olvido demasiado pequeño puede introducir ruido en el sistema, mientras que uno demasiado grande implica que la identificación sea más lenta ante el cambio. Los valores óptimos se encuentran en el rango de 0.95 a 0.99. La planta parte con un valor predefinido de 0.99, pues aún siendo alto evoluciona aceptablemente ante las perturbaciones.

En el sistema se realizan 2 identificaciones distintas, una con la identificación de 2 parámetros (un polo y una ganancia) y otra de 3 parámetros (dos polos y una ganancia). Las identificaciones se programan en 2 bloques de función derivados diferentes, aunque el procedimiento llevado a cabo es idéntico, pero las matrices de entrada y resultados son diferentes. Unity Pro XL no está específicamente diseñado para el cálculo con matrices, por lo que todos los cálculos de este tipo se realizan mediante bucles *for*, lo cual prolonga el código. Además, se prolonga la lista de variables al tener que utilizar variables auxiliares en dichos bloques.

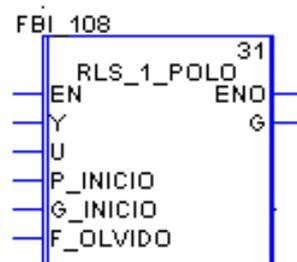


Figura 8.4.1.1 – Bloque de función de identificación RLS

8.4.2. Autoajuste del PID

Una vez obtenida una función de la planta que relaciona la entrada con la salida, es posible, aplicando criterios de estabilidad, ajustar los coeficientes o constantes de un regulador como el PID. A la hora de aplicar estos criterios, son importantes tanto el criterio de estabilidad elegido como la función del PID, así como la función de la planta. El autoajuste se realiza con 2 funciones diferentes, por lo cual se programan dos bloques de función distintos.

El método de autoajuste utilizado es el basado en **asignación de polos**. El criterio de estabilidad que se toma es el de que todos los polos del sistema en bucle cerrado se encuentren dentro del círculo del radio unidad en el plano Z , o lo que es lo mismo, fuera del círculo en el plano Z^{-1} .

En el procedimiento, es necesario realizar unos cálculos descritos en el anexo de cálculos para obtener las siguientes ecuaciones:

Para 1 polo:

$$\rho_0 = \frac{1}{b_1} * \left(1 + a_1 - \frac{3}{a} \right) \quad (8.4.2.1)$$

$$\rho_1 = \frac{1}{b_1} * \left(a_2 - a_1 + \frac{3}{a^2} \right) \quad (8.4.2.2)$$

$$p_2 = -\frac{1}{b_1} * \left(a_2 + \frac{1}{a^3} \right) \quad (8.4.2.3)$$

Para 2 polos:

$$p_0 = \frac{1}{b_1} * \left(1 + a_1 - \frac{3}{a} \right) \quad (8.4.2.4)$$

$$p_1 = \frac{1}{b_1} * \left(\frac{3}{a^2} - a_1 \right) \quad (8.4.2.5)$$

$$p_2 = -\frac{1}{b_1 * a^3} \quad (8.4.2.6)$$

En ambos casos, con los parámetros p_0, p_1 y p_2 se obtienen las constantes de control del PID como:

$$K_P = -(p_1 + 2p_2) \quad (8.4.2.7)$$

$$T_I = \frac{K_P * T_C}{p_0 + p_1 + p_2} \quad (8.4.2.8)$$

$$T_D = \frac{p_2 * T_C}{K_P} \quad (8.4.2.9)$$

Al igual que el módulo de identificación RLS y el PID, estos módulos se programan en dos bloques de función derivados en lenguaje estructurado. Estos módulos siempre se ejecutan tras la identificación, aunque también podrían utilizarse indicando los parámetros constantes de la función del sistema. Este podría ser el caso para sistemas en los que las perturbaciones no tengan relevancia en la evolución del sistema.

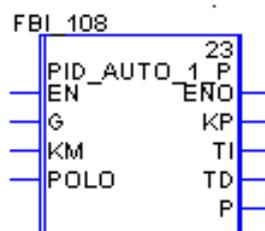


Figura 8.4.2.1 – Bloque de función de autoajuste del PID

8.4.3. PID

El PID para el control adaptativo es el mismo que el utilizado en el PID SIMPLE, sólo se varían los parámetros del mismo. Los resultados obtenidos, no son del todo óptimos, por lo que se programa otro tipo de pid con la fórmula para el cálculo del autoajuste del PID (ver el apartado 8.4.4). Los resultados obtenidos son un control PID muy inestable y que no se ve afectado (o en muy poca medida) por el valor de KM, como se puede ver en la figura 8.4.3.1.

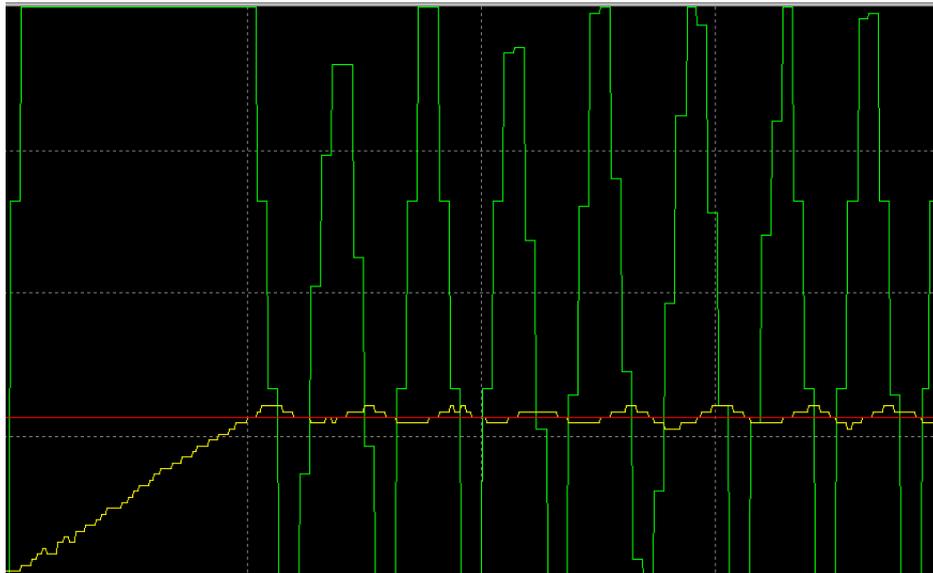


Figura 8.4.3.1 – Control PID avanzado con RLS de 1 polo sin modificar (87seg)

Como este control no realiza de forma adecuada su función se modifica a través de unas ganancias en los parámetros TI y TD hasta obtener un controlador rápido y estable pero sensible a las variaciones de KM. Estos parámetros se modifican de forma empírica y no son configurable por el usuario de la planta, pues los cambios en ellos pueden inestabilizar el sistema o hacerlo ineficaz. De este modo, para ajustar los parámetros del autoajuste de 1 polo se multiplica el valor de TI por 200.0, y para el autoajuste de 2 polos se multiplica el valor de TI por 200.0 y el de TD por 0.1.

Los resultados son:



Figura 8.4.3.2 – Control PID avanzado con RLS de 1 polo y $K_M=0.45$ (147seg)

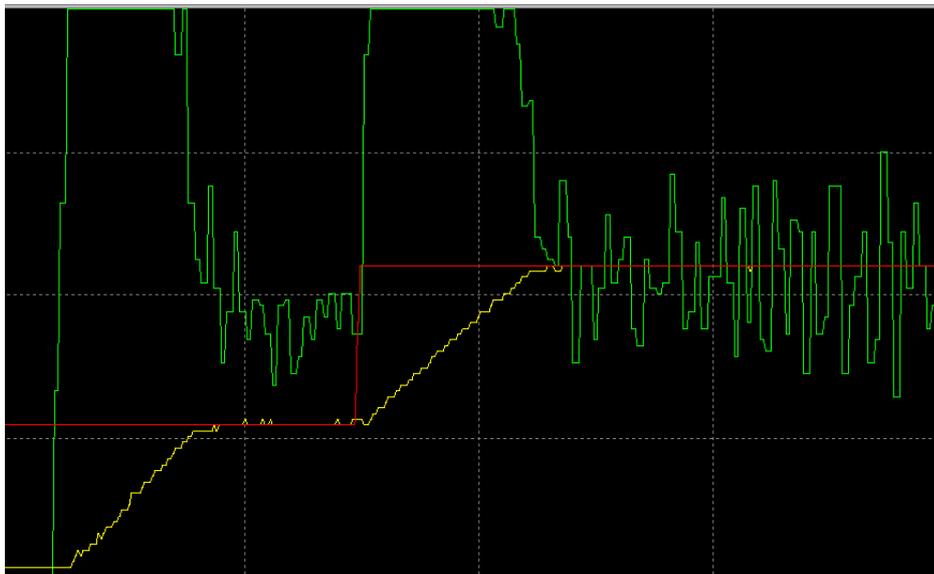


Figura 8.4.3.3 – Control PID avanzado con RLS de 2 polos y $K_M=0.45$ (147seg)

8.4.4. Regulador

El regulador programado se basa en un controlador de 3 parámetros en función del error en el instante actual y los dos instantes anteriores, así como del estado de la entrada del regulador en el instante anterior. La diferencia radica más en la formulación que en la programación PID.

El regulador sigue la ecuación 8.4.4.1 (de la cual se parte para obtener el autoajuste del PID, descrito en los anexos de cálculo):

$$G_r(z^{-1}) = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (8.4.4.1)$$

La expresión anterior expresada como ecuación en diferencias se transforma en la Ecuación 8.4.4.2

$$u(t) = p_0 * error(t) + p_1 * error(t - 1) + p_2 * error(t - 2) + u(t - 1) \quad (8.4.4.2)$$

Esta fórmula ofrece mejores resultados que el PID, principalmente en cuanto a su reacción a los parámetros de ajuste, lo que hace este regulador más pedagógico. Los resultados en cuanto a uno y 2 polos son muy similares, por lo que en las siguientes gráficas se mostrará la variación de las características del regulador con el parámetro KM

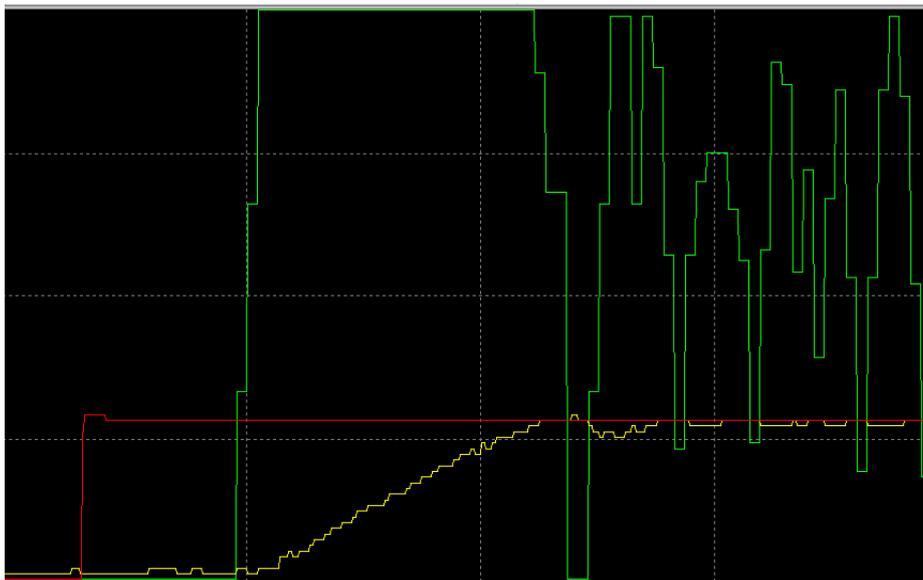


Figura 8.4.4.1 – Control mediante regulador 1 polo con Km=0.8 (87seg)

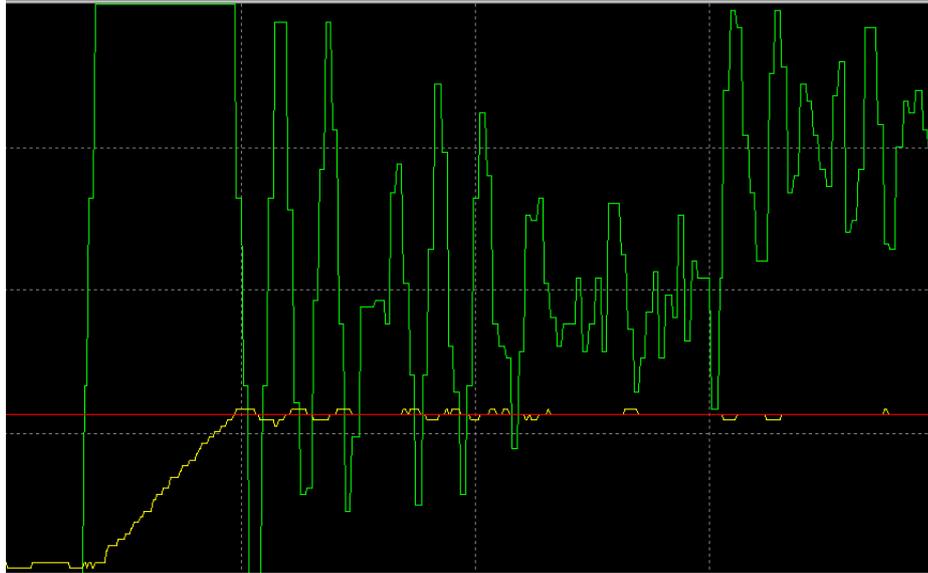


Figura 8.4.4.2 – Control mediante regulador 1 polo con $K_m=0.45$ y activación de la electroválvula (147seg)

8.4.5. Pantalla de explotación

Como una primera aproximación a un SCADA, y para simplificar y ver más claramente los resultados de las pruebas intermedias de programación, se crea una pantalla de explotación en Unity Pro. En esta pantalla se incluyen indicadores de todas las variables del sistema, así como botones para cambiar de modo y gestionar actuadores todo/nada. El resultado, que se muestra en la figura 8.4.5.1, no está orientado a servir como software de SCADA, sino como pantalla de pruebas para modificaciones en la programación sin acceder al software de SCADA.

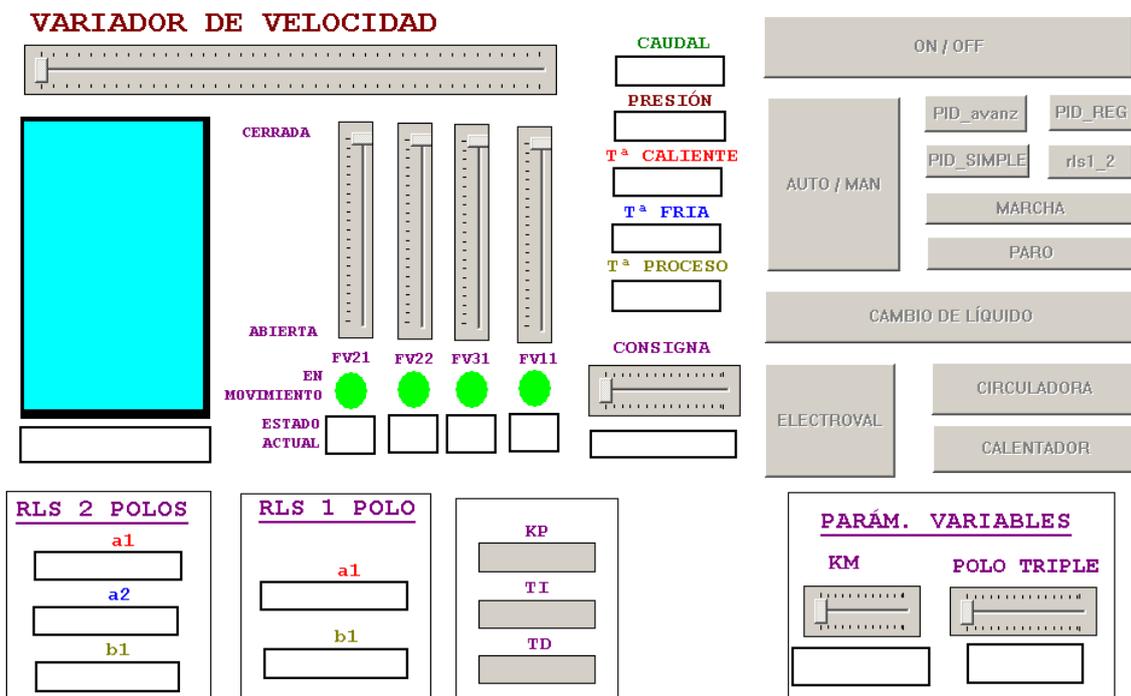


Figura 8.4.5.1 – Pantalla de explotación

8.5. SCADA

Un sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) consiste en un software que permita el acceso a datos remotos de un proceso así como el control del mismo. Por lo tanto, un sistema SCADA no es un sistema de control, sino una herramienta de monitorización que sirve de comunicación entre los niveles de control (PLC) y los de gestión a un nivel superior.

Las grandes ventajas que tienen estos sistemas son:

- Diagnóstico rápido de errores.
- Acceso deslocalizado mediante Web (no es el caso).
- Visualización de alarmas y eventos.
- Acceso sólo a personal autorizado.

El software utilizado para realizar el SCADA es Vijeo Citect 7.0. Este software permite desarrollar gran cantidad de aplicaciones con poca necesidad de programación. Sin embargo, su mayor ventaja radica en la facilidad de conexión con el PLC y la posibilidad de exportar variables entre Unity Pro XL y Vijeo Citect 7.0. Su mayor problema a la hora de realizar pruebas es que si se trabaja con la versión de estudiante el programa sólo permite 15 minutos de ejecución de programa, por lo que una vez que se agota este tiempo es necesario reiniciar Vijeo Citect. El SCADA, al igual que el programa de control, se comunica con el PLC por vía Ethernet.

8.5.1. Conexión con la planta

El software utilizado para realizar el SCADA es de la misma empresa que el empleado para la programación del autómatas. Por lo tanto, entre éstas dos aplicaciones se establecen muchos puentes, uno de los cuales está en la importación de variables y conexión con el autómatas. Para ello, sólo es necesario definir un dispositivo de entradas y salidas externo e indicarle de dónde debe tomar las variables (archivo de Unity). Cabe remarcar que al igual que las pantallas de explotación de Unity, Vijeo Citect sólo trabaja con variables de memoria del autómatas, y puede dar algún error a la hora de importar variables cuando en el archivo de programación se encuentran variables definidas como de entrada o de salida. En este caso, es necesario borrar todas las variables de este tipo (al compilar el propio programa avisa de los fallos).



Figura 8.5.1.1 – Configuración de dispositivo de entradas externo

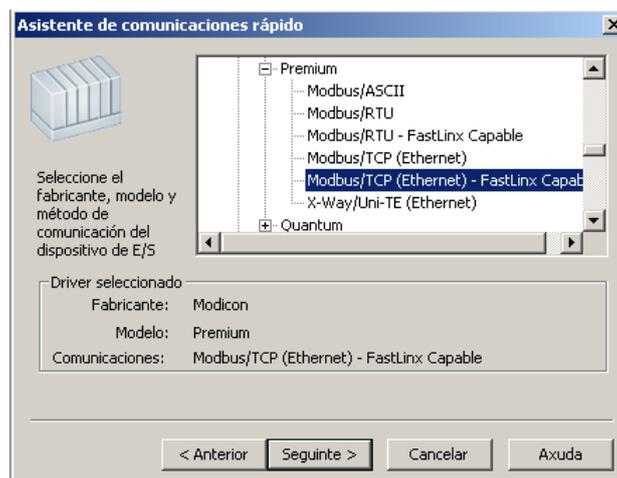


Figura 8.5.1.2 – Elección del PLC y la comunicación



Figura 8.5.1.3 – Configuración de dispositivo de direcciones



Figura 8.5.1.4 – Importación de variables

8.5.2. Usuarios

Otro punto importante es definir los usuarios. En este caso se definen 2 usuarios, que tienen 2 prioridades distintas, de forma que:

- Usuario «usuario», tiene el mayor privilegio y puede realizar todo tipo de acciones disponibles en la planta.
- Usuario «alumno», tiene menor privilegio y puede realizar todas las acciones salvo las relativas a la configuración de los parámetros de control.

Para registrarse como usuario, es necesario, una vez iniciado el programa, ir al icono de usuario e introducir nombre y contraseña. Si no se realiza este paso, el programa no registra ningún usuario y no realiza cambios en la planta, aunque se puede leer su estado.

*(*las contraseñas son el nombre del usuario)*



Figura 8.5.2.1 – Registro de usuario

8.5.3. Funciones

8.5.3.1. Página CONFIG

El SCADA parte de una página inicial, («config», figura 8.5.3.1), en la cual se establece el modo de funcionamiento y tipo de control e identificación. Sin embargo, mientras se muestra esta página, la planta permanecerá inactiva, o lo que es lo mismo, en estado A6 de la gestión de etapas del GEMMA (puesta del sistema en estado inicial).

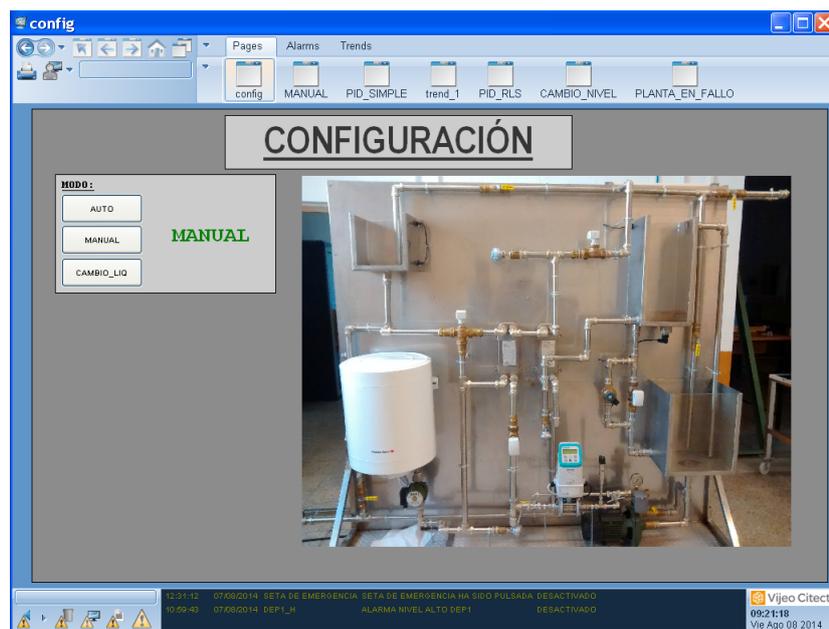


Figura 8.5.3.1 – Página de inicio de SCADA CONFIG

En esta página, los menús de selección aparecen conforme se seleccionan los modos de funcionamiento, es decir, que hay rangos de selección: en primer lugar, se elige el modo (MANUAL, AUTOMÁTICO o RECONFIGURACIÓN DE NIVEL); en segundo lugar, si la opción elegida es AUTOMÁTICO, se selecciona el modo de control (PID SIMPLE o PID AVANZADO); en tercer lugar, si la opción elegida es PID AVANZADO, se elige el tipo de identificación (1 POLO o 2 POLOS), y el tipo de regulador (PID en su configuración de velocidad o el REGULADOR).

Una vez determinado el funcionamiento deseado, se cambia la página mostrada, que se corresponderá con el modo definido, pero todavía permanecerá la planta inactiva.

8.5.3.2. Página *MANUAL*

Al seleccionar el modo manual, se salta a la página correspondiente (figura 8.5.3.2). En esta página es posible activar la planta, que pasará a un estado de parada obtenida (A4), y cuenta también con unos pulsadores de marcha y paro que permiten mover la planta entre los estados de la guía GEMMA A4 y F4. En esta página no se realiza ningún tipo de control, pero es posible modificar el estado de todos los actuadores de la planta como quiera el usuario (servovalvulas, electroválvula, calentador, bomba circuladora y consigna del variador), así como leer los valores de los sensores de la planta. La actuación de elementos se simplifica gráficamente del siguiente modo (figura 8.5.3.3):

- Al activar el calentador aparece una resistencia por encima en forma de serpiente, así como un indicador luminoso al lado del botón de actuación.
- Al activar la circuladora, se ilumina de verde, así como un indicador luminoso al lado del botón de actuación.
- Al activar la electroválvula, se ilumina de verde, así como un indicador luminoso al lado del botón de actuación.
- Al activar el variador, una vez que la consigna sea distinta de 0, la bomba se ilumina de verde y se muestra la velocidad de la bomba en rpm (revoluciones por minuto).
- Al modificar la consigna de las servoválvulas, se iluminan de verde, y su valor de apertura real se muestra al lado de cada una.

La lectura de los sensores se simplifica gráficamente del siguiente modo:

- Los detectores de nivel se muestran como indicadores luminosos, y se iluminan cuando están actuados.
- El valor de caudal se muestra junto al indicador de caudalímetro.
- El valor de presión se muestra junto al sensor de presión.
- Los valores de temperatura se muestran junto a los sensores en una situación similar a la de la planta.
- El valor del sensor de nivel se muestra en porcentaje junto a un esquema del depósito, en el cual se simula el nivel de líquido mediante un rectángulo que varía su altura.

Como se puede observar en la figura 8.5.3.2, el esquema diseñado para el SCADA es muy parecido a la disposición real de los elementos en la planta, para que de este modo sea más intuitivo su manejo.

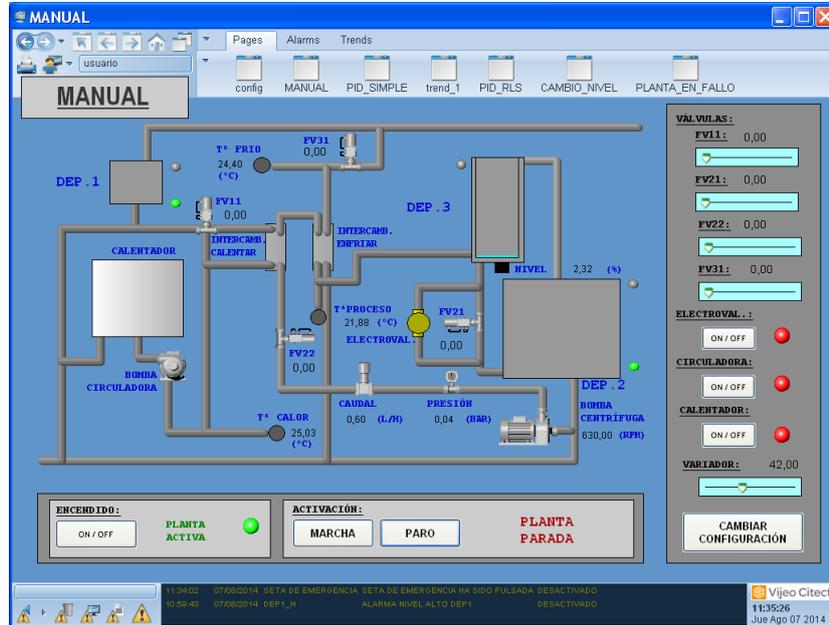


Figura 8.5.3.2 – Página de SCADA MANUAL

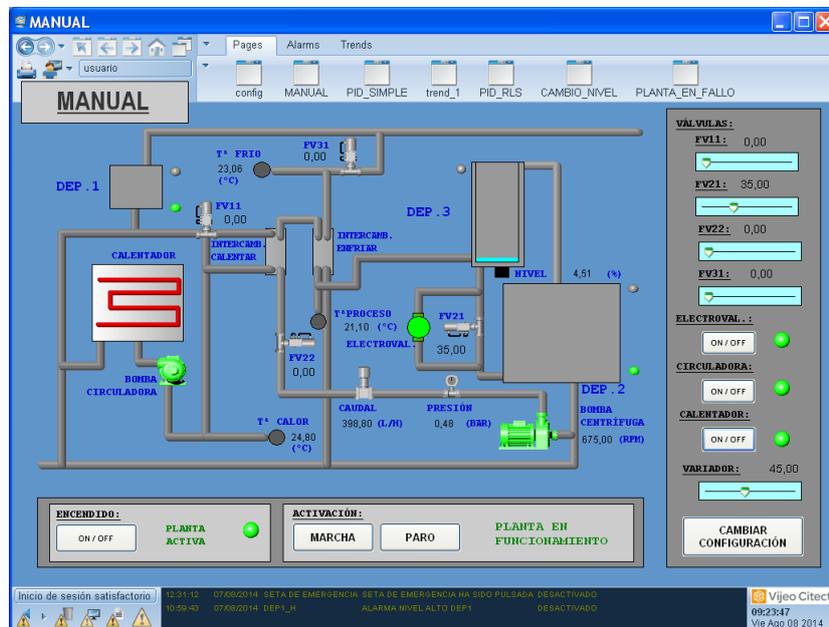


Figura 8.5.3.3 – Página de SCADA MANUAL con elementos actuados

Esta página consta del mismo modo de un pulsador para cambiar la configuración de funcionamiento de la planta, de forma que el SCADA volvería a mostrar la página «CONFIG» y se pararía la planta.

8.5.3.3. Página *PID SIMPLE*

Si la opción seleccionada es la de PID simple, la página mostrada será la correspondiente (figura 8.5.3.4). En esta página es posible habilitar la planta mediante un pulsador de encendido y apagado. Consta de los mismos elementos que la página «manual» (figura 8.5.3.2), es decir, con todas las posibilidades de actuación de los actuadores, a excepción de la consigna del variador, que en este caso será calculada por el autómatas para realizar el control de nivel. En cuanto a las lecturas de los sensores y apariencia de la página, es igual que la mencionada.

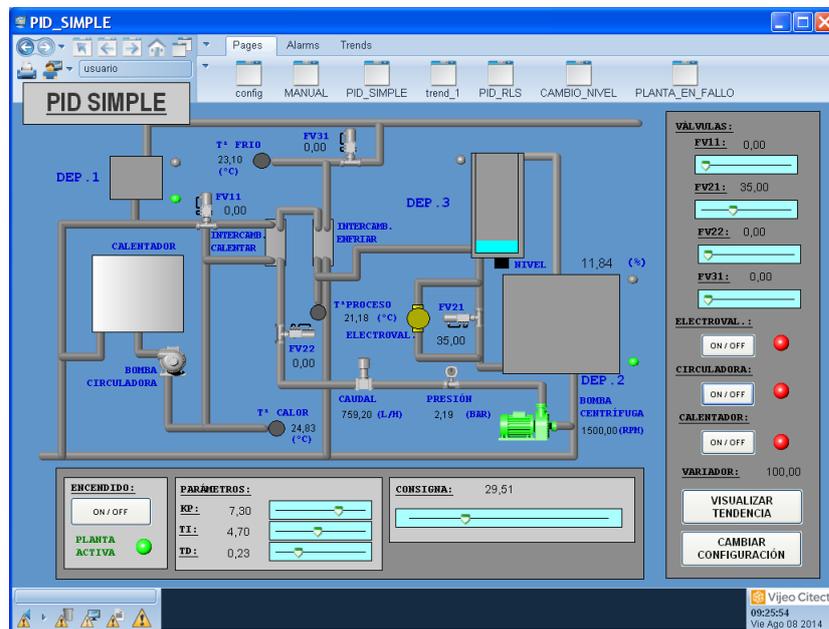


Figura 8.5.3.4 – Página de SCADA *PID SIMPLE*

En este modo aparecen otras variables, como son:

- KP: es la constante proporcional del controlador PID, y está configurada para que su variación esté entre 0.1 y 10. Tanto este como los otros dos parámetros del regulador sólo se pueden modificar, como ya se mencionó, cuando el operador de la planta «USUARIO» está registrado.
- TI: es el parámetro integral del controlador PID, y está configurado para que su variación esté entre 0.1 y 10.
- TD: es el parámetro derivativo del controlador PID, y está configurado para que su variación esté entre 0.01 y 1.
- Consigna de nivel: es el valor de nivel que se desea tener en el depósito de control, y está configurado para que su variación esté entre 15 y 85 %, para

evitar trabajar en lugares donde la bomba produce muchas perturbaciones y es difícil obtener un valor estable y real del sensor de nivel (de 0 a 15%) y para evitar que no se actúe el detector de nivel superior (de 85 a 100%).

Esta página consta del mismo modo de un pulsador para cambiar la configuración de funcionamiento de la planta, de forma que el SCADA volvería a mostrar la página «CONFIG» y se pararía la planta. Además, también cuenta con un pulsador («VISUALIZAR TENDENCIA») que permite acceder a la página «TREND» para visualizar la evolución del nivel comparado con la consigna y la evolución de la consigna del variador (figura 8.5.3.5).

8.5.3.4. Página *TREND*

A esta página se accede a través de las páginas «PID SIMPLE» y «RLS PID» cuando se pulsa el botón «VISUALIZAR TENDENCIA». En esta página se muestran los *tags* o variables de tendencia que fueron declarados, y sólo hay que asignarles un color. Para el caso, las variables mostradas son la evolución del nivel (amarillo), la evolución de la consigna (rojo) y la evolución de la consigna del variador (verde) (figura 8.5.3.5).



Figura 8.5.3.5 – Página de SCADA *TREND* para visualizar tendencias

Esta página muestra las gráficas cada vez que se inicia el programa con unos valores por defecto de amplitud y tiempo, que es conveniente modificar. La gráfica trabaja en toda la amplitud (en el rango positivo) del número real, que para el programa es de 0 a 32000. Por lo tanto, ese valor se debe modificar para ajustar el rango de todas las variables de 0 a 100, de forma que así se verán correctamente. En cuanto al tiempo, se muestran 87 segundos, pero es posible ir hacia atrás para ver las gráficas anteriores o modificar este tiempo para que en la pantalla se muestren hasta 15 minutos (tiempo máximo de ejecución del programa en la versión disponible).

Para mostrar las gráficas, se parte de una página habilitada para este fin, y se modifica con los siguientes cambios:

- Un pulsador de «VOLVER», para regresar a la página de «PID SIMPLE» o de «PID AVANZADO», para realizar las modificaciones oportunas en la planta o ver el estado de todas las variables.

- Un indicador del valor de los parámetros de PID utilizados para el control que se está realizando.
- Un indicador de la función de transferencia de la planta identificada, tanto para 1 como para 2 polos.
- Una barra deslizante que permite modificar la consigna de nivel sin necesidad de volver a la pantalla correspondiente.

8.5.3.5. Página *RLS PID*

Esta página es idéntica a «PID SIMPLE» en cuanto a lecturas de sensores, configuración de actuadores, botones y demás. Las diferencias radican en los nuevos parámetros utilizados y en la identificación. Los cambios son:

- **KM:** es un parámetro que permite ajustar la ganancia proporcional del regulador PID autoajustado para corregir de este modo las oscilaciones en la variable de salida del regulador (consigna del variador). Esta es una variable muy importante, y es muy conveniente que los alumnos que utilicen la planta jueguen con ella para observar la variación que produce (aumentándola produce oscilaciones muy amplias y reduciéndola reacciona más lentamente ante los cambios en la planta). Este parámetro está configurado para que pueda variar entre 0.1 y 1, estando el valor óptimo (depende en parte de las condiciones de la planta como apertura de válvulas, temperatura del líquido de proceso, etc.) en torno a 0.45.
- **Posición del polo triple:** como se mencionó en el apartado de autoajuste, este parámetro es el que se impone como condición para la estabilidad del control de nivel. El valor que tome debe ser siempre mayor que 1 para garantizar la estabilidad, aunque superado este valor, el parámetro no tiene mucha influencia en el control (aunque siempre es preferible que supere el valor ampliamente, y para el caso se parte de un valor de 10).
- **Factor de olvido:** este es un parámetro de la identificación, si bien la relación directa entre la identificación y el control avanzado hacen que se convierta también en un parámetro importante en el control. Este parámetro hace que la identificación sea tanto más flexible y rápida a los cambios cuanto menor sea el valor, aunque al disminuir el valor también es más sensible a los ruidos. Los valores óptimos suelen estar entre 0.95 y 0.99, pero como en general las perturbaciones en la planta son lentas (servoválvulas y variación de temperatura), se parte como valor por defecto de 0.99.
- **Identificación RLS:** los parámetros identificados son mostrados en forma de ecuación en z . Se puede observar del mismo modo que en el control el efecto que tiene la variación del factor de olvido en la identificación al variar un parámetro. Por otro lado, la máxima variación de los parámetros identificados se podrá observar que se produce al comenzar la identificación, y en particular cuando la identificación comienza con el depósito vacío.

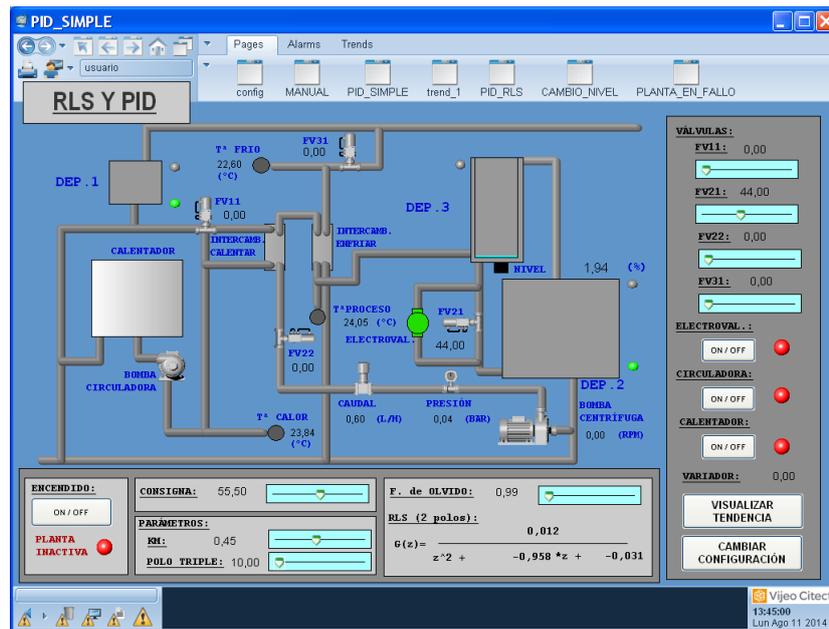


Figura 8.5.3.6 – Página de SCADA RLS PID

Al igual que la página «PID SIMPLE», consta de un pulsador para modificar la configuración y volver a la página de inicio, y otro para visualizar la tendencia.

8.5.3.6. Página **CAMBIO DE NIVEL**

Si se selecciona en la página «config» una reconfiguración de nivel, se accede a la página correspondiente (figura 8.5.3.7). Esta página tiene un esquema de la planta idéntico al de las anteriores páginas mencionadas, pero en este caso desaparecen todas las opciones de activación de actuadores, debido a que el proceso está controlado internamente y no permite cambios. La única acción que se permite en esta pantalla es iniciar la reconfiguración de los parámetros de control de nivel iniciando la planta o parándola.

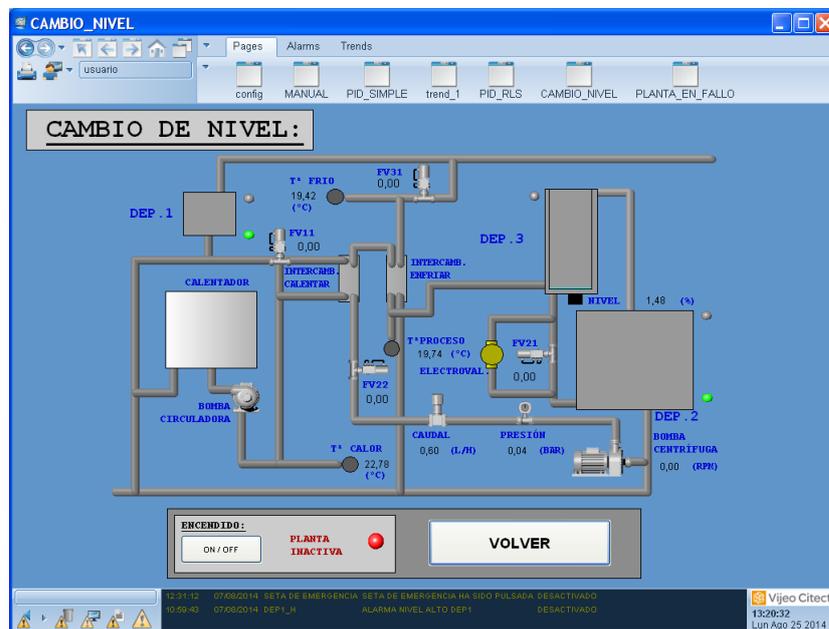


Figura 8.5.3.7 – Página de SCADA **CAMBIO DE NIVEL**

Esta página cuenta, como otras mencionadas, de un pulsador para modificar el modo de funcionamiento de la planta volviendo a la página inicial.

8.5.3.7. Página *PLANTA EN FALLO*

Desde cualquier página, en el momento que se produzca un fallo, se accede a esta página, además de advertir de la alarma en la parte inferior de las páginas anteriormente mencionadas y en la lista de alarmas. Los fallos contemplados son a su vez variables de alarma, de modo que si una de ellas se activa, aunque se desactive después mediante el rearme adecuado, quedará grabada en la memoria del programa, así como la fecha y hora de activación.

En esta página se muestra el esquema de planta explicado, así como una lista de posibles causas de fallo en la parte derecha (figura 8.5.3.8). Aparecerán en rojo las que estén activadas, y en gris aquellas que no impiden el correcto funcionamiento de la planta. Existen variables que puedan suponer un fallo pero que desaparezcan rápido, por lo que será necesario ver la parte inferior de la propia página de fallos donde se muestran las alarmas para identificar y comprobar los fallos.

Una vez se corrigen todos los fallos, en la página se empieza una cuenta atrás para el rearme, tiempo en el cual se estarán realizando la reconfiguración y posicionamiento oportunos de los actuadores (figura 8.5.3.8). Una vez finalizada la cuenta atrás, aparece un botón de «REARME» (figura 8.5.3.9), que devuelve a la planta a su estado normal y al SCADA a la página de configuración de inicio.

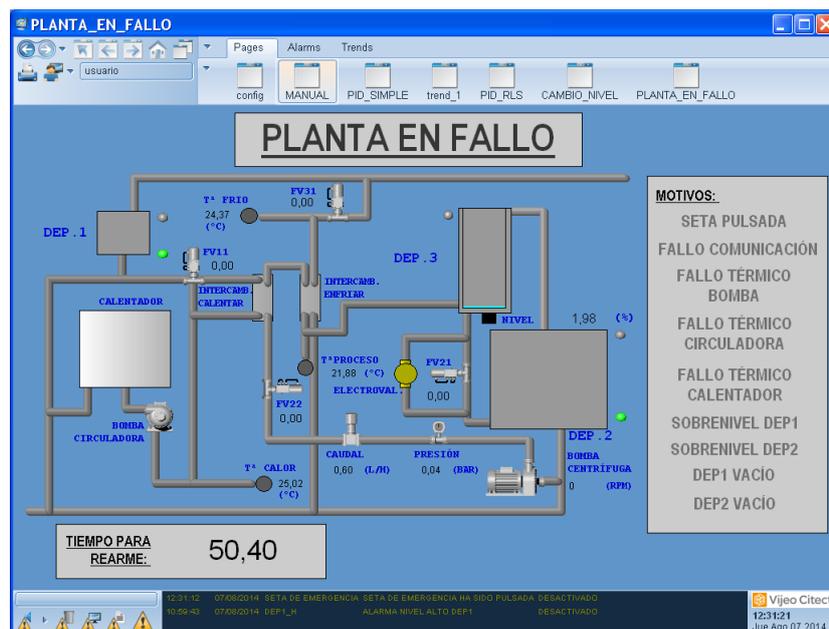


Figura 8.5.3.8 – Página de SCADA *PLANTA EN FALLO*

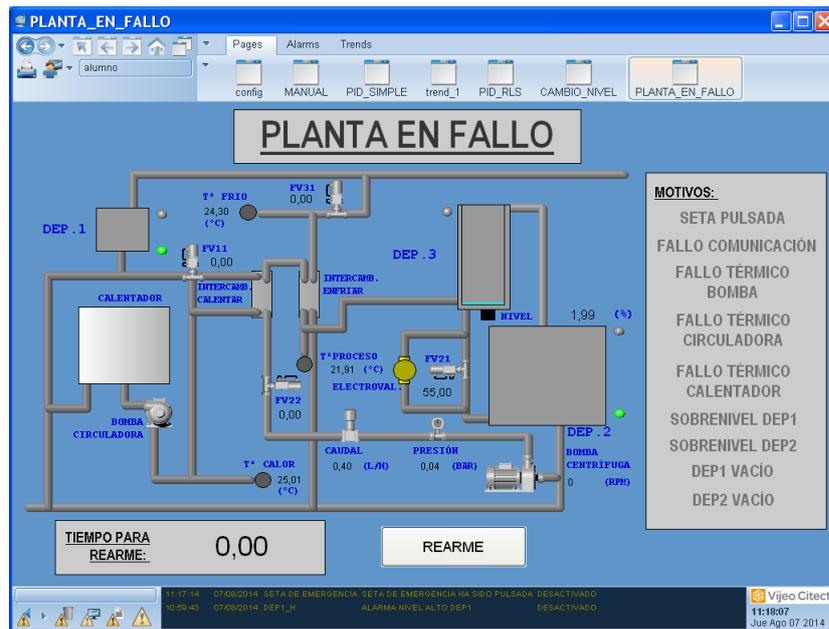


Figura 8.5.3.9 – Página de SCADA *PLANTA EN FALLO* lista para rearme

Esta es una de las páginas más importantes debido a que es donde se controla la seguridad. Las alarmas de menor entidad, como el sobrenivel del depósito de control, se pueden visualizar en las pantallas de alarmas correspondientes, así como en la parte inferior de las páginas descritas (excepto en la de tendencia).

8.5.3.8. Alarmas

En el programa se SCADA se configuran las alarmas que aparecen en la tabla 8.5.3.1, de forma que se activan cuando las variables a las que hacen referencia toman un determinado valor.

Tag de alarma	Nombre del grupo	Nombre de la alarma	Descripción	Tag de variable
TAG_ALARMA _DEP1_H	My_Cluster	DEP1_H	SOBRENIVEL EN EL DEPÓSITO DE EXPANSIÓN DEL CALENTADOR	SCADA _DEP1_H
TAG_ALARMA _DEP1_L	My_Cluster	DEP1_L	DEPÓSITO DE EXPANSIÓN DEL CALENTADOR VACÍO	SCADA _DEP1_L
TAG_ALARMA _DEP2_L	My_Cluster	DEP2_L	DEPÓSITO DE SUMINISTRO VACÍO	SCADA _DEP2_L
TAG_ALARMA _DEP2_H	My_Cluster	DEP2_H	SOBRENIVEL EN EL DEPÓSITO DE SUMINISTRO	SCADA _DEP2_H
TAG_ALARMA _SETA	My_Cluster	SETA DE EMERGENCIA	SETA DE EMERGENCIA HA SIDO PULSADA	NOT SCADA _SETA
TAG_ALARMA _CANAL	My_Cluster	FALLO EN LA COMUNICACIÓN	FALLO EN LA COMUNICACION ENTRE SENSORES Y ACTUADORES Y PLC	SCADA.FA LLO.CANAL
TAG_ALARMA _TERMICO _BOMBA	My_Cluster	TÉRMICO BOMBA	PROTECCIÓN TÉRMICA DE LA BOMBA CENTRÍFUGA	FALLO_BOM BA_TERMICO
TAG_ALARMA _TERMICO _CALENTADOR	My_Cluster	TÉRMICO CALENTADOR	PROTECCIÓN TÉRMICA DEL CALENTADOR	FALLO_CA LENTADOR _TERMICO

Tag de alarma	Nombre del grupo	Nombre de la alarma	Descripción	Tag de variable
TAG_ALARMA _TERMICO _CIRCULADORA	My_Cluster	TÉRMICO CIRCULA DORA	PROTECCIÓN TÉRMICA DE LA CIRCULADORA	FALLO_CIR CULADORA _TERMICO
TAG_ALARMA _CONFIRM _CALENTADOR	My_Cluster	CONFIRMACIÓN CALENTA DOR	CONFIRMACIÓN DE CONEXIÓN DEL CONTACTOR DEL CALENTADOR	FALLO_CA LENTADOR _CONFIRM
TAG_ALARMA _CONFIRM _CIRCULADORA	My_Cluster	CONFIRMACIÓN CIRCULA DORA	CONFIRMACIÓN DE CONEXIÓN DEL CONTACTOR DE LA CIRCULADORA	FALLO_CIR CULADORA _CONFIRM
TAG_ALARMA _CONFIRM _BOMBA	My_Cluster	CONFIRMACIÓN BOMBA	CONFIRMACIÓN DE CONEXIÓN DEL CONTACTOR DE LA BOMBA	FALLO _BOMBA _CONFIRM

Tabla 8.5.3.1 – Tags de Alarma

Las alarmas se pueden visualizar en cualquier página en la parte inferior (figura 8.5.3.10), pero sólo se muestran las tres alarmas más recientes. Para ver toda la lista de alarmas es necesario ir a las páginas de gestión de alarmas predefinidas en cualquier proyecto base.

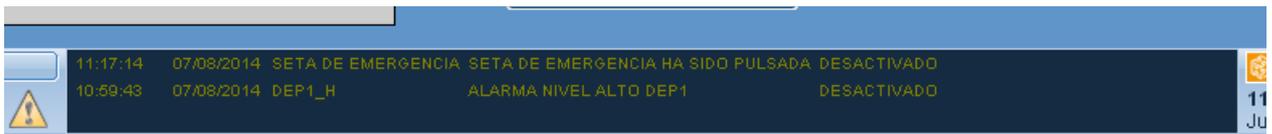


Figura 8.5.3.10 – Alarmas a pie de página

ANEXOS

TÍTULO: Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios

ANEXOS

PETICIONARIO: ESCOLA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2014

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ÁLVARO LÓPEZ VARELA

9 Documentación de partida	131
9.1 Propuesta inicial de asignación del TFG	131
9.2 Datos de partida	134
9.2.1 Lista de variables inicial	134
9.2.2 Programa disponible como datos iniciales	139
9.2.2.1 Bloques de función derivados	142
10 Cálculos	145
10.1 Obtención de parámetros de escalado de nivel	145
10.2 Obtención de parámetros del PID SIMPLE	146
10.3 Autoajuste	147
10.3.1 1 polo	147
10.3.2 2 polos	149
10.4 Cálculo de potencia	150
11 Programación	151
11.1 Lista de variables	151
11.2 Bloques de función derivados	162
11.2.1 Desescalado	162
11.2.1.1 Variables	162
11.2.1.2 Sección	162
11.2.2 Escalado	163
11.2.2.1 Variables	163
11.2.2.2 Sección	163
11.2.3 VÁLVULA	164
11.2.3.1 Variables	164
11.2.3.2 Sección	164
11.2.4 PID SIMPLE	165
11.2.4.1 Variables	165
11.2.4.2 Sección	166
11.2.5 REGULADOR	167
11.2.5.1 Variables	167
11.2.5.2 Sección	168
11.2.6 RLS 1 POLO	169
11.2.6.1 Variables	169
11.2.6.2 Sección	171
11.2.7 RLS 2 POLOS	174
11.2.7.1 Variables	174

11.2.7.2 Sección	178
11.2.8 AUTO 1 POLO	181
11.2.8.1 Variables	181
11.2.8.2 Sección	182
11.2.9 AUTO 2 POLOS	183
11.2.9.1 Variables	183
11.2.9.2 Sección	184
11.3 Secciones	185
11.3.1 SEGURIDAD	185
11.3.1.1 Transiciones	185
11.3.2 MANDO	187
11.3.2.1 Transiciones	187
11.3.3 FUNCIONAMIENTO	188
11.3.3.1 Transiciones	191
11.3.4 ENTRADAS_ANALOG	194
11.3.5 CONTROLES	197
11.3.6 PID	200
11.3.7 ACCIONES	203
11.3.8 SCADA	208
12 Páginas del SCADA	211

Capítulo 9

Documentación de partida

9.1. Propuesta inicial de asignación del TFG



ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

ASIGNACIÓN DE TRABAJO FIN DE GRADO

En virtud de la solicitud efectuada por:

En virtud da solicitude efectuada por:

APELLIDOS, NOMBRE: López Varela,Álvaro

APELIDOS E NOME:

DNI: **Fecha de Solicitud:** FEB2014

DNI: *Fecha de Solicitude:*

Alumno de esta escuela en la titulación de Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, se le comunica que la Comisión de Proyectos ha decidido asignarle el siguiente Trabajo Fin de Grado:

O alumno de esta escola na titulación de Grado en Enxeñería en Electrónica Industrial e Automática, comunícaselle que a Comisión de Proxectos ha decidido asignarlle o seguinte Traballo Fin de Grado:

Título T.F.G: Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios.

Número TFG: 770G01A45

TUTOR: (Titor) Meizoso Lopez, Maria Del Carmen

COTUTOR/CODIRECTOR: Vicente Suárez Peñaranda

La descripción y objetivos del Trabajo son los que figuran en el reverso de este documento:

A descripción e obxectivos do proxecto son os que figuran no reverso deste documento.

Ferrol a Viernes, 7 de Marzo del 2014

Retirei o meu Traballo Fin de Grado o día _____ de _____ do ano _____

Fdo: López Varela,Álvaro

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO:Objeto:

El objetivo del proyecto es la puesta en marcha de la planta de laboratorio de controles varios. Se preparará para la demostración de su funcionamiento desde un punto de vista divulgativo y la monitorización de todas las variables presentes. Además se programará un control sencillo y uno avanzado sobre el lazo de control de nivel.

Alcance:

- Puesta en marcha y testeo de la planta de laboratorio de controles varios.
- Desarrollar un scada o similar para visualización de variables y posibilidad de manipulación manual de aquellos elementos que lo permitan.
- Implementación de un control sencillo tipo PID sobre el lazo de control de nivel del depósito.
- Identificación del lazo anterior por mínimos cuadrados recursivos.
- Implementación de un PID adaptativo para el lazo anterior.

9.2. Datos de partida

Como datos de partida, se tienen las hojas de características de los elementos de la planta o en su defecto los catálogos, en los cuales se pueden encontrar las características principales de los mismos. Del mismo modo, se dispone de un programa base en Unity Pro XL que probablemente no había sido probado sobre la planta, así como una lista de variables en el programa que se corresponde básicamente con entradas y salidas correctamente direccionadas. En la programación realizada en el presente proyecto se modifica el nombre de estas variables.

9.2.1. Lista de variables inicial

En esta lista se enumeran las variables tal y como habían sido declaradas en un proyecto anterior del que se dispone, con los campos de Nombre, Tipo de variable, Dirección, Comentario y Valor. El tipo de variable T_ANA_IN_GEN es un tipo definido por el usuario que consta de un valor que es el que se envía o el que se mide y otro que monitoriza si existe algún error en el canal de comunicación. Los nombres de las variables que componen este tipo son CH.ERROR y VALUE, aunque esta última aparece modificada para poder tratar esta variable interna a un tipo definido por el usuario como una variable normal.

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
Apertura_FV11	INT	%QW0.5.3.0		
Apertura_FV21	INT	%QW0.5.1.0		
Apertura_FV22	INT	%QW0.5.2.0		
Apertura_FV31	INT	%QW0.5.0.0		
Calentador_Listo	EBOOL			

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
D01_Arranque _Calentador	EBOOL	%Q0.3.0		
D01_Conf_Mar cha_Calentador	EBOOL	%I0.2.13		
D01_Fallo_Confir macion_Marcha	EBOOL			
D01_Fallo_Termi co_Calentador	EBOOL	%I0.2.9		
D01_Nivel_Alto _LSH2	EBOOL	%I0.2.4		
D01_Nivel_Bajo _LSL2	EBOOL	%I0.2.3		
D01_Selector _Auto	EBOOL	%I0.2.6	Selector del depósito calentador en automático	
D01_Selector _Manual	EBOOL	%I0.2.7		
D02_Nivel_Alto _LSH1	EBOOL	%I0.2.1		
D01_Nivel_Bajo _LSL1	EBOOL	%I0.2.0		
D01_Nivel_Alto _LSH3	EBOOL	%I0.2.15		
DepositoVacio	EBOOL		Variable activa cuando no se alcanza el minimo de un depósito	
Estado_Inicial _OK	EBOOL		Variable que contiene un 1 si la planta está lista para el arranque	
Fallo_Bomba	EBOOL		Variable que se pone a 1 si falla el térmico de la bomba	
Fallo_Calentador	EBOOL		Variable que se pone a 1 si falla el térmico del calentador	
Fallo_Circuladora	EBOOL		Variable que se pone a 1 si falla el térmico de la circuladora	
FT21_Caudal _Entrada -CH_ERROR -VALUE	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.5 %I0.4.5.ERR %I0.4.5.0	Error de canal Valor de entrada analógica	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
FT11_Valvula _ACaliente_Salida -CH_ERROR -Apertura_FV11 (.VALUE)	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.5.3 %I0.5.3.ERR %I0.5.3.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
FT21_Valvula _D03_Salida -CH_ERROR -Apertura_FV21 (.VALUE)	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.5.1 %I0.5.1.ERR %I0.5.1.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
FT22_Valvula _Caudal_Salida -CH_ERROR -Apertura_FV22 (.VALUE)	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.5.2 %I0.5.3.ERR %I0.5.3.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
FT31_Valvula _AFria -CH_ERROR -Apertura_FV31 (.VALUE)	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.5.0 %I0.5.0.ERR %I0.5.0.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
LT01_Nivel _D03_Entrada -CH_ERROR -VALUE	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.4 %I0.4.4.ERR %I0.4.4.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
P01_Arranque _Circuladora	EBOOL	%Q0.3.1		
P01_AUTO	EBOOL	%I0.2.5	Selector de la bomba circuladora en automático	
P01_Conf_Mar cha_Circuladora	EBOOL	%I0.2.14		
P01_Fallo_Conf _Contacto	EBOOL			
P01_Fallo_Termi co_Circuladora	EBOOL	%I0.2.10		
P01_Marcha	EBOOL			

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
P01_Paro	EBOOL			
P01_Pulsador _Marcha	EBOOL			
P01_Pulsador _Paro	EBOOL			
P02_Conf_Mar cha_Bomba	EBOOL	%I0.2.12		
P02_Fallo_Conf _Contacto	EBOOL			
P02_Fallo_Termi co_Bomba	EBOOL	%I0.2.8		
P02_Variador_Fre cuencia_Marcha	EBOOL	%Q0.3.4		
P02_Variador_Fre cuencia_ON	EBOOL	%Q0.3.3		
P02_Variador _Salida -CH_ERROR -Velocidad_Va riador(.VALUE)	T_ANA _OUT_GEN BOOL INT	%CH0.5.4 %I0.5.4.ERR %Q0.5.4.0	Error de canal Valor de salida analógica	
Param_FV21 -in_min -in_max -out_min -out_max -clip	Para _SCALING REAL REAL REAL REAL BOOL			-10000.0 10000.0 0.0 10000.0
Parametros -in_min -in_max -out_min -out_max -clip	Para _SCALING REAL REAL REAL REAL BOOL			-10000.0 10000.0 0.0 10000.0

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
PID_Calentador	EBOOL			
PT21_Presion _Entrada -CH_ERROR -VALUE	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.3 %I0.4.3.ERR %IW0.4.3.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
PT21_Presostato	EBOOL	%I0.2.2		
Recirculadora _Lista	EBOOL			
Salida_Control _Motores	INT			
Salida_Control _Motores_Valvulas	REAL			
SobreNivel	EBOOL		A 1 cuando se supera el máximo de un depósito	
Stop_Emergencia	EBOOL	%I0.2.11	Seta de emergencia activa	
Termicos_OK	EBOOL		A 1 si alguno de los térmicos está en fallo	
TT11_Temperat_A Caliente_Entrada -CH_ERROR -VALUE	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.0 %I0.4.0.ERR %IW0.4.0.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
TT21_Temperat_A Proceso_Entrada -CH_ERROR -VALUE	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.1 %I0.4.1.ERR %IW0.4.1.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
TT31_Temperat_Agua _Fria_Entrada -CH_ERROR -VALUE	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.2 %I0.4.2.ERR %IW0.4.2.0	Error de canal Valor de entrada analógica	
Velocidad_Va riador	INT	%Q0.5.4.0	Indicará la velocidad al variador de la bomba	

9.2.2. Programa disponible como datos iniciales

El programa se compone de 3 secciones: *Arranque_Bomba*, *Control_Desbordamiento* y *Apertura_Valvulas*. En la sección *Arranque_Bomba* (figura 9.2.2.1), se programa el funcionamiento de la bomba al 50% cuando se cumplen todas las condiciones de seguridad planteadas (seta de emergencia no pulsada, térmico de la bomba no activado, agua en el depósito de suministro y presostato desactivado). Del mismo modo en esta sección se comprueba la conexión del contactor del variador antes de activarlo. La consigna se le envía al variador mediante un bloque de función derivado *Escala_Convers_Entrada_Analog*.

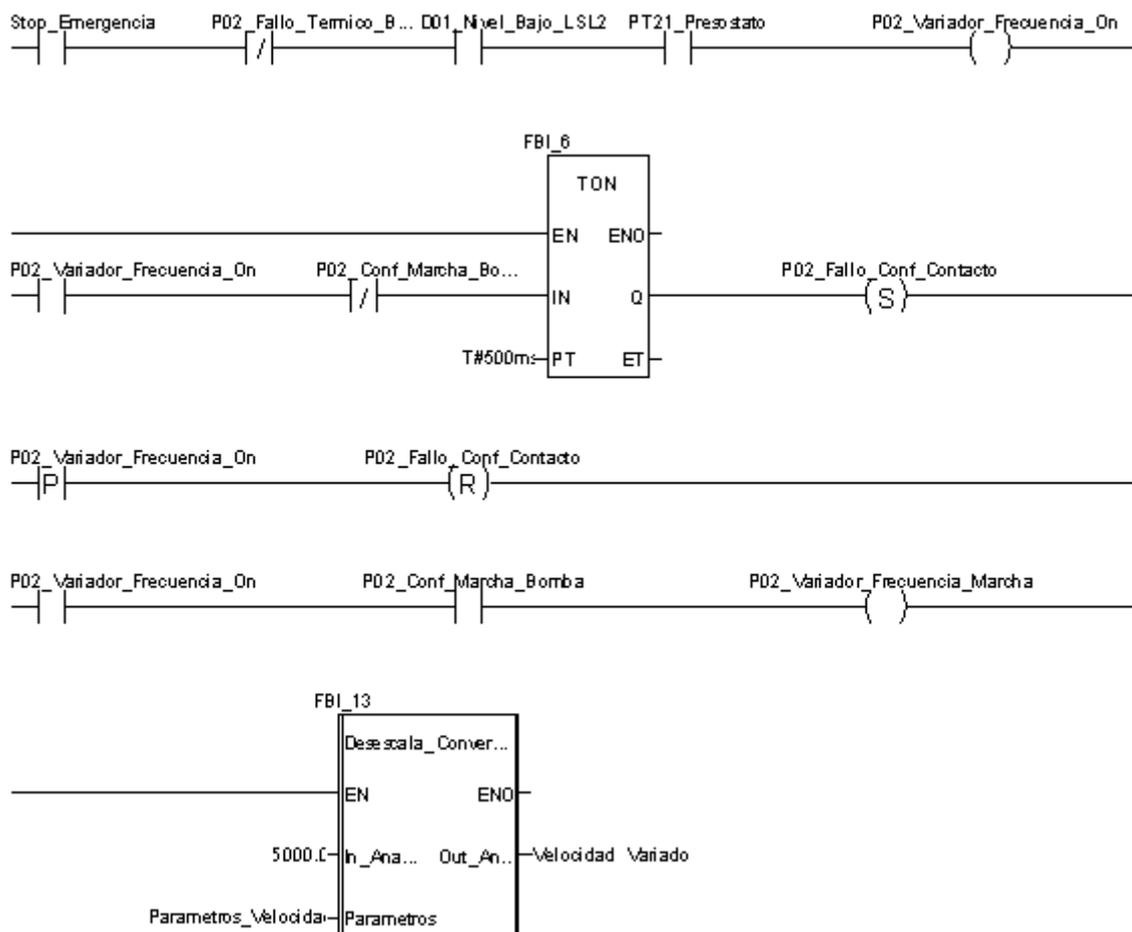


Figura 9.2.2.1 – Sección Arranque Bomba

En la sección *Control_Desbordamiento* (figura 9.2.2.2) se comprueban que no estén activados ninguno de los detectores de nivel, desactivando la bomba en caso contrario.

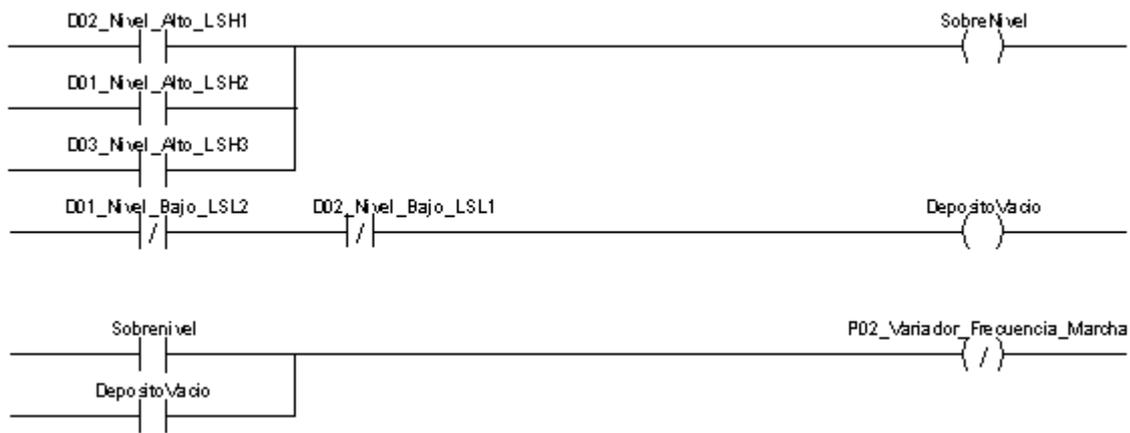


Figura 9.2.2.2 – Sección *Control.Desbordamiento*

En la sección *Apertura_Valvulas* (figura 9.2.2.4) se abren totalmente todas las válvulas excepto la de vaciado del depósito de control, que se pone al 50%. Para ello se utilizan el bloque de función derivado *Desescala_Convers_Salida_Analog*, que básicamente convierte un valor real de apertura en un entero que se le envía a las servoválvulas.

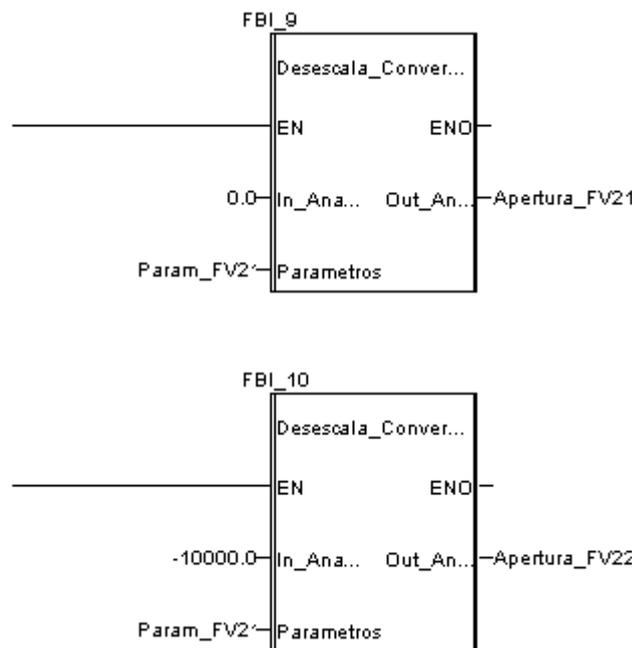


Figura 9.2.2.3 – Sección *Apertura_Valvulas*

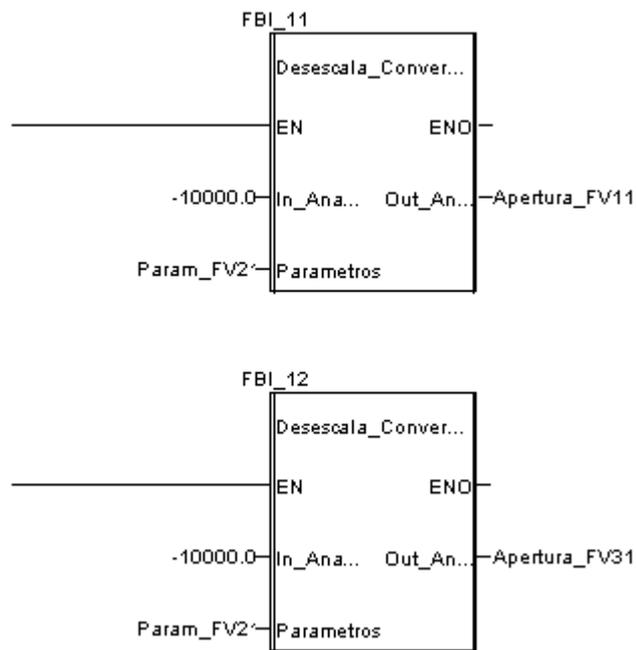


Figura 9.2.2.4 – Sección *Apertura_Valvulas*

9.2.2.1. Bloques de función derivados

- *Escala_Convers_Entrada_Analog*

El bloque de función *Escala_Convers_Entrada_Analog* (figura 11.2.2.1) realiza una conversión de entero a real y después escala el valor obtenido entre unos parámetros determinados (entrada máxima, entrada mínima, salida máxima y salida mínima, ver figura ??).

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Desescala_Convers_Salida_Analog		<DFB>	
<entradas>			
In_Analog_Real	1	INT	
Parametros	2	Para_SCALING	
in_min		REAL	
in_max		REAL	
out_min		REAL	
out_max		REAL	
clip		BOOL	
<salidas>			
Out_Analog_Escalada	1	INT	
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
FBI_1		SCALING	
<secciones>			
Escala_Convers_Entrada_Analog		<LD>	

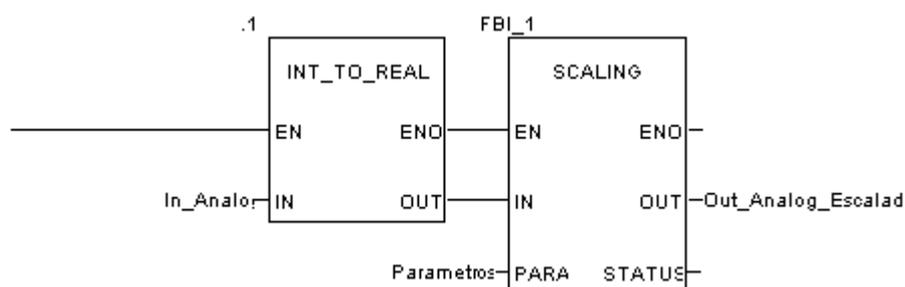


Figura 9.2.2.5 – Sección del bloque *Escala_Convers_Entrada_Analog*

■ *Desescala_Convers_Salida_Analog*

El bloque de función *Desescala_Convers_Salida_Analog* (figura 11.2.1.1) realiza un esclado entre unos parámetros determinados (entrada máxima, entrada mínima, salida máxima y salida mínima, ver figura ??) y después trunca el valor para convertirlo en un entero que se puede enviar a un actuador.

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Desescala_Convers_Salida_Analog		<DFB>	
<entradas>			
In_Analog_Real	1	REAL	
Parametros	2	Para_SCALING	
in_min		REAL	
in_max		REAL	
out_min		REAL	
out_max		REAL	
clip		BOOL	
<salidas>			
Out_Analog_Desescalada	1	INT	
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
FBI_1		SCALING	
<secciones>			
Desescala_Convers_Salida_Analog		<LD>	

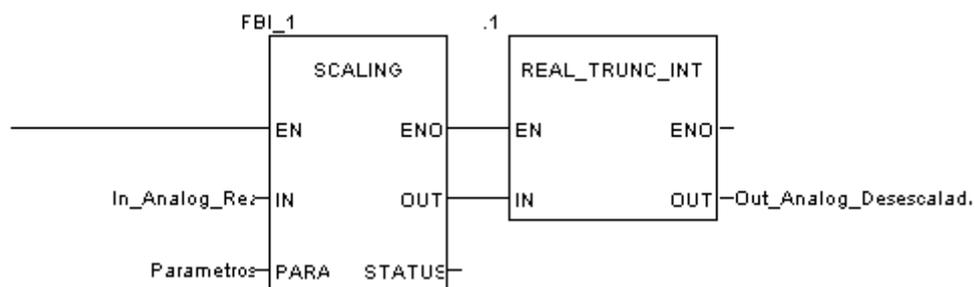


Figura 9.2.2.6 – Sección del bloque *Escala_Convers_Entrada_Analog*

Capítulo 10

Cálculos

10.1. Obtención de parámetros de escalado de nivel

Para obtener estos parámetros, se llena el depósito a dos temperaturas determinadas (el procedimiento se repite varias veces para verificarlo), y a raíz de los valores que da el sensor de nivel se establece la relación entre nivel y temperatura.

En primer lugar, se llena el depósito a temperatura ambiente, y se obtiene una medida. A continuación, se enciende el calentador y la circuladora y se habilita el paso de agua caliente por el intercambiador (válvula al 100 %), mientras se hace circular el agua por el circuito de proceso con la bomba a velocidad media y las válvulas de vaciado completamente abiertas. De este modo, se consigue incrementar la temperatura del líquido de proceso. Una vez caliente, se vuelve a llenar el depósito de control de nivel, y se obtiene otra medida (ver tabla 10.1.0.1)

	Nivel	Temperatura
1ª medida	7678	21.0 ° C
2ª medida	7782	27.6 ° C

Tabla 10.1.0.1 – Medidas para el escalado de nivel con la temperatura

$$Tasa\ variación = \frac{7782 - 7678}{27,6 - 21,0} = \frac{104}{6,6} = 15,76^{\circ}C^{-1} \quad (10.1.0.1)$$

De esta forma el nivel se puede calcular como se indica en la ecuación 10.1.0.2, considerando que el agua tiene su mínima densidad a los 4 °C:

$$Nivel = Param + (TProceso - 4) * 15,76 \quad (10.1.0.2)$$

Siendo:

$$Param = 7782 - (TProceso - 4) * 15,76 \approx 7400 \quad (10.1.0.3)$$

10.2. Obtención de parámetros del PID SIMPLE

La forma de obtener los parámetros es puramente empírica, pero en primer lugar se calculan unos parámetros base a partir de los cuales se realizará un barrido en torno a ellos para optimizarlos. La obtención de estos parámetros se realiza en lazo abierto según el siguiente procedimiento:

1. Esperar hasta que la salida esté en estado estacionario. Para ello, se establecen unas condiciones de funcionamiento constantes (t^a cte, válvula de entrada completamente abierta, servoválvula de vaciado al 55 % de cierre y electroválvula cerrada). En estas condiciones, se establece la potencia de la bomba al 38 %, hasta conseguir una salida estacionaria del 16 % de nivel en el depósito de control.
2. Provocar un salto en la variable manipulada: se cambia la consigna de la bomba a 50 %.
3. Monitorizar la salida hasta que alcance un nuevo valor estacionario: el valor alcanzado es 70 %.
4. Obtener K como el cociente entre el rango de variación de la salida entre el de la entrada

$$K = \frac{70 - 16}{50 - 38} = 4,5 \quad (10.2.0.4)$$

5. Medir el instante en que la señal se encuentra al 28,3 % y al 63,2 % (ver 8.3.2.1). Los tiempos medidos son:

$$t_1 = 68\text{seg} \quad (10.2.0.5)$$

$$t_2 = 180\text{seg} \quad (10.2.0.6)$$

6. Obtener $T_p = 1,5(t_2 - t_1)$ y $T_o = t_2 - T_p$.

$$T_p = 1,5(t_2 - t_1) = 1,5(180 - 68) = 168\text{seg} \quad (10.2.0.7)$$

$$T_o = t_2 - T_p = 180 - 168 = 12\text{seg} \quad (10.2.0.8)$$

Según este método se pueden obtener los siguientes parámetros. Éstos todavía no son óptimos, pero establecen una base para comenzar a experimentar.

Método de Ziegler y Nichols

$$K_P = 1,2 * \frac{T_P}{K T_O} = 1,2 * \frac{168}{4,5 * 12} = 3,73 \quad (10.2.0.9)$$

$$T_I = 2 T_O = 2 * 12 = 24 \text{seg} = 0,4 \text{min} \quad (10.2.0.10)$$

$$T_D = 0,5 T_O = 0,5 * 12 = 6 \text{seg} = 0,1 \text{min} \quad (10.2.0.11)$$

Método de Aström y Hägglund

$$K_P = \frac{1}{K} * \left(0,2 + 0,45 \frac{T_P}{T_O} \right) = \frac{1}{4,5} * \left(0,2 + 0,45 \frac{168}{12} \right) = 1,44 \quad (10.2.0.12)$$

$$T_I = \frac{0,4 T_O + 0,8 T_P}{T_O + 0,1 T_P} * T_P = \frac{0,412 + 0,8168}{12 + 0,1 * 168} * 168 = 58 \text{seg} = 0,97 \text{min} \quad (10.2.0.13)$$

$$T_D = \frac{0,5 T_O T_P}{0,3 T_O + T_P} = \frac{0,5 * 12 * 168}{0,3 * 12 + 168} = 5,87 \text{seg} = 0,098 \text{min} \quad (10.2.0.14)$$

Los resultados obtenidos se repiten, obteniéndose datos similares.

10.3. Autoajuste

10.3.1. 1 polo

La función de control de la que se parte es la siguiente:

$$G_P(z^{-1}) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{b_1 * z^{-1}}{1 - a_1 * z^{-1}} \quad (10.3.1.1)$$

y la función de transferencia del PID en la configuración de velocidad de la forma:

$$G_r(z^{-1}) = \frac{u(t)}{e(t)} = \frac{\rho_0 + \rho_1 * z^{-1} + \rho_2 * z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (10.3.1.2)$$

El polinomio característico en bucle cerrado se calcula haciendo $G_P * G_r + 1 = 0$ y se llega a la ecuación:

$$z^{-3} + \frac{a_1 + b_1 * \rho_1}{b_1 * \rho_2} * z^{-2} + \frac{b_1 * \rho_0 - a_1 - 1}{b_1 * \rho_2} * z^{-1} + \frac{1}{b_1 * \rho_2} = 0 \quad (10.3.1.3)$$

Ahora se impone la condición de que el sistema en bucle cerrado tenga un polo triple en el plano z^{-1} de valor a . Para que el sistema sea estable, los polos deben quedar fuera del círculo de radio unidad, es decir, a debe ser un valor real mayor que 1. Esto supone que el polinomio característico quede de la siguiente forma:

$$(z^{-1} - a)^3 = z^{-3} - 3 * z^{-2} + 3 * z^{-1} + 1 \quad (10.3.1.4)$$

Igualando las ecuaciones 10.3.1.3 y 10.3.1.4, y resolviendo, se obtienen los coeficientes del regulador:

$$\rho_0 = \frac{1}{b_1} * \left(1 + a_1 - \frac{3}{a}\right) \quad (10.3.1.5)$$

$$\rho_1 = \frac{1}{b_1} * \left(a_1 - \frac{3}{a^2}\right) \quad (10.3.1.6)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{b_1 * a^3} \quad (10.3.1.7)$$

Estos parámetros se relacionan con los parámetros clásicos del PID de la siguiente forma: si se parte de la ecuación del PID discreto incremental o en su forma de velocidad (ecuación 3.1.2.9), y se iguala a la ecuación del regulador planteada (ecuación 10.3.1.2), las relaciones obtenidas son:

$$K_P = -(\rho_1 + 2\rho_2) \quad (10.3.1.8)$$

$$T_I = \frac{K_P * T_C}{\rho_0 + \rho_1 + \rho_2} \quad (10.3.1.9)$$

$$T_D = \frac{\rho_2 * T_C}{K_P} \quad (10.3.1.10)$$

10.3.2. 2 polos

La función de control de la que se parte es la siguiente:

$$G_P(z^{-1}) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{b_1 * z^{-1}}{1 - a_1 * z^{-1} - a_2 * z^{-2}} \quad (10.3.2.1)$$

y la función de transferencia del PID en la configuración de velocidad de la forma anteriormente mencionada.

El polinomio característico en bucle cerrado se calcula haciendo $G_P * G_r + 1 = 0$ y se llega a la ecuación:

$$z^{-3} + \frac{a_1 - a_2 + b_1 * p_1}{b_1 * p_2 + a_2} * z^{-2} + \frac{b_1 * p_0 - a_1 - 1}{b_1 * p_2 - a_2} * z^{-1} + \frac{1}{b_1 * p_2 + a_2} = 0 \quad (10.3.2.2)$$

Igualando las ecuaciones 10.3.2.1 y 10.3.1.4, y resolviendo, se obtienen los coeficientes del regulador:

$$p_0 = \frac{1}{b_1} * \left(1 + a_1 - \frac{3}{a}\right) \quad (10.3.2.3)$$

$$p_1 = \frac{1}{b_1} * \left(a_2 + a_1 - \frac{3}{a^2}\right) \quad (10.3.2.4)$$

$$p_2 = \frac{1}{b_1} * \left(a_2 - \frac{1}{a^3}\right) \quad (10.3.2.5)$$

La relación con los parámetros clásicos del PID es la misma que la expuesta en el apartado anterior.

10.4. Cálculo de potencia

Nombre	Unidades	Consumo unitario (A)	Consumo total (A)
Autómata programable	1	0,3	0,3
Fuente de alimentación ABL7CEM	1	0,45	0,45
Fuente de alimentación ABL7RE	1	0,83	0,83
Variador ATV31 asociado a la bomba centrífuga	1	6,9	6,9
Calentador	1	8	8
Bomba circuladora	1	0,4	0,4
Relé de interface	3	0,003	0,009
<i>CONSUMO TOTAL</i>			16,889

Figura 10.4.0.1 – Cálculo de potencias

Capítulo 11

Programación

11.1. Lista de variables

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
Actual_FV11	REAL	%MW36	Posición actual de la válvula de agua fría	
Actual_FV21	REAL	%MW34	Posición actual de la válvula de vaciado del tanque de control	
Actual_FV22	REAL	%MW32	Posición actual de la válvula de llenado del tanque de control	
Actual_FV31	REAL	%MW30	Posición actual de la válvula de agua caliente	
Aux_Fallo_Bomba_Confirm	EBOOL		Variable auxiliar de confirmación de conexión de la bomba	
Aux_Fallo_Calentador_Confirm	EBOOL		Variable auxiliar de confirmación de conexión del calentador	
Aux_Fallo_Circuladora_Confirm	EBOOL		Variable auxiliar de confirmación de conexión de la circuladora	
Aux_Seg	EBOOL		Variable que se activa una vez cada segundo	
CH_Caudal	T_ANA _IN_GEN	%CH0.4.5	Medidor de caudal	
-CH_ERROR	BOOL	%I0.4.5.ERR	Error de canal	
-IN_Caudal (.VALUE)	INT	%IW0.4.5.0	Valor de entrada analógica	
CH_FV11	T_ANA _OUT_GEN	%CH0.5.3	Válvula de entrada de agua fría	
-CH_ERROR	BOOL	%I0.5.3.ERR	Error de canal	
-OUT_FV11_Abrir (.VALUE)	INT	%QW0.5.3.0	Valor de salida analógica	
CH_FV21	T_ANA _OUT_GEN	%CH0.5.1	Válvula de vaciado del depósito de control	
-CH_ERROR	BOOL	%I0.5.1.ERR	Error de canal	
-OUT_FV21_Abrir (.VALUE)	INT	%QW0.5.1.0	Valor de salida analógica	
CH_FV22	T_ANA _OUT_GEN	%CH0.5.2	Válvula de entrada del depósito de control	
-CH_ERROR	BOOL	%I0.5.2.ERR	Error de canal	
-OUT_FV22_Abrir (.VALUE)	INT	%QW0.5.2.0	Valor de salida analógica	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
CH_FV31 -CH_ERROR -OUT_FV31_Abrir (.VALUE)	T_ANA _OUT_GEN BOOL INT	%CH0.5.0 %I0.5.0.ERR %QW0.5.0.0	Válvula de entrada de agua caliente al intercambiador Error de canal Valor de salida analógica	
CH_Nivel_DEP3 -CH_ERROR -IN_Nivel_DEP3 (.VALUE)	T_ANA _OUT_GEN BOOL INT	%CH0.4.6 %I0.4.6.ERR %IW0.4.6.0	Medidor de nivel del depósito de control Error de canal Valor de entrada analógica	
CH_Presion -CH_ERROR -IN_Presion (.VALUE)	T_ANA _OUT_GEN BOOL INT	%CH0.4.3 %I0.4.3.ERR %IW0.4.3.0	Medidor de presión a la salida de la bomba Error de canal Valor de entrada analógica	
CH_Temp_Caliente -CH_ERROR -IN_Temp_Caliente (.VALUE)	T_ANA _OUT_GEN BOOL INT	%CH0.4.0 %I0.4.0.ERR %IW0.4.0.0	Medidor de temperatura del circuito conectado al calentador Error de canal Valor de entrada analógica	
CH_Temp_Fria -CH_ERROR -IN_Temp_Fria (.VALUE)	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.2 %I0.4.2.ERR %IW0.4.2.0	Medidor de temperatura del circuito de agua fría Error de canal Valor de entrada analógica	
CH_Temp_Proceso -CH_ERROR -IN_Temp_Proceso (.VALUE)	T_ANA _IN_GEN BOOL INT	%CH0.4.1 %I0.4.1.ERR %IW0.4.1.0	Medidor de temperatura del agua de proceso Error de canal Valor de entrada analógica	
CH_Velocidad_VF -CH_ERROR -OUT_Variador _Velocidad(.VALUE)	T_ANA _OUT_GEN BOOL INT	%CH0.5.4 %I0.5.4.ERR %QW0.5.4.0	Velocidad del variador de frecuencia Error de canal Valor de salida analógica	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
Fallo_Bomba _Confirm	EBOOL	%M33		
Fallo_Bomba _Termico	EBOOL	%M26	Variable que se pone a 1 si falla el téxico de la bomba	
Fallo_Calen tador_Confirm	EBOOL	%M32		
Fallo_Calen tador_Termico	EBOOL	%M26	Variable que se pone a 1 si falla el téxico del calentador	
Fallo_Circu ladora_Confirm	EBOOL	%M31		
Fallo_Circu ladora_Termico	EBOOL	%M24	Variable que se pone a 1 si falla el téxico de la circuladora	
G_Inicial	ARRAY[1..3] OF REAL		Inicio de la matriz de parámetros	
-G_Inicial[1]	REAL			-0.97
-G_Inicial[2]	REAL			-0.29
-G_Inicial[3]	REAL			0.0025
G_Inicial_2	ARRAY[1..2] OF REAL		Inicio de la matriz de parámetros	
-G_Inicial_2[1]	REAL			1.0
-G_Inicial_2[2]	REAL			2.0
IN_Bomba _Confirm	EBOOL	%I0.2.12	Confirmación de actuación del relé correspondiente (NA)	
IN_Calen tador_AUTO	EBOOL	%I0.2.6	Selector del calentador en automático	
IN_Calen tador_Confirm	EBOOL	%I0.2.13	Confirmación de actuación del relé correspondiente (NA)	
IN_Calen tador_MAN	EBOOL	%I0.2.7	Selector del calentador en manual	
IN_Caudal	INT	%IW0.4.5.0	Caudal a la salida de la bomba (5 veces superior al valor real en l/h)	
IN_Circu ladora_AUTO	EBOOL	%I0.2.5	Selector de la circuladora en automático	
IN_Circu ladora_Confirm	EBOOL	%I0.2.14	Confirmación de actuación del relé correspondiente (NA)	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
IN_DEP1_H	EBOOL	%I0.2.1	Nivel alto en el depósito de expansión del calentador (DEP1) (NA)	
IN_DEP1_L	EBOOL	%I0.2.0	Nivel bajo en el depósito de expansión del calentador (DEP1) (NA)	
IN_DEP2_H	EBOOL	%I0.2.4	Nivel alto en el depósito de suministro (DEP2) (NA)	
IN_DEP2.L	EBOOL	%I0.2.3	Nivel bajo en el depósito de suministro (DEP2) (NA)	
IN_DEP3_H	EBOOL	%I0.2.15	Nivel alto en el depósito de control (DEP3) (NA)	
IN_Nivel_DEP3	INT	%IW0.4.6.0	Entrada del sensor de presión que mide el nivel de DEP3	
IN_Presion	INT	%IW0.4.3.0	Entrada del sensor que mide la presión a la salida de la bomba	
IN_Presostato	EBOOL	%I0.2.2	Presión superior a la permitida para el funcionamiento de la bomba (NC)	
IN_Seta _Emergencia	EBOOL	%I0.2.11	Seta de emergencia activada (NC)	
IN_Temp _Caliente	INT	%IW0.4.0.0	Temperatura del agua del circuito calentador expresada en centésimas de grado	
IN_Temp _Fria	INT	%IW0.4.2.0	Temperatura del agua del circuito enfriador expresada en centésimas de grado	
IN_Temp _Proceso	INT	%IW0.4.1.0	Temperatura del agua del circuito de proceso expresada en centésimas de grado	
IN_Termico _Bomba	EBOOL	%I0.2.8	Fallo térmico de la bomba (NA)	
IN_Termico _Calentador	EBOOL	%I0.2.9	Fallo térmico del calentador (NA)	
IN_Termico _Circuladora	EBOOL	%I0.2.10	Fallo térmico de la circuladora(NA)	
MARCHA	EBOOL	%M22	MARCHA	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
OUT_Calenta dor_Arranque	EBOOL	%Q0.3.0	Pone en marcha el calentador	
OUT_Circula dora_Arranque	EBOOL	%Q0.3.1	Pone en marcha la circuladora	
OUT_Electro valvula	EBOOL	%Q0.3.2	Electroválvula cerrada a nivel bajo	
OUT_FV11 _Abrir	INT	%QW0.5.3.0	Apertura de la válvula de entrada de agua fría	
OUT_FV21 _Abrir	INT	%QW0.5.1.0	Apertura de la válvula de vaciado del depósito de control	
OUT_FV22 _Abrir	INT	%QW0.5.2.0	Apertura de la válvula de entrada al depósito de control	
OUT_FV31 _Abrir _Abrir	INT	%QW0.5.0.0	Apertura de la válvula de entrada de agua caliente al intercambiador	
OUT_Varia dor_Marcha	EBOOL	%Q0.3.4	Marcha del variador de frecuencia	
OUT_Varia dor_ON	EBOOL	%Q0.3.3	Encendido del variador de frecuencia	
OUT_Variador _Velocidad	INT	%QW0.5.4.0	Valor entero que indica la velocidad al variador de frecuencia	
P_Inicial -P_Inicial[1] —P_Inicial[1][1] —P_Inicial[1][2] —P_Inicial[1][3] -P_Inicial[2] —P_Inicial[2][1] —P_Inicial[2][2] —P_Inicial[2][3] -P_Inicial[3] —P_Inicial[3][1] —P_Inicial[3][2] —P_Inicial[3][3]	ARRAY[1..3,1..3] OF REAL ARRAY[1..3] REAL REAL REAL ARRAY[1..3] REAL REAL REAL ARRAY[1..3] REAL REAL REAL		Valor de la matriz para el cálculo de parámetros	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
P_Inicial	ARRAY[1..2,1..2] OF REAL		Valor entero de la matriz para el cálculo de parámetros	
-P_Inicial[1]	ARRAY[1..2]			
---P_Inicial[1][1]	REAL]			
---P_Inicial[1][2]	REAL			
-P_Inicial[2]	ARRAY[1..2]			
---P_Inicial[2][1]	REAL			
---P_Inicial[2][2]	REAL			
Param_Max	REAL		Parámetro de calibración de nivel	7400.0
Param_Nivel	Para _SCALING			
-in_min	REAL			0.0
-in_max	REAL			8000.0
-out_min	REAL			0.0
-out_max	REAL			100.0
-clip	BOOL			
Parametros_Velocidad	Para _SCALING			
-in_min	REAL			0.0
-in_max	REAL			100.0
-out_min	REAL			0.0
-out_max	REAL			10000.0
-clip	BOOL			
PARO	EBOOL	%M23	PARO	
Processing_FV11	EBOOL	%M21	Válvula de agua fría en movimiento	
Processing_FV21	EBOOL	%M20	Válvula de vaciado del depósito de control en movimiento	
Processing_FV22	EBOOL	%M19	Válvula de llenado del depósito de control e n movimiento	
Processing_FV31	EBOOL	%M18	Válvula de agua caliente en movimiento	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
SCADA_a1 _1POLO	REAL	%MW44	Parámetro de identificación	
SCADA_a1 _2POLOS	REAL	%MW48	Parámetro de identificación	
SCADA_a2 _2POLOS	REAL	%MW50	Parámetro de identificación	
SCADA_Auto _Man	EBOOL	%M1	Automático a nivel alto, manual a nivel bajo	
SCADA_b1 _1POLO	REAL	%MW46	Parámetro de identificación	
SCADA_b1 _2POLOS	REAL	%MW52	Parámetro de identificación	
SCADA_Calentador _Arranque	EBOOL	%M2	Habilitación del calentador	
SCADA_Calentador _AUTO	EBOOL	%M36	Calentador en modo automático	
SCADA_Calentador _MAN	EBOOL	%M35	Calentador en modo manual	
SCADA_Calentador _ON	EBOOL	%M37	Calentador encendido	
SCADA_Cambio _Liq	EBOOL	%M11	Habilita la recalibración de nivel	
SCADA_Caudal	REAL	%MW0	Valor de caudal	
SCADA_Circula dora_Arranque	EBOOL	%M3	Habilita la circuladora	
SCADA_Circula dora_AUTO	EBOOL	%M34	Circuladora en automático	
SCADA_Circula dora_ON	EBOOL	%M38	Circuladora encendida	
SCADA _DEP1_H	EBOOL	%M17	Nivel alto en el tanque de expansión del calentador	
SCADA _DEP1_L	EBOOL	%M16	Nivel bajo en el tanque de expansión del calentador	
SCADA _DEP2_H	EBOOL	%M15	Nivel alto en el tanque de suministro	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
SCADA_DEP2_L	EBOOL	%M14	Nivel bajo en el tanque de suministro	
SCADA_DEP3_H	EBOOL	%M13	Nivel alto en el tanque de control	
SCADA_DEP_SobreNivel	EBOOL		Alguno de los depósitos está por encima de su nivel máximo	
SCADA_DEP_Vacío	EBOOL		Alguno de los depósitos está por debajo de su nivel mínimo	
SCADA_Elec_troválvula	EBOOL	%M4	Activa la electroválvula	
SCADA_F_Olvido	REAL	%MW42	Factor de olvido de la identificación RLS	0.99
SCADA_Fallo_Canal	EBOOL	%M5	Fallo en la comunicación entre el PLC y los elementos de la planta	0.99
SCADA_Fallo_Termicos	EBOOL	%M28	Uno de los térmicos está activado	
SCADA_FV11	REAL	%MW4	Consigna de apertura de la válvula de agua fría	
SCADA_FV21	REAL	%MW6	Consigna de apertura de la válvula vaciado del depósito de control de nivel	
SCADA_FV22	REAL	%MW8	Consigna de apertura de la válvula llenado del depósito de control de nivel	
SCADA_FV31	REAL	%MW10	Consigna de apertura de la válvula agua caliente	
SCADA_G_1_P -SCADA_G_1_P[1] -SCADA_G_1_P[2]	ARRAY[1..2] OF REAL REAL REAL		Parámetros de la función de control de un polo	
SCADA_G_2_P -SCADA_G_2_P[1] -SCADA_G_2_P[2] -SCADA_G_2_P[3]	ARRAY[1..3] OF REAL REAL REAL REAL		Parámetros de la función de control de un 2 polos	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
SCADA_KM	REAL	%MW40	Ganancia auxiliar para calibrar el ajuste del PID	
SCADA_KP	REAL	%MW12	Parámetro proporcional del PID	7.3
SCADA_MARCHA	EBOOL	%M6	MARCHA	
SCADA_Nivel_DEP3	REAL	%MW14	Valor del nivel de agua del depósito de control	
SCADA_ON_OFF	EBOOL	%M0	ON a nivel alto, OFF a nivel bajo	
SCADA_Paro	EBOOL	%M7	Paro	
SCADA_PID_Avanzado	EBOOL	%M8	PID avanzado seleccionado	
SCADA_PID_REG	EBOOL	%M27	PID a nivel alto, REG a nivel bajo	
SCADA_PID_SIMPLE	EBOOL	%M9	PID simple seleccionado	
SCADA_Polo_Triple	REAL	%M38	Posición del polo triple del autoajuste del PID	10.0
SCADA_Presion	REAL	%M16	Valor de la presión a la salida de la bomba	
SCADA_Presostato	EBOOL	%M10	Presostato activo	
SCADA_REG_Param -SCADA_REG_Param[1] -SCADA_REG_Param[2] -SCADA_REG_Param[3]	ARRAY[1..3] OF REAL REAL REAL REAL		Parámetros de control del regulador	
SCADA_RLS_1_2	EBOOL	%M12	Identificación de 1 polo a nivel alto, 2 a nivel bajo	
SCADA_Seta	EBOOL	%M29	Variable que se pone a 0 cuando se activa la seta de emergencia	

Nombre	Tipo	Dirección	Comentario	Valor
SCADA_SP _Nivel	REAL	%MW2	Consigna de nivel	
SCADA_Td	REAL	%MW18	Parámetro diferencial del PID	0.23
SCADA_Temp _Caliente	REAL	%MW20	Valor de la temperatura del circuito de agua caliente	
SCADA_Temp _Fria	REAL	%MW22	Valor de la temperatura del circuito de agua fria	
SCADA_Temp _Proceso	REAL	%MW24	Valor de la temperatura del circuito de agua proceso	
SCADA_Ti	REAL	%MW26	Parámetro integral del PID	4.7
SCADA _Variador	REAL	%MW28	Valor de entrada al variador de frecuencia	
SCADA_Varia dor_Marcha	EBOOL	%M30	Variable que indica si el variador está activo	
Z_Error	REAL		Error actual del PID	
Z_flag _PID _PID	EBOOL		Variable que se activa al iniciarse un modo de control automático	

Tabla 11.1.0.1 – Lista de las variables de programa

11.2. Bloques de función derivados

11.2.1. Desescalado

11.2.1.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Desescala_Convers_Salida_Analog		<DFB>	
<entradas>			
In_Analog_Real	1	REAL	
Parametros	2	Para_SCALING	
in_min		REAL	
in_max		REAL	
out_min		REAL	
out_max		REAL	
clip		BOOL	
<salidas>			
Out_Analog_Desescalada	1	INT	
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
FBI_1		SCALING	
<secciones>			
Desescala_Convers_Salida_Analog		<LD>	

11.2.1.2. Sección

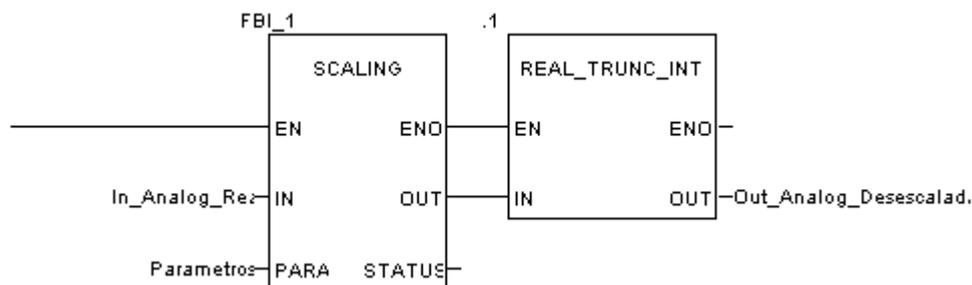


Figura 11.2.1.1 – Sección del bloque *Escala_Convers_Entrada_Analog*

11.2.2. Escalado

11.2.2.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Desescala_Convers_Salida_Analog		<DFB>	
<entradas>			
In_Analog_Real	1	INT	
Parametros	2	Para_SCALING	
in_min		REAL	
in_max		REAL	
out_min		REAL	
out_max		REAL	
clip		BOOL	
<salidas>			
Out_Analog_Escalada	1	INT	
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
FBI_1		SCALING	
<secciones>			
Escala_Convers_Entrada_Analog		<LD>	

11.2.2.2. Sección

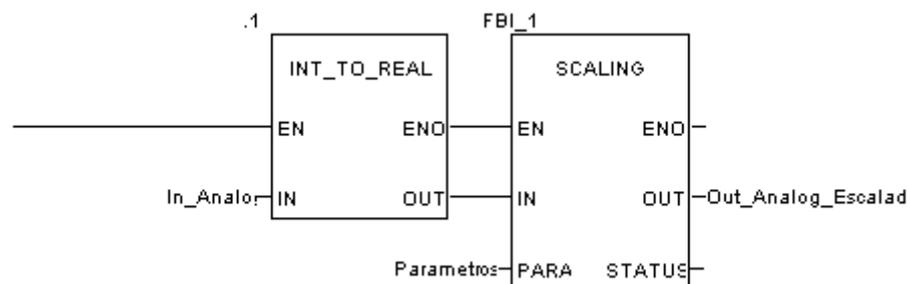


Figura 11.2.2.1 – Sección del bloque *Escala_Convers_Entrada_Analog*

11.2.3. VÁLVULA

11.2.3.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
VALVULA		<DFB>	
<entradas>			
SP	1	REAL	
ANTERIOR	2	REAL	
<salidas>			
OUT	1	INT	
ACTUAL	2	REAL	
ESTADO	3	EBOOL	
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
<secciones>			
VALVULA_sec		<ST>	

11.2.3.2. Sección

```

IF SP<>ANTERIOR THEN OUT:=REAL_TO_INT(SP*100.0);
  ESTADO:=1;
  IF SP<ANTERIOR THEN ACTUAL:=ANTERIOR-1.66;
    IF SP>ACTUAL THEN ACTUAL:=SP;
    ESTADO:=0;
  END_IF;
  ELSIF SP>ANTERIOR THEN ACTUAL:=ANTERIOR+1.66;
    IF SP<ACTUAL THEN ACTUAL:=SP;
    ESTADO:=0;
  END_IF;
END_IF;
END_IF;

```

11.2.4. PID SIMPLE

11.2.4.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
PID_SIMPLE		<DFB>	
<entradas>			
SP	1	REAL	
Y	2	REAL	
KP	3	REAL	
TI	4	REAL	
TD	5	REAL	
U_1	6	REAL	
<salidas>			
U	1	REAL	
ERROR	2	REAL	
e_1	3	REAL	
e_2	4	REAL	
<entradas/salidas>			
<publico>			
P_0		REAL	
P_1		REAL	
P_2		REAL	
<privado>			
aux_1		REAL	
ERROR_1		REAL	
ERROR_2		REAL	
<secciones>			
PID_SIMPLE_sec		<ST>	

11.2.4.2. Sección

```
ERROR_2:=ERROR_1;  
ERROR_1:=ERROR;  
ERROR:=SP-Y;
```

```
AUX_1:=KP*((ERROR-ERROR_1)+ERROR/TI+TD*(ERROR-2.0*ERROR_1+ERROR_2))+U_1;
```

```
IF AUX_1-U_1<-33.4 THEN AUX_1:=-33.4+U_1;  
ELSIF AUX_1-U_1>33.4 THEN AUX_1:=33.4+U_1;  
END_IF;
```

```
IF AUX_1<=0.0 THEN U:=0.0;  
ELSIF AUX_1>=100.0 THEN U:=100.0;  
ELSE U:=AUX_1;  
END_IF;
```

11.2.5. REGULADOR

11.2.5.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
REG		<DFB>	
<entradas>			
P	1	ARRAY[1..3] OF REAL	
-P[1]		REAL	
-P[2]		REAL	
-P[3]		REAL	
SP	2	REAL	
Y	3	REAL	
KM	4	REAL	
<salidas>			
U	1	REAL	
<entradas/salidas>			
<publico>			
U_1		REAL	
<privado>			
ERROR		REAL	
ERROR_1		REAL	
ERROR_2		REAL	
Y_1		REAL	
AUX_1		REAL	
<secciones>			
REG_sec		<ST>	

11.2.5.2. Sección

```
ERROR_2:=ERROR_1;  
ERROR_1:=ERROR;  
ERROR:=SP-Y;
```

```
AUX_1:=KM*(P[1]*ERROR+P[2]*ERROR_1+P[3]*ERROR_2)+U_1;
```

```
IF AUX_1-U_1<-33.4 THEN AUX_1:=-33.4+U_1;  
ELSIF AUX_1-U_1>33.4 THEN AUX_1:=33.4+U_1;  
END_IF;
```

```
IF AUX_1>=100.0 THEN  
    U:=99.9;  
ELSIF AUX_1<=0.0 THEN  
    U:=0.0;  
ELSE  
    U:=AUX_1;  
END_IF;
```

```
U_1:=U;
```

11.2.6. RLS 1 POLO

11.2.6.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
RLS_1_POLO		<DFB>	
<entradas>			
Y	1	REAL	
U	2	REAL	
P_INICIO	3	ARRAY[1..2,1..2] OF REAL	
-P_INICIO[1]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---P_INICIO[1][1]		REAL	
---P_INICIO[1][2]		REAL	
-P_INICIO[2]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---P_INICIO[2][1]		REAL	
---P_INICIO[2][2]		REAL	
G_INICIO	4	ARRAY[1..2] OF REAL	
-G_INICIO[1]		REAL	
-G_INICIO[2]		REAL	
F_OLVIDO	5	REAL	
<salidas>			
G	1	ARRAY[1..2] OF REAL	
-G[1]		REAL	
-G[2]		REAL	
<entradas/salidas>			
<publico>			
P		ARRAY[1..2,1..2] OF REAL	
-P[1]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---P[1][1]		REAL	
---P[1][2]		REAL	
-P[2]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---P[2][1]		REAL	
---P[2][2]		REAL	
M		ARRAY[1..2] OF REAL	
-M[1]		REAL	
-M[2]		REAL	

Nombre	N°	Tipo	Comentario
K		ARRAY[1..2] OF REAL	
-K[1]		REAL	
-K[2]		REAL	
<privado>			
AUX_A		ARRAY[1..2] OF REAL	
-AUX_A[1]		REAL	
-AUX_A[2]		REAL	
AUX_B		ARRAY[1..2] OF REAL	
-AUX_B[1]		REAL	
-AUX_B[2]		REAL	
AUX_C		ARRAY[1..2,1..2] OF REAL	
-AUX_C[1]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---AUX_C[1][1]		REAL	
---AUX_C[1][2]		REAL	
-AUX_C[2]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---AUX_C[2][1]		REAL	
---AUX_C[2][2]		REAL	
---AUX_D		REAL	
P_ANTES		ARRAY[1..2,1..2] OF REAL	
-P_ANTES[1]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---P_ANTES[1][1]		REAL	
---P_ANTES[1][2]		REAL	
-P_ANTES[2]		ARRAY[1..2] OF REAL	
---P_ANTES[2][1]		REAL	
---P_ANTES[2][2]		REAL	
G_ANTES		ARRAY[1..2] OF REAL	
-G_ANTES[1]		REAL	
-G_ANTES[2]		REAL	
U_ANTES		REAL	
Y_ANTES		REAL	
I		INT	
J		INT	
flag		BOOL	
AUX_E		REAL	
<secciones>			
RLS_1_POLO_sec		<ST>	

11.2.6.2. Sección

(*PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN RECURSIVO MEDIANTE MÍNIMOS CUADRADOS*)

(*

1°– Dar valores iniciales a P y G

2°– En cada instante k:

a) Leer los valores de y(k) y u(k).

b) Formar el vector regresor m(k).

c) Calcular P(k) mediante:

$$P(k) = \frac{1}{F_{\text{olvido}}} * (P(k-1) - \frac{P(k-1) * m^T(k) * m(k) * P(k-1)}{F_{\text{olvido}} + m(k) * P(k-1) * m^T(k)})$$

d) Calcular K(k) según la expresión:

$$K(k) = \frac{P(k-1) * m^T(k)}{F_{\text{olvido}} + m(k) * P(k-1) * m^T(k)}$$

e) Calcular G(k)

$$\hat{G}(k) = \hat{G}(k-1) + K(k) * [y(k) - m(k) * \hat{G}(k-1)]$$

*)

(* Valores iniciales de P y G *)

if flag=0 **then**

for i:=1 **to** 2 **do**

for j:=1 **to** 2 **do**

P[i, j]:=P.INICIO[i, j];

end_for;

G[i]:=g.INICIO[i];

end_for;

flag:=1;

U_ANTES:=0.0;

Y_ANTES:=0.0;

end_if;

(*En cada instante k:*)

(* a) Leer los valores de y(k) y u(k). *)

(*Se leen directamente cada vez que se ejecuta el bloque*)

(* b) Formar el vector regresor m(k) *)

```
M[2]:=U.ANTES;
M[1]:=-Y.ANTES;
```

```
(*
```

```
    c) Calcular P(k) mediante:
```

$$P(k) = \frac{1}{F_{\text{olvido}}} * (P(k-1) - \frac{P(k-1)*m^T(k)*m(k)*P(k-1)}{F_{\text{olvido}} + m(k)*P(k-1)*m^T(k)})$$

```
*)
```

```
(* Borrar elementos de cálculo *)
```

```
for i:=1 to 2 do
    AUX.A[i]:=0.0;
    AUX.B[i]:=0.0;
    for j:=1 to 3 do
        AUX.C[i,j]:=0.0;
    end_for;
    K[i]:=0.0;
end_for;
AUX.D:=0.0;
AUX.E:=0.0;

P.ANTES:=P;
for i:=1 to 2 do
    for j:=1 to 2 do
        AUX.A[i]:=P.ANTES[i,j]*M[j]+AUX.A[i];
        AUX.B[i]:=M[j]*P.ANTES[j,i]+AUX.B[i];
    end_for;
end_for;

for i:=1 to 2 do
    for j:=1 to 2 do
        AUX.C[i,j]:=AUX.A[i]*AUX.B[j]+AUX.C[i,j];
    end_for;
    AUX.D:=AUX.B[i]*M[i]+AUX.D;
end_for;

for i:=1 to 2 do
    for j:=1 to 4 do
        P[i,j]:=(P.ANTES[i,j]-AUX.C[i,j])/(F_OLVIDO+AUX.D)/F_OLVIDO;
    end_for;
end_for;
```

(*)

d) Calcular $K(k)$ según la expresión:

$$K(k) = \frac{P(k-1) * m^T(k)}{F_{\text{olvido}} + m(k) * P(k-1) * m^T(k)}$$

*)

for i:=1 to 2 **do** $K[i] := \text{AUX_A}[i] / (F_{\text{OLVIDO}} + \text{AUX_D});$ **end_for**;

(*)

e) Calcular $G(k)$

$$\hat{G}(k) = \hat{G}(k-1) + K(k) * [y(k) - m(k) * \hat{G}(k-1)]$$

*)

G_ANTES:=G;

for i:=1 to 2 **do** $\text{AUX_E} := M[i] * G_{\text{ANTES}}[i] + \text{AUX_E};$ **end_for**;**for** i:=1 to 2 **do** $G[i] := G_{\text{ANTES}}[i] + K[i] * (Y - \text{AUX_E});$ **end_for**;

(*Se guardan los valores anteriores U e Y*)

U_ANTES:=U;

Y_ANTES:=Y;

11.2.7. RLS 2 POLOS

11.2.7.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
RLS_2_POLOS		<DFB>	
<entradas>			
Y	1	REAL	
U	2	REAL	
P_INICIO	3	ARRAY[1..3,1..3] OF REAL	
-P_INICIO[1]		ARRAY[1..3] OF REAL	
---P_INICIO[1][1]		REAL	
---P_INICIO[1][2]		REAL	
---P_INICIO[1][3]		REAL	
-P_INICIO[2]		ARRAY[1..3] OF REAL	
---P_INICIO[2][1]		REAL	
---P_INICIO[2][2]		REAL	
---P_INICIO[2][3]		REAL	
-P_INICIO[3]		ARRAY[1..3] OF REAL	
---P_INICIO[3][1]		REAL	
---P_INICIO[3][2]		REAL	
---P_INICIO[3][3]		REAL	
G_INICIO	4	ARRAY[1..3] OF REAL	
-G_INICIO[1]		REAL	
-G_INICIO[2]		REAL	
-G_INICIO[3]		REAL	
F_OLVIDO	5	REAL	
<salidas>			
G	1	ARRAY[1..2] OF REAL	
-G[1]		REAL	
-G[2]		REAL	
-G[3]		REAL	
<entradas/salidas>			

Nombre	N°	Tipo	Comentario
<publico>			
P		ARRAY[1..3,1..3] OF REAL	
-P[1]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—P[1][1]		REAL	
—P[1][2]		REAL	
—P[1][3]		REAL	
-P[2]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—P[2][1]		REAL	
—P[2][2]		REAL	
—P[2][3]		REAL	
-P[3]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—P[3][1]		REAL	
—P[3][2]		REAL	
—P[3][3]		REAL	
M		ARRAY[1..3] OF REAL	
-M[1]		REAL	
-M[2]		REAL	
-M[3]		REAL	
K		ARRAY[1..3] OF REAL	
-K[1]		REAL	
-K[2]		REAL	
-K[3]		REAL	
<privado>			
AUX_A		ARRAY[1..3] OF REAL	
-AUX_A[1]		REAL	
-AUX_A[2]		REAL	
-AUX_A[3]		REAL	
AUX_B		ARRAY[1..3] OF REAL	
-AUX_B[1]		REAL	
-AUX_B[2]		REAL	
-AUX_B[3]		REAL	

Nombre	N°	Tipo	Comentario
AUX_C		ARRAY[1..3,1..3] OF REAL	
-AUX_C[1]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—AUX_C[1][1]		REAL	
—AUX_C[1][2]		REAL	
—AUX_C[1][3]		REAL	
-AUX_C[2]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—AUX_C[2][1]		REAL	
—AUX_C[2][2]		REAL	
—AUX_C[2][3]		REAL	
-AUX_C[3]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—AUX_C[3][1]		REAL	
—AUX_C[3][2]		REAL	
—AUX_C[3][3]		REAL	
—AUX_D		REAL	
P_ANTES		ARRAY[1..3,1..3] OF REAL	
-P_ANTES[1]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—P_ANTES[1][1]		REAL	
—P_ANTES[1][2]		REAL	
—P_ANTES[1][3]		REAL	
-P_ANTES[2]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—P_ANTES[2][1]		REAL	
—P_ANTES[2][2]		REAL	
—P_ANTES[2][3]		REAL	
-P_ANTES[3]		ARRAY[1..3] OF REAL	
—P_ANTES[3][1]		REAL	
—P_ANTES[3][2]		REAL	
—P_ANTES[3][3]		REAL	
G_ANTES		ARRAY[1..3] OF REAL	
-G_ANTES[1]		REAL	
-G_ANTES[2]		REAL	
-G_ANTES[3]		REAL	
U_ANTES		REAL	
Y_ANTES		REAL	

Nombre	N°	Tipo	Comentario
I		INT	
J		INT	
flag		BOOL	
AUX_E		REAL	
<secciones>			
RLS_2_POLOS_sec		<ST>	

11.2.7.2. Sección

(*PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN RECURSIVO MEDIANTE MÍNIMOS CUADRADOS*)

(*

1º– Dar valores iniciales a P y G

2º– En cada instante k:

a) Leer los valores de y(k) y u(k).

b) Formar el vector regresor m(k).

c) Calcular P(k) mediante:

$$P(k) = \frac{1}{F_{\text{olvido}}} * (P(k-1) - \frac{P(k-1)*m^T(k)*m(k)*P(k-1)}{F_{\text{olvido}} + m(k)*P(k-1)*m^T(k)})$$

d) Calcular K(k) según la expresión:

$$K(k) = \frac{P(k-1)*m^T(k)}{F_{\text{olvido}} + m(k)*P(k-1)*m^T(k)}$$

e) Calcular G(k)

$$G^{\wedge}(k) = G^{\wedge}(k-1) + K(k) * [y(k) - m(k) * G^{\wedge}(k-1)]$$

*)

(* Valores iniciales de P y G *)

if flag=0 then

for i:=1 to 3 **do**

for j:=1 to 3 **do**

P[i , j]:= P_INICIO[i , j];

end_for;

G[i]:= g_INICIO[i];

end_for;

flag :=1;

U_ANTES:=0.0;

Y_ANTES:=0.0;

end_if;

(*En cada instante k:*)

(* a) Leer los valores de y(k) y u(k). *)

(*Se leen directamente cada vez que se ejecuta el bloque*)

(* b) Formar el vector regresor m(k) *)

```
M[3]:=U_ANTES;
M[2]:=M[1];
M[1]:=-Y_ANTES;
```

```
(*
```

```
    c) Calcular P(k) mediante:
```

$$P(k) = \frac{1}{F_{\text{olvido}}} * (P(k-1) - \frac{P(k-1)*m^T(k)*m(k)*P(k-1)}{F_{\text{olvido}} + m(k)*P(k-1)*m^T(k)})$$

```
*)
```

```
(*Borrar elementos de cálculo*)
```

```
for i:=1 to 3 do
    AUX.A[i]:=0.0;
    AUX.B[i]:=0.0;
    for j:=1 to 3 do
        AUX.C[i,j]:=0.0;
    end_for;
    K[i]:=0.0;
end_for;
AUX.D:=0.0;
AUX.E:=0.0;
```

```
P_ANTES:=P;
for i:=1 to 3 do
    for j:=1 to 3 do
        AUX.A[i]:=P_ANTES[i,j]*M[j]+AUX.A[i];
        AUX.B[i]:=M[j]*P_ANTES[j,i]+AUX.B[i];
    end_for;
end_for;
```

```
for i:=1 to 3 do
    for j:=1 to 3 do
        AUX.C[i,j]:=AUX.A[i]*AUX.B[j]+AUX.C[i,j];
    end_for;
    AUX.D:=AUX.B[i]*M[i]+AUX.D;
end_for;
```

```
for i:=1 to 3 do
    for j:=1 to 3 do
        P[i,j]:=(P_ANTES[i,j]-AUX.C[i,j]/(F_OLVIDO+AUX.D))/F_OLVIDO;
    end_for;
end_for;
```

(*

d) Calcular $K(k)$ según la expresión:

$$K(k) = \frac{P(k-1) \cdot m^T(k)}{F_{\text{olvido}} + m(k) \cdot P(k-1) \cdot m^T(k)}$$

*)

for i:=1 to 3 **do**

$K[i] := \text{AUX_A}[i] / (F_{\text{OLVIDO}} + \text{AUX_D});$

end_for;

(*

e) Calcular $G(k)$

$$\hat{G}(k) = \hat{G}(k-1) + K(k) \cdot [y(k) - m(k) \cdot \hat{G}(k-1)]$$

*)

G.ANTES:=G;

for i:=1 to 3 **do**

$\text{AUX_E} := M[i] \cdot \text{G_ANTES}[i] + \text{AUX_E};$

end_for;

for i:=1 to 3 **do**

$G[i] := \text{G_ANTES}[i] + K[i] \cdot (Y - \text{AUX_E});$

end_for;

(*Se guardan los valores anteriores U e Y*)

U.ANTES:=U;

Y.ANTES:=Y;

11.2.8. AUTO 1 POLO

11.2.8.1. Variables

Nombre	N°	Tipo	Comentario
PID_AUTO_1_P		<DFB>	
<entradas>			
G	1	ARRAY[1..2] OF REAL	
-G[1]		REAL	
-G[2]		REAL	
KM	2	REAL	
POLO	3	REAL	
<salidas>			
KP	1	REAL	
TI	1	REAL	
TD	1	REAL	
P	1	ARRAY[1..3] OF REAL	
-P[1]		REAL	
-P[2]		REAL	
-P[3]		REAL	
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
P_0		REAL	
P_1		REAL	
P_2		REAL	
<secciones>			
PID_AUTO_1_P_sec		<ST>	

11.2.8.2. Sección

(* PID AUTOAJUSTABLE BASADO EN ASIGNACIÓN DE POLOS *)

$P_0 := (1.0 - G[1] - (3.0 / \text{Polo})) / G[2];$
 $P_1 := (G[1] + 3.0 / (\text{Polo} * \text{Polo})) / G[2];$
 $P_2 := - + 1.0 / (\text{Polo} * \text{Polo} * \text{Polo}) / G[2];$

(* PARÁMETROS PID *)

$KP := -KM * (P_1 + 2.0 * P_2);$

(* $K_I := KM * (P_0 + P_1 + P_2);$ *)
 $TI := 200.0 / (P_0 + P_1 + P_2);$

(* $K_D := KM * P_2;$ *)
 $TD := -P_2;$

$p[1] := p_0;$
 $P[2] := P_1;$
 $P[3] := P_2;$

11.2.9. AUTO 2 POLOS

11.2.9.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
PID_AUTO_2_P		<DFB>	
<entradas>			
G	1	ARRAY[1..3] OF REAL	
-G[1]		REAL	
-G[2]		REAL	
-G[3]		REAL	
KM	2	REAL	
POLO	3	REAL	
<salidas>			
KP	1	REAL	
TI	1	REAL	
TD	1	REAL	
P	1	ARRAY[1..3] OF REAL	
-P[1]		REAL	
-P[2]		REAL	
-P[3]		REAL	
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
P_0		REAL	
P_1		REAL	
P_2		REAL	
<secciones>			
PID_AUTO_2_P_sec		<ST>	

11.2.9.2. Sección

(* PID AUTOAJUSTABLE BASADO EN ASIGNACIÓN DE POLOS *)

$P_0 := (1.0 - G[1] - (3.0 / \text{Polo})) / G[3];$
 $P_1 := (-G[2] + G[1] + 3.0 / (\text{Polo} * \text{Polo})) / G[3];$
 $P_2 := -(-G[2] + 1.0 / (\text{Polo} * \text{Polo} * \text{Polo})) / G[3];$

(* PARÁMETROS PID *)

$KP := -KM * (P_1 + 2.0 * P_2);$

(* $K_I := KM * (P_0 + P_1 + P_2);$ *)

$TI := 200.0 / (P_0 + P_1 + P_2);$

(* $K_D := KM * P_2;$ *)

$TD := -P_2 * 0.1;$

$p[1] := p_0;$

$P[2] := P_1;$

$P[3] := P_2;$

11.3. Secciones

11.3.1. SEGURIDAD

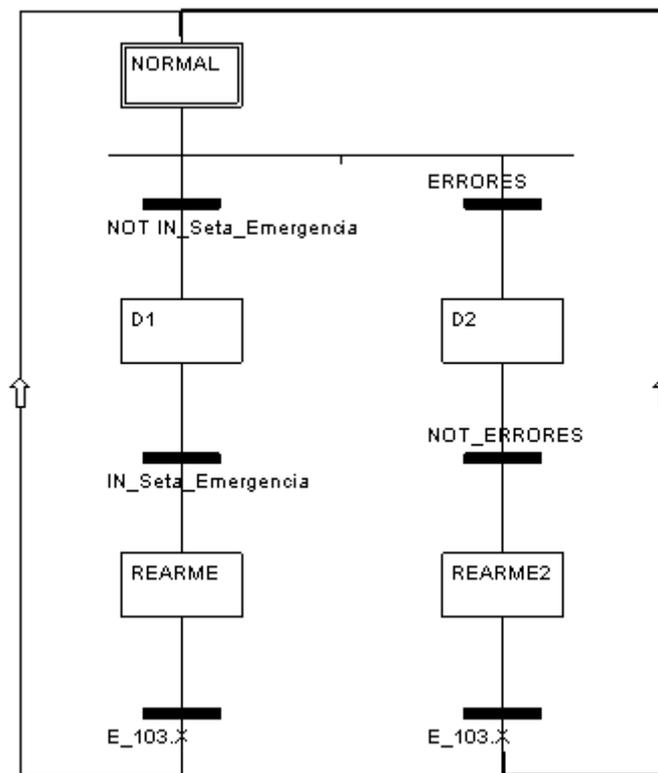


Figura 11.3.1.1 – Sección de *SEGURIDAD*

11.3.1.1. Transiciones

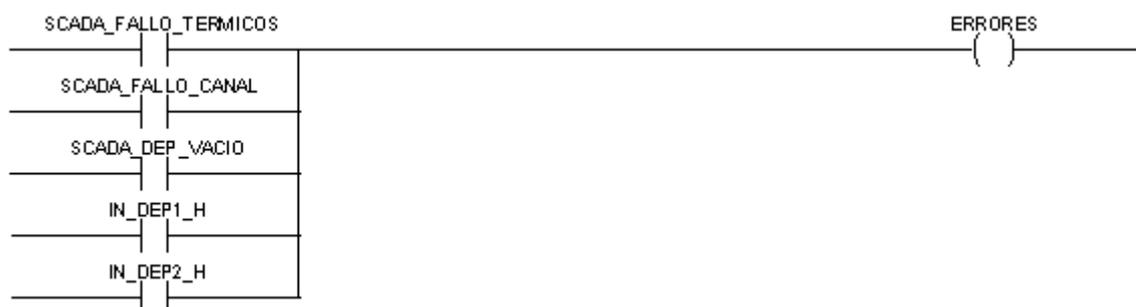


Figura 11.3.1.2 – Transición *ERRORES* de la sección *SEGURIDAD*



Figura 11.3.1.3 – Transición *NOT ERRORES* de la sección *SEGURIDAD*



Figura 11.3.2.5 – Transición *NOT ON OFF OR NOT AUTO MAN* de la sección *MANDO*



Figura 11.3.2.6 – Transición *FIN CAMBIO OR NOT ON* de la sección *MANDO*

11.3.3. FUNCIONAMIENTO

A continuación figura el código de la sección de *FUNCIONAMIENTO*.

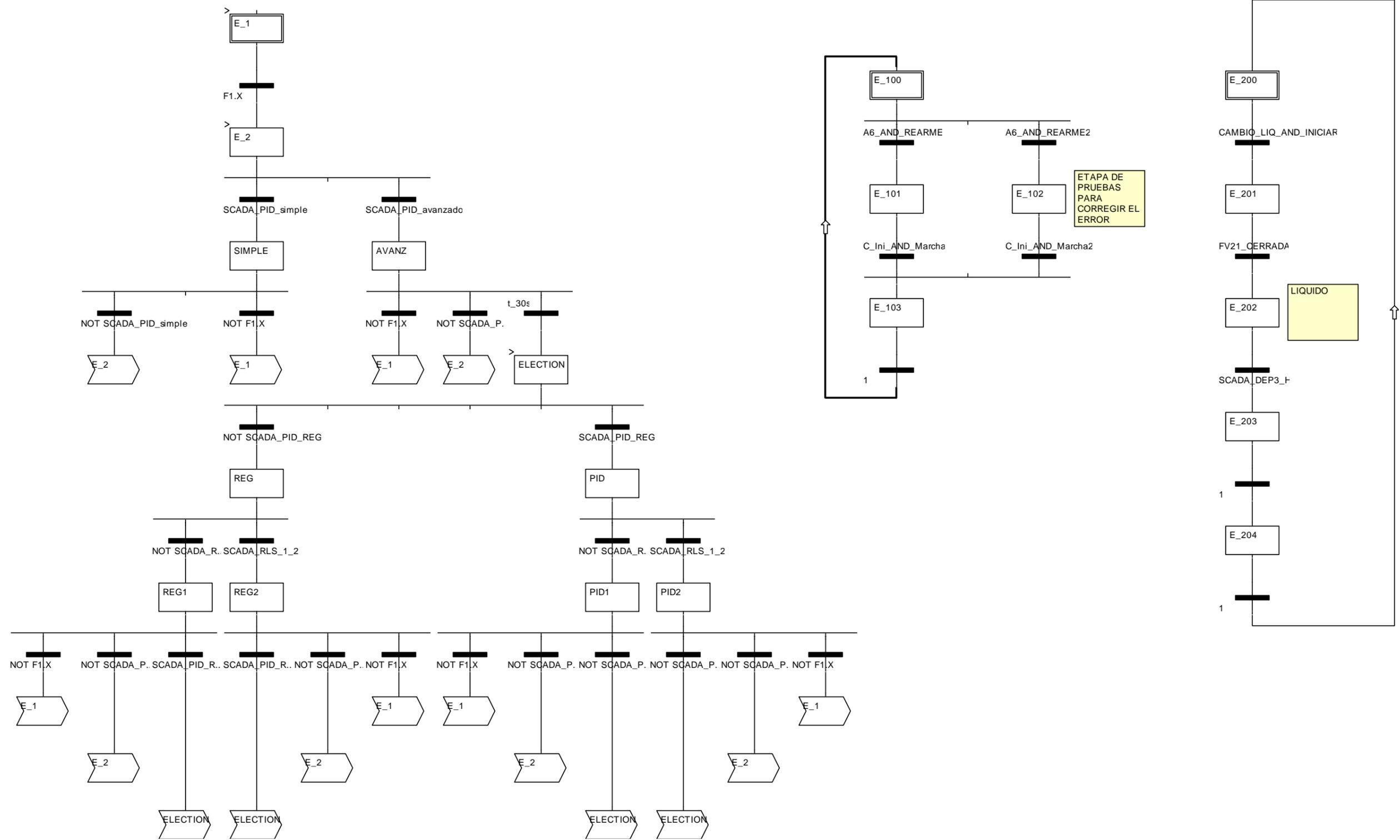


Figura 11.3.3.1 – Sección de *FUNCIONAMIENTO*

11.3.3.1. Transiciones

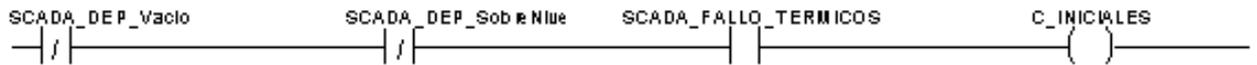


Figura 11.3.3.2 – Transición *C INICIALES* de la sección *FUNCIONAMIENTO*



Figura 11.3.3.3 – Transición *T 30s* de la sección *FUNCIONAMIENTO*



Figura 11.3.3.4 – Transición *CAMBIO LIQ AND INICIAR* de la sección *FUNCIONAMIENTO*

*En la transición *C_ini_and_marcha* de la sección *FUNCIONAMIENTO*, aunque no se aprecia bien en la figura 11.3.3.5, las variables que intervienen son, de izquierda a derecha: *SCADA_DEP_VACIO* (NC), *SCADA_DEP_SOBRENIVEL*(NC), *SCADA_FALLO_TERMICOS*(NC), *SCADA_FALLO_CANAL*(NC), *IN_PRESOSTATO*(NA) y *MARCHA*(NA).

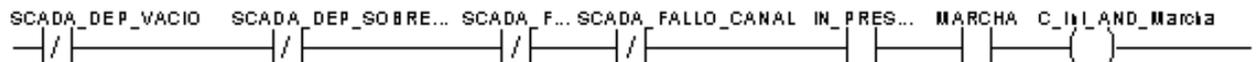


Figura 11.3.3.5 – Transición *C INI AND MARCHA* de la sección *FUNCIONAMIENTO*

*En la transición *C_ini_and_marcha2* de la sección *FUNCIONAMIENTO*, aunque no se aprecia bien en la figura 11.3.3.6, las variables que intervienen son, de izquierda a derecha: *SCADA_DEP_VACIO* (NC), *SCADA_DEP_SOBRENIVEL*(NC), *SCADA_FALLO_TERMICOS*(NC), *SCADA_FALLO_CANAL*(NC), *IN_PRESOSTATO*(NA) y *MARCHA* (NA).

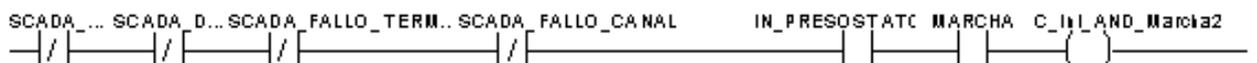


Figura 11.3.3.6 – Transición *C INI AND MARCHA2* de la sección *FUNCIONAMIENTO*



Figura 11.3.3.7 – Transición *A6 AND REARME* de la sección *FUNCIONAMIENTO*



Figura 11.3.3.8 – Transición *A6 AND REARME2* de la sección *FUNCIONAMIENTO*

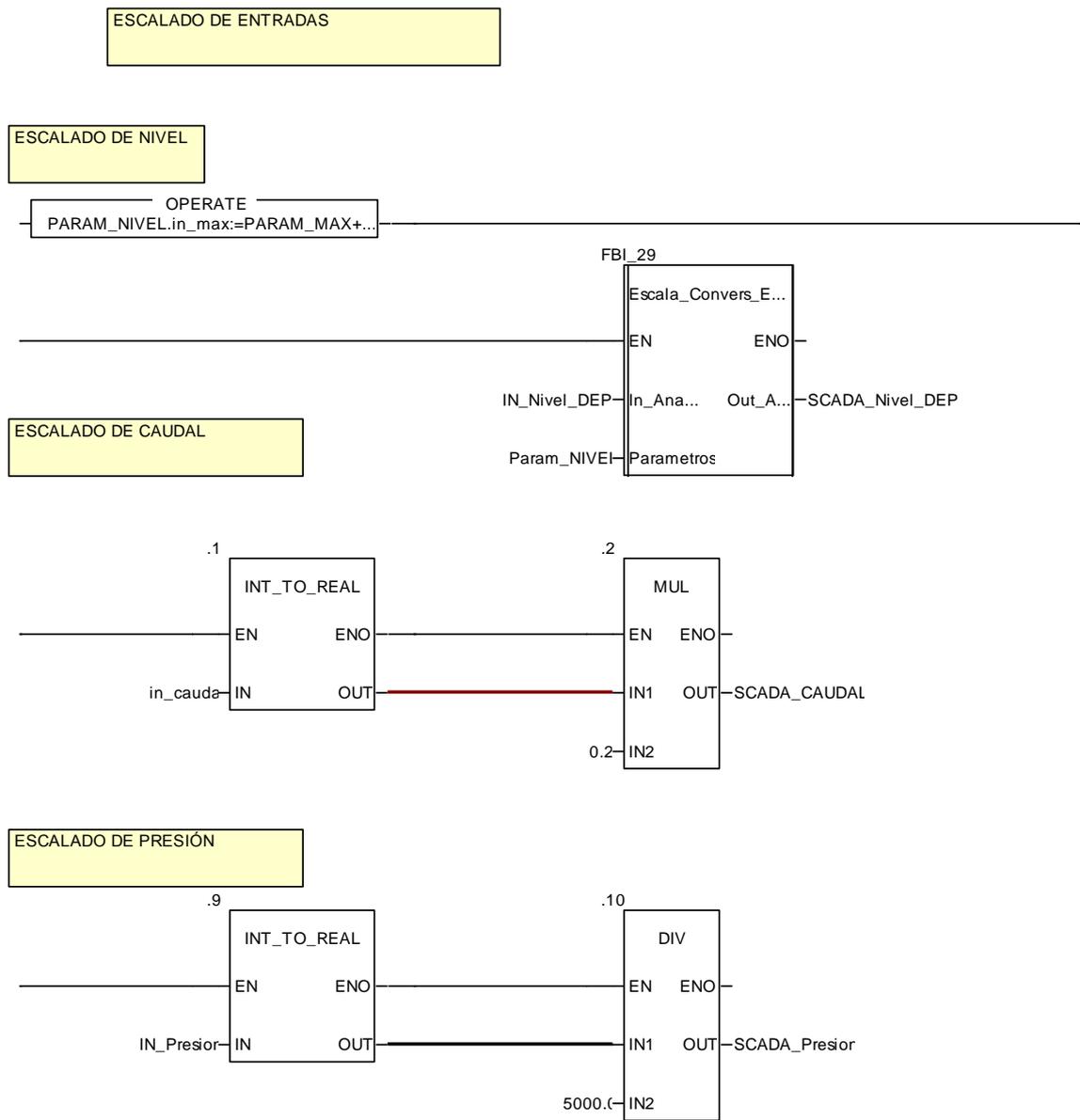
*En la transición *FV11_CERRADA* de la sección *FUNCIONAMIENTO*, aunque no se aprecia bien en la figura 11.3.3.9, el bloque de comparación contiene el siguiente código:

ACTUAL_FV21=100.0



Figura 11.3.3.9 – Transición *FV21 CERRADA* de la sección *FUNCIONAMIENTO*

11.3.4. ENTRADAS ANALOG



ESCALADO DE TEMPERATURAS

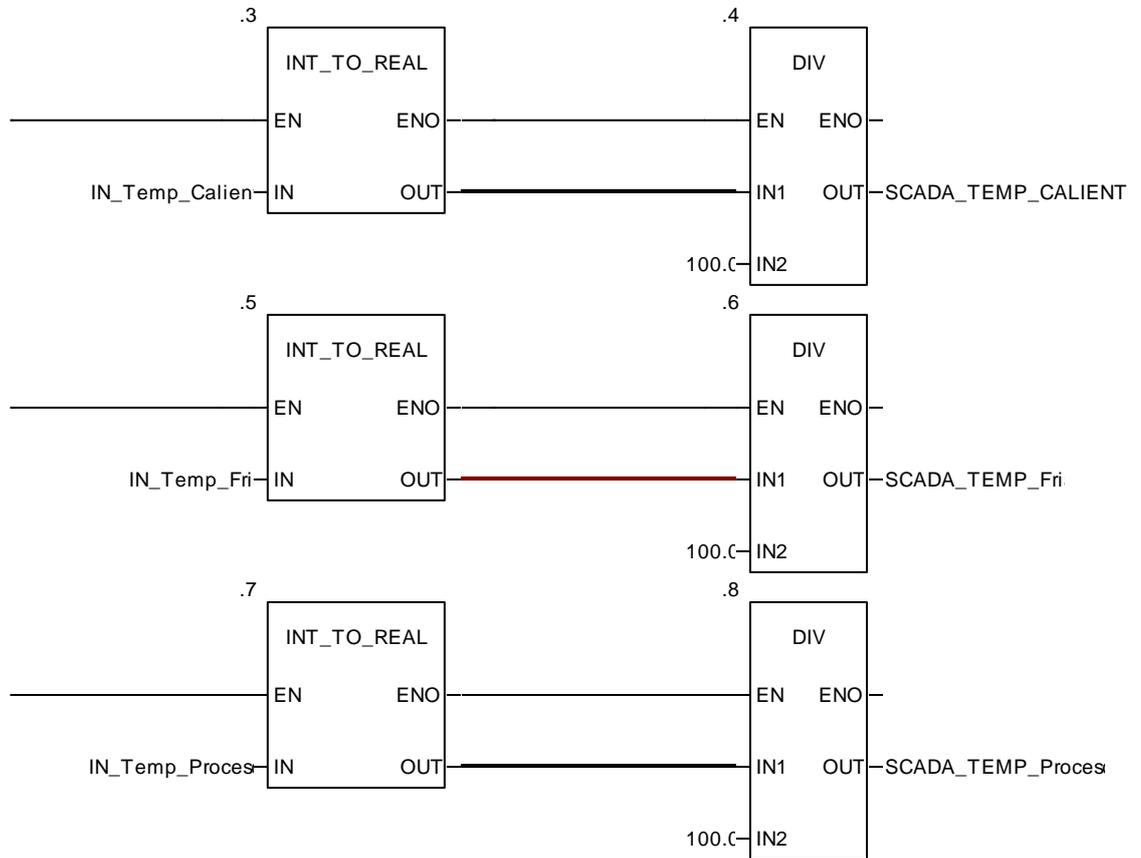
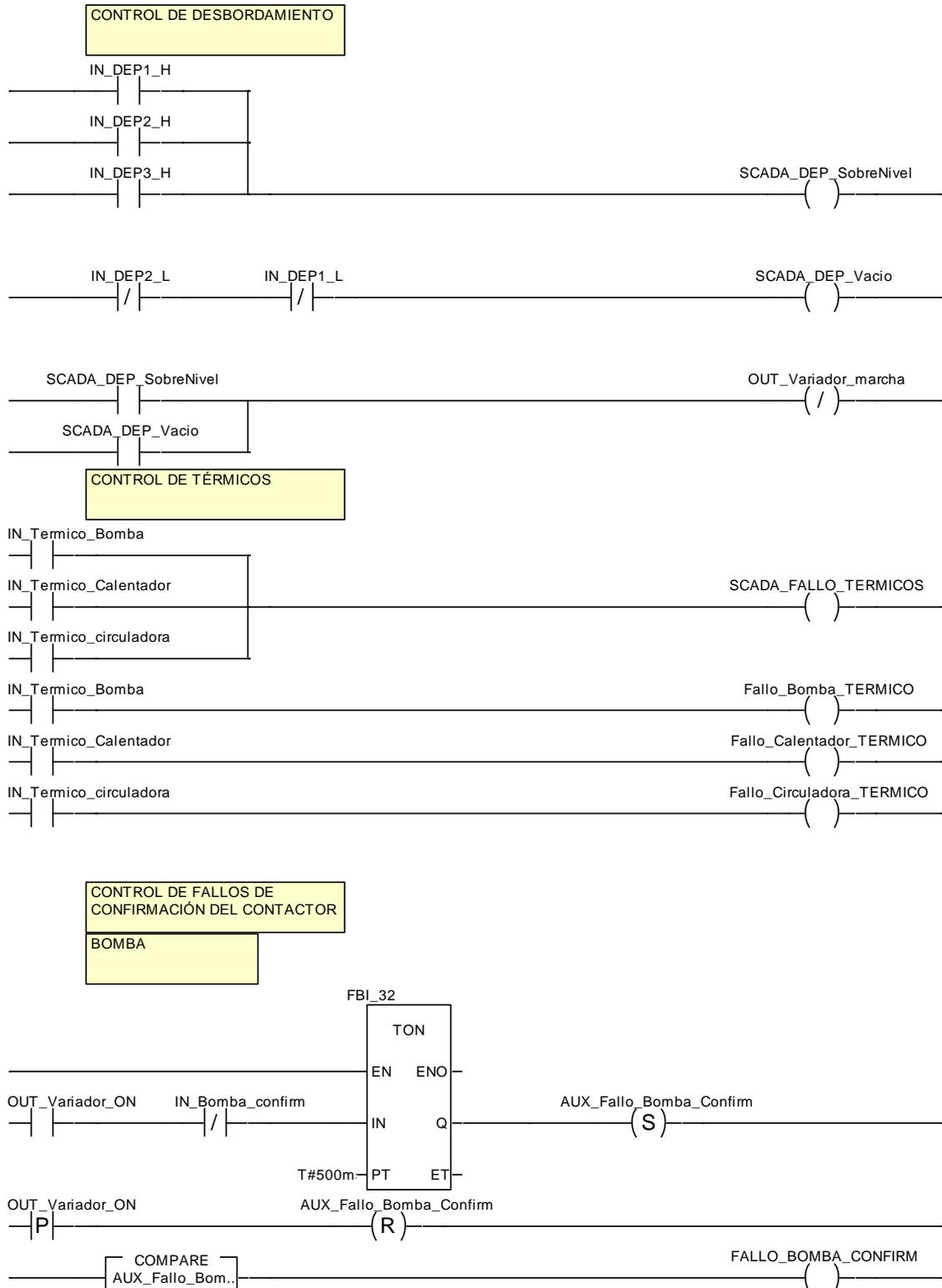


Figura 11.3.4.1 – Sección *ENTRADAS_ANALOG*

11.3.5. CONTROLES



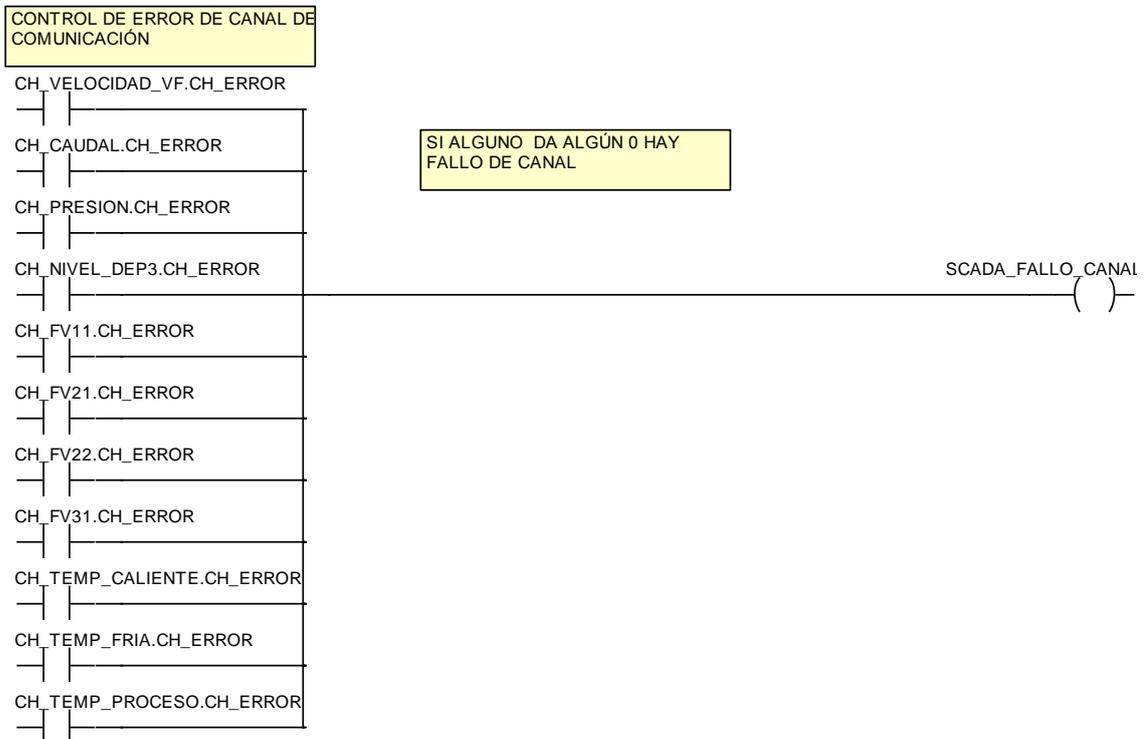
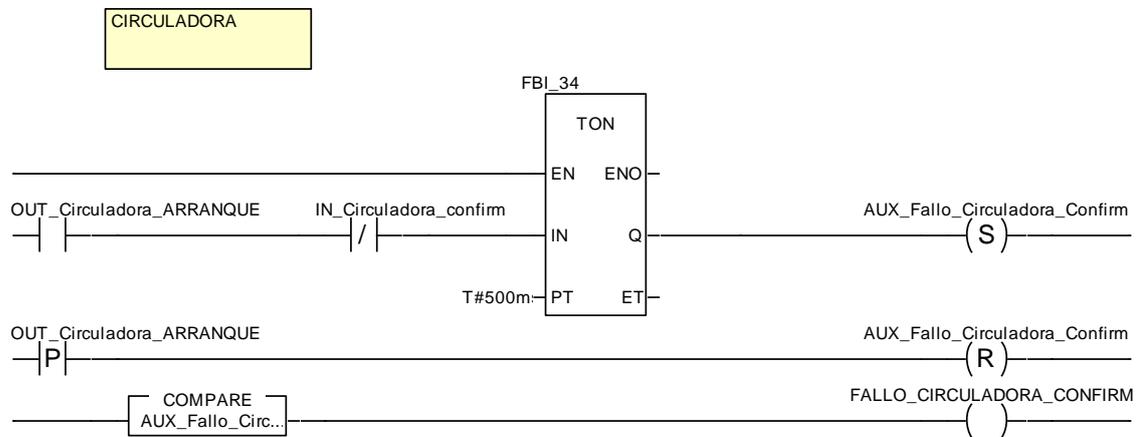
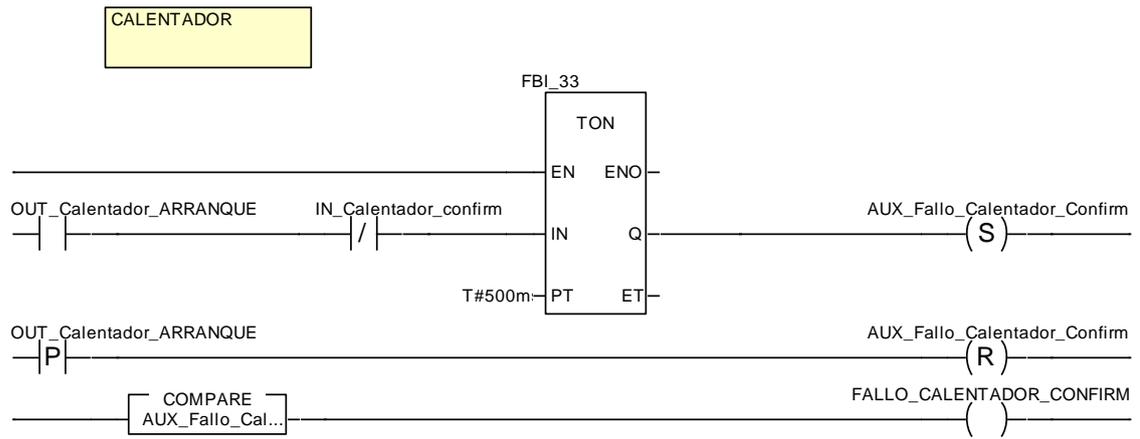
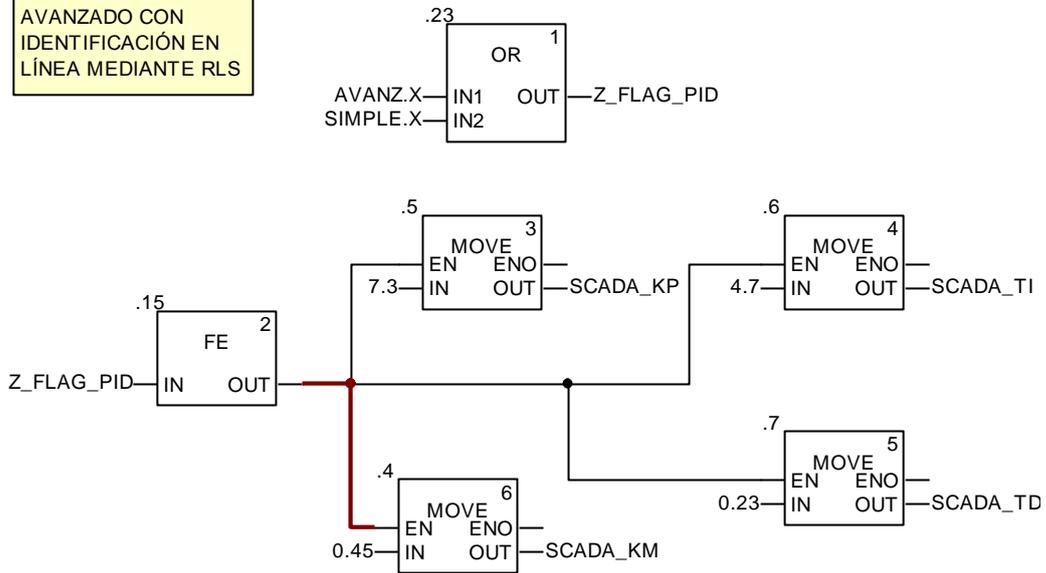


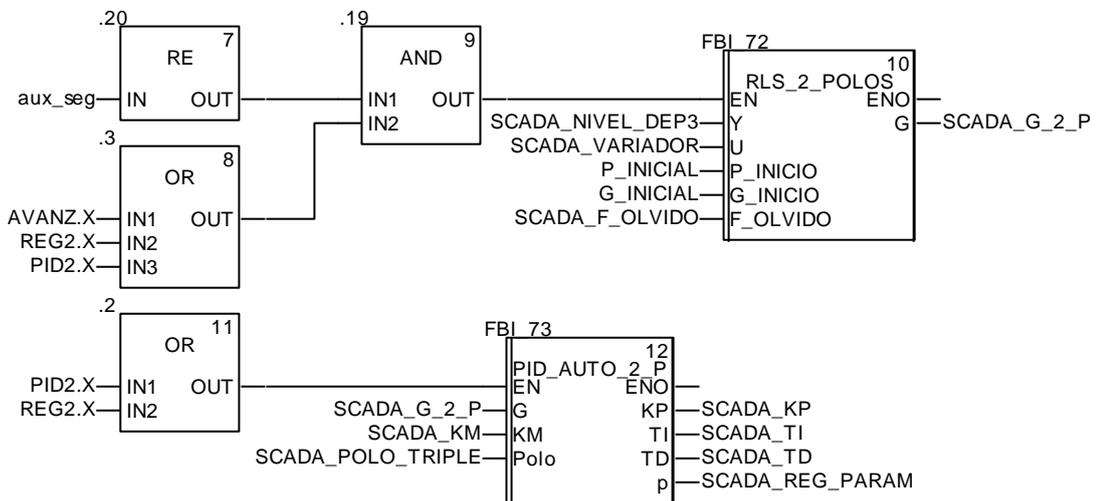
Figura 11.3.5.1 – Sección CONTROLES

11.3.6. PID

PID SIMPLE Y PID AVANZADO CON IDENTIFICACIÓN EN LÍNEA MEDIANTE RLS



IDENTIFICACIÓN RLS DE UNA FUNCIÓN CON 2 POLOS



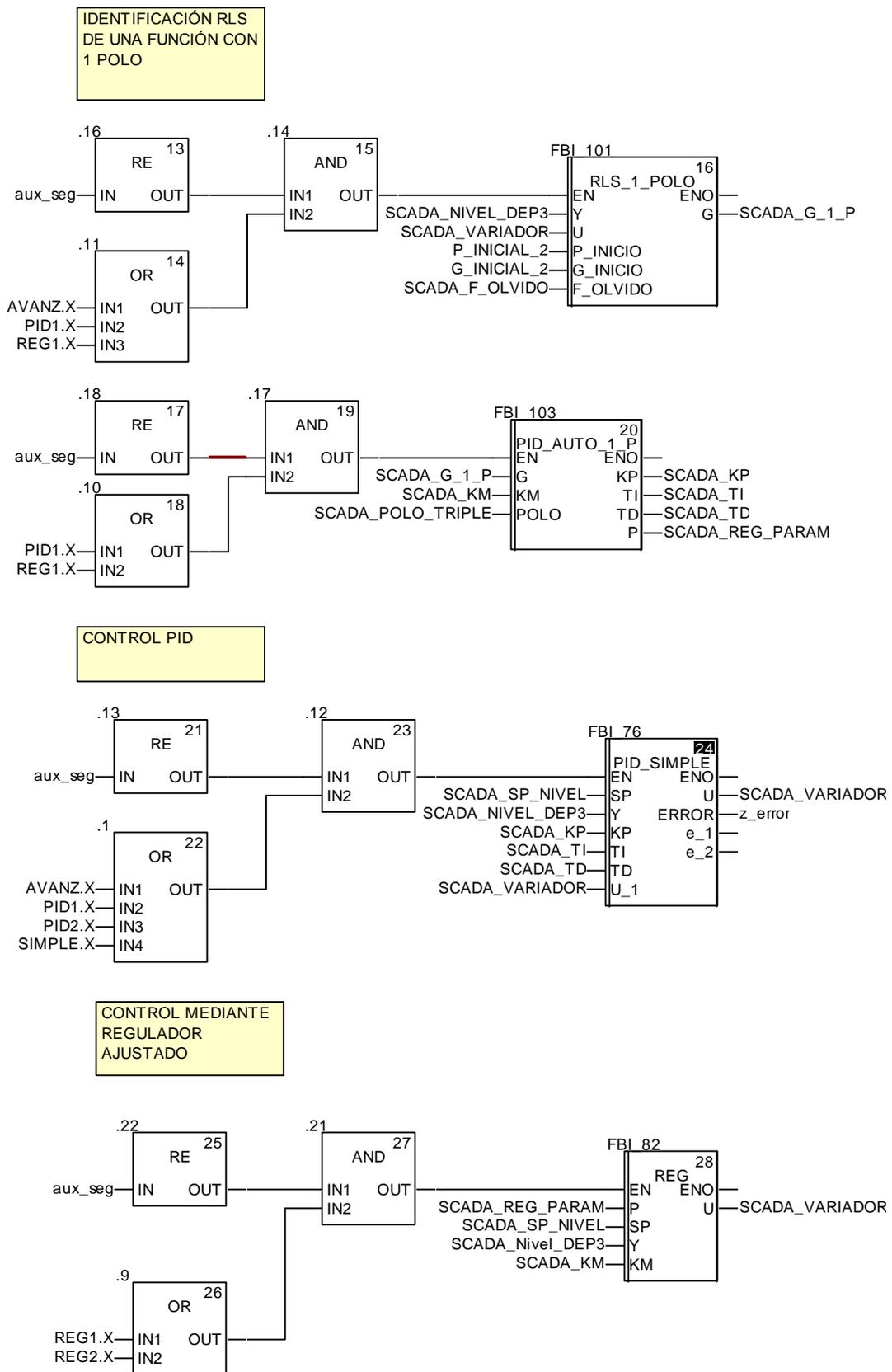
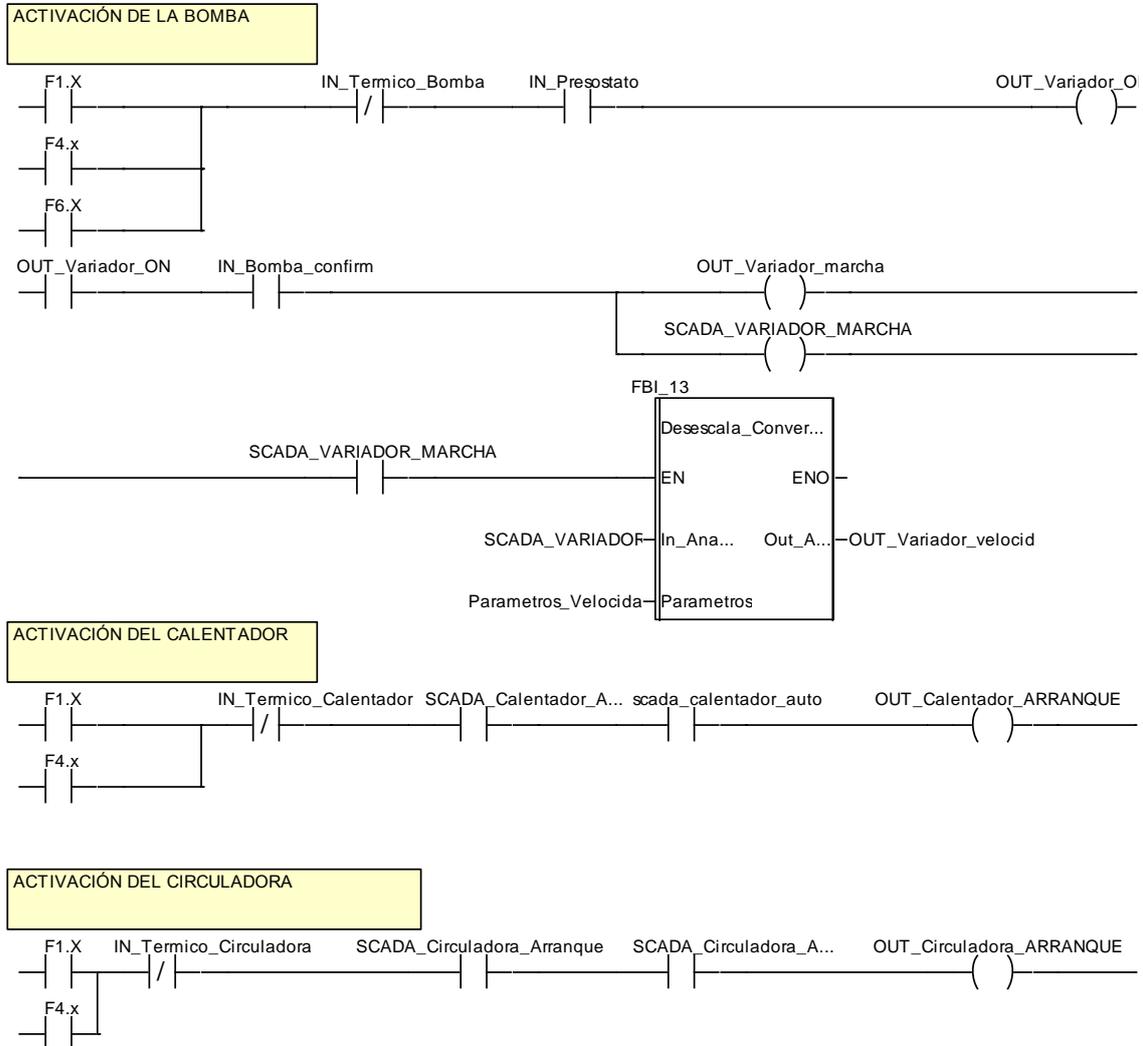
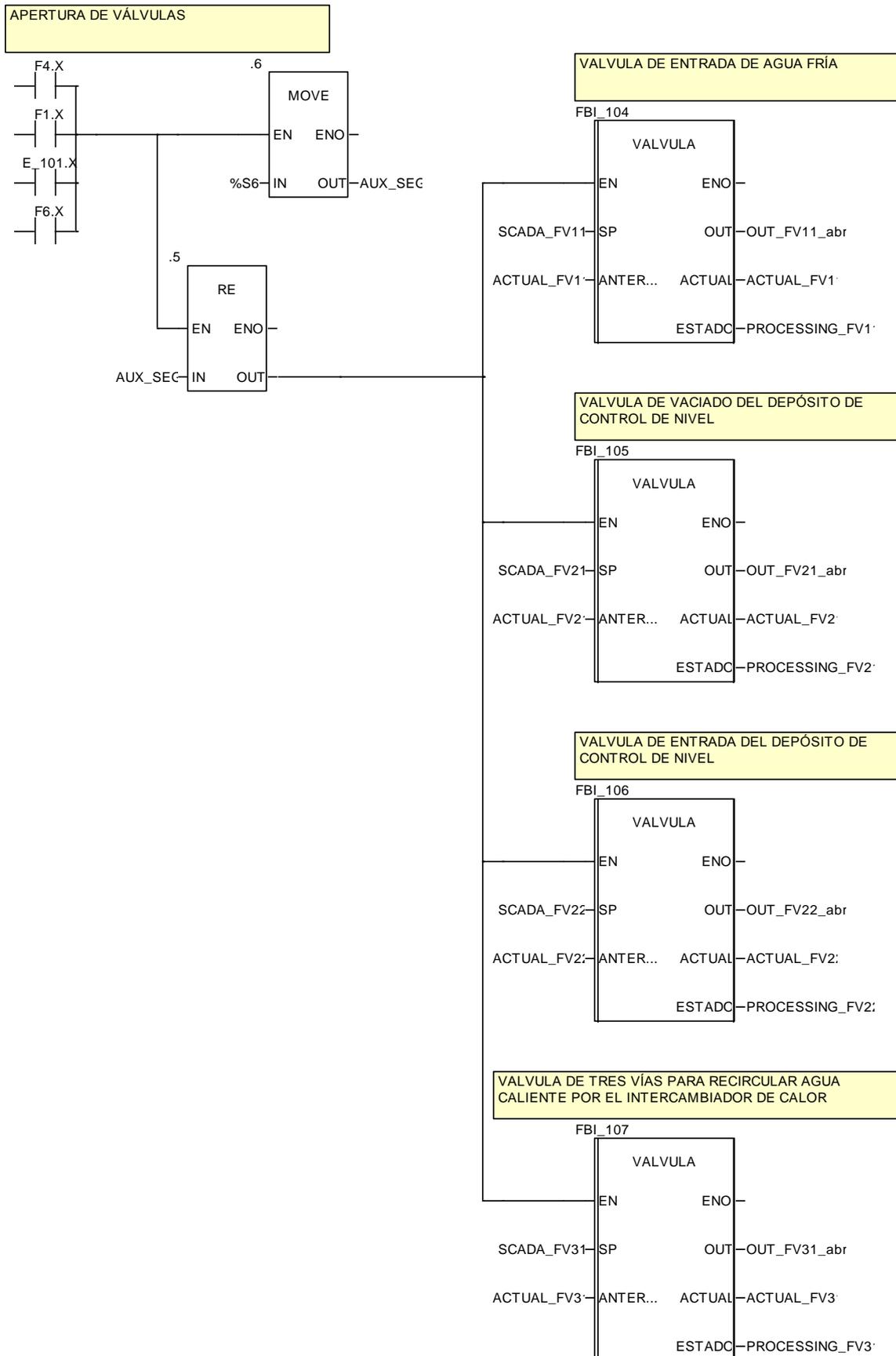


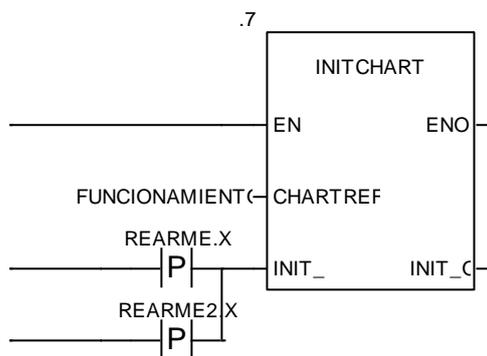
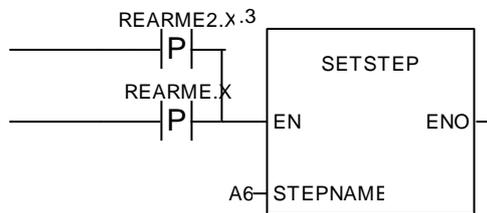
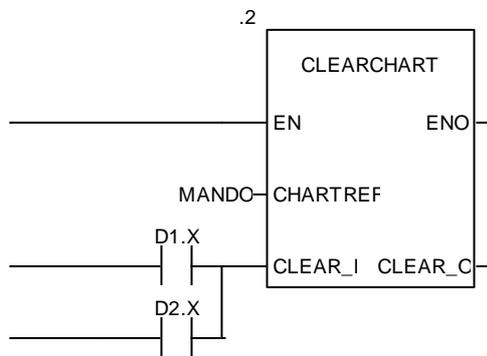
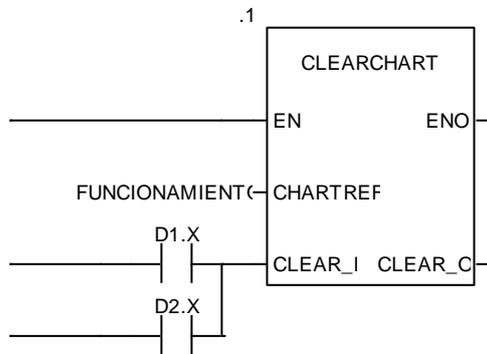
Figura 11.3.6.1 – Sección PIDs

11.3.7. ACCIONES





GESTIÓN SEGURIDAD



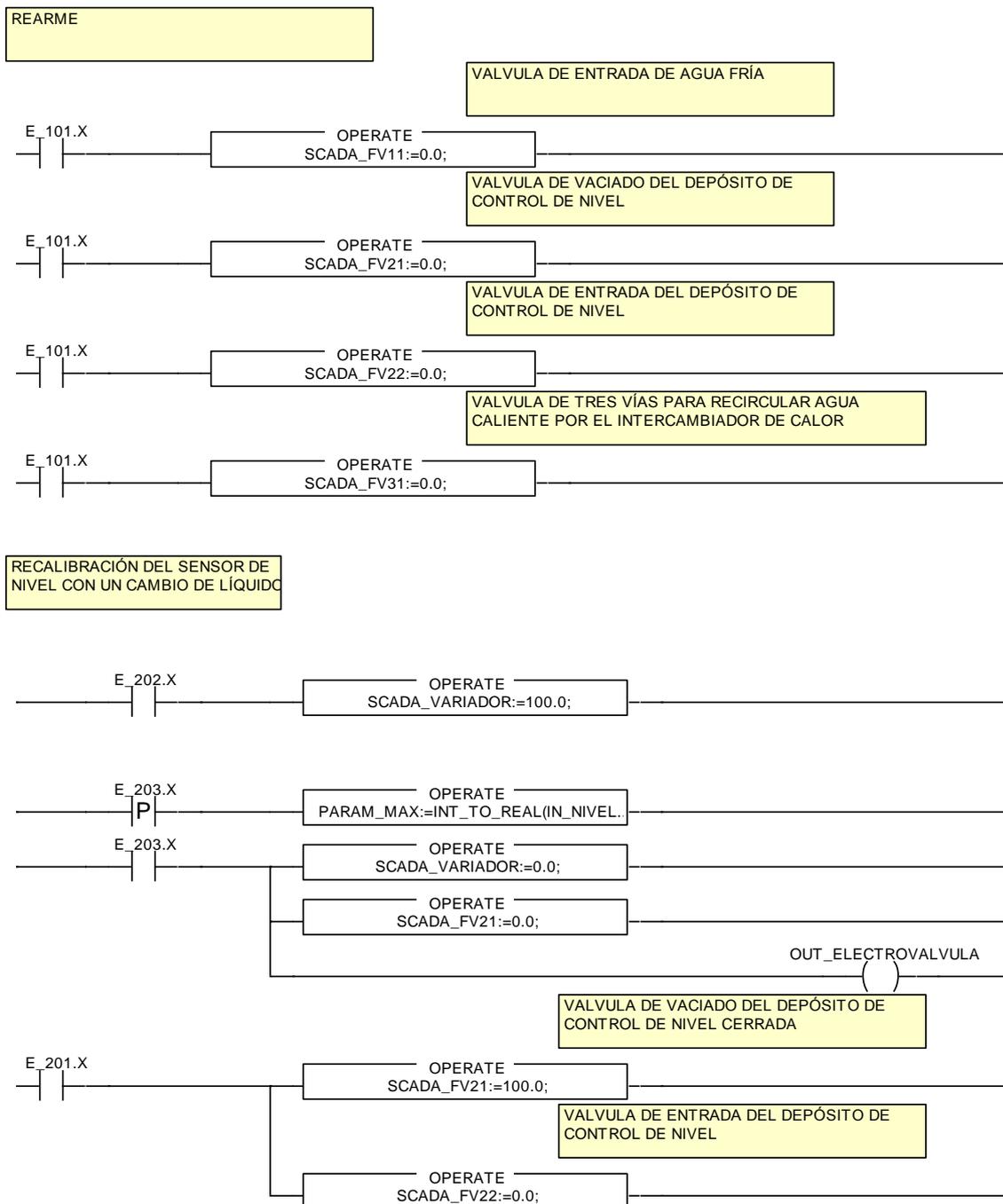
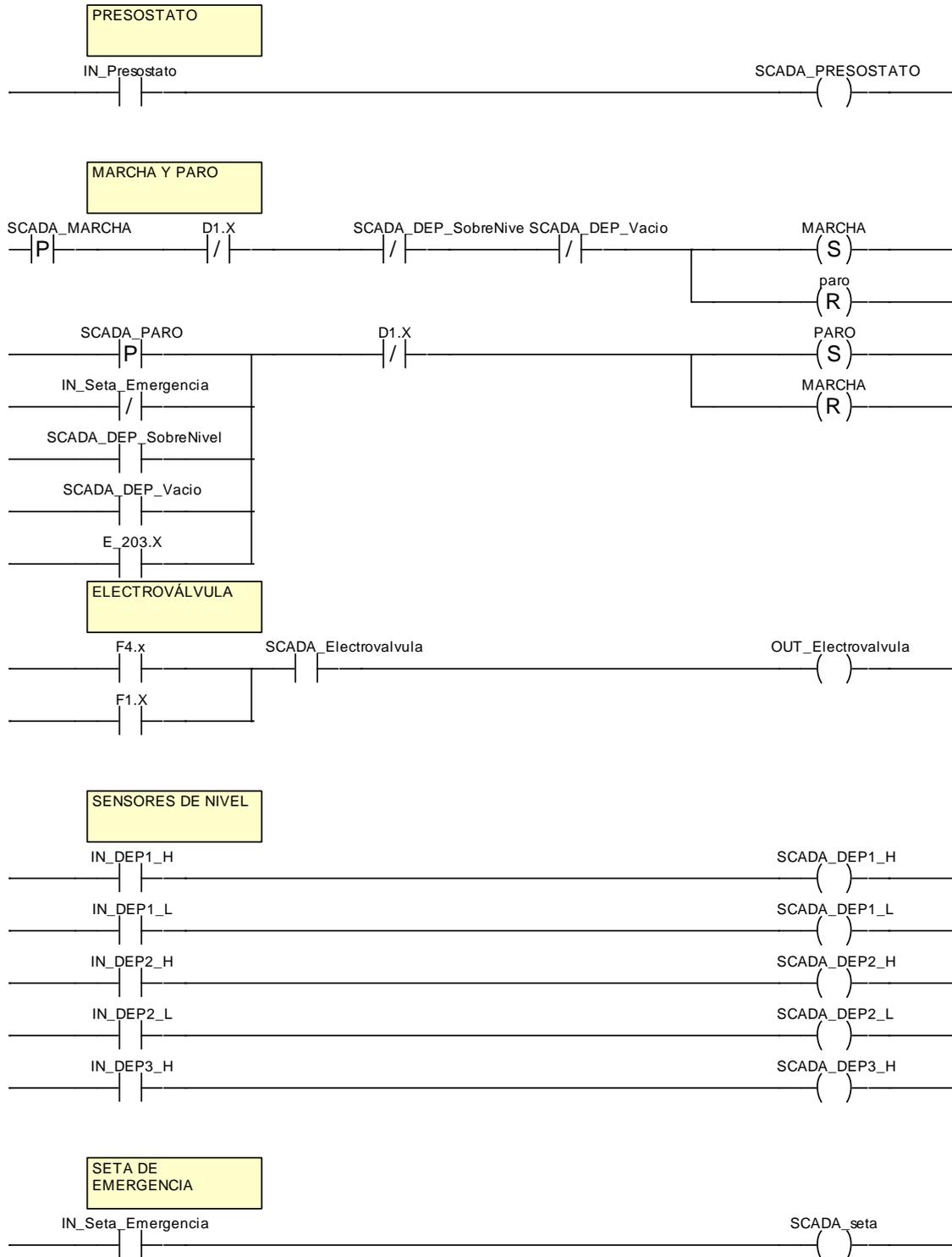


Figura 11.3.7.1 – Sección ACCIONES

*El bloque *OPERATE* del apartado de recalibración del sensor de nivel tiene la siguiente expresión en estructurado:

$PARAM_MAX := INT_TO_REAL(IN_NIVEL_DEP3) - (SCADA_TEMP_Proceso - 4,0) * 15,76;$

11.3.8. SCADA



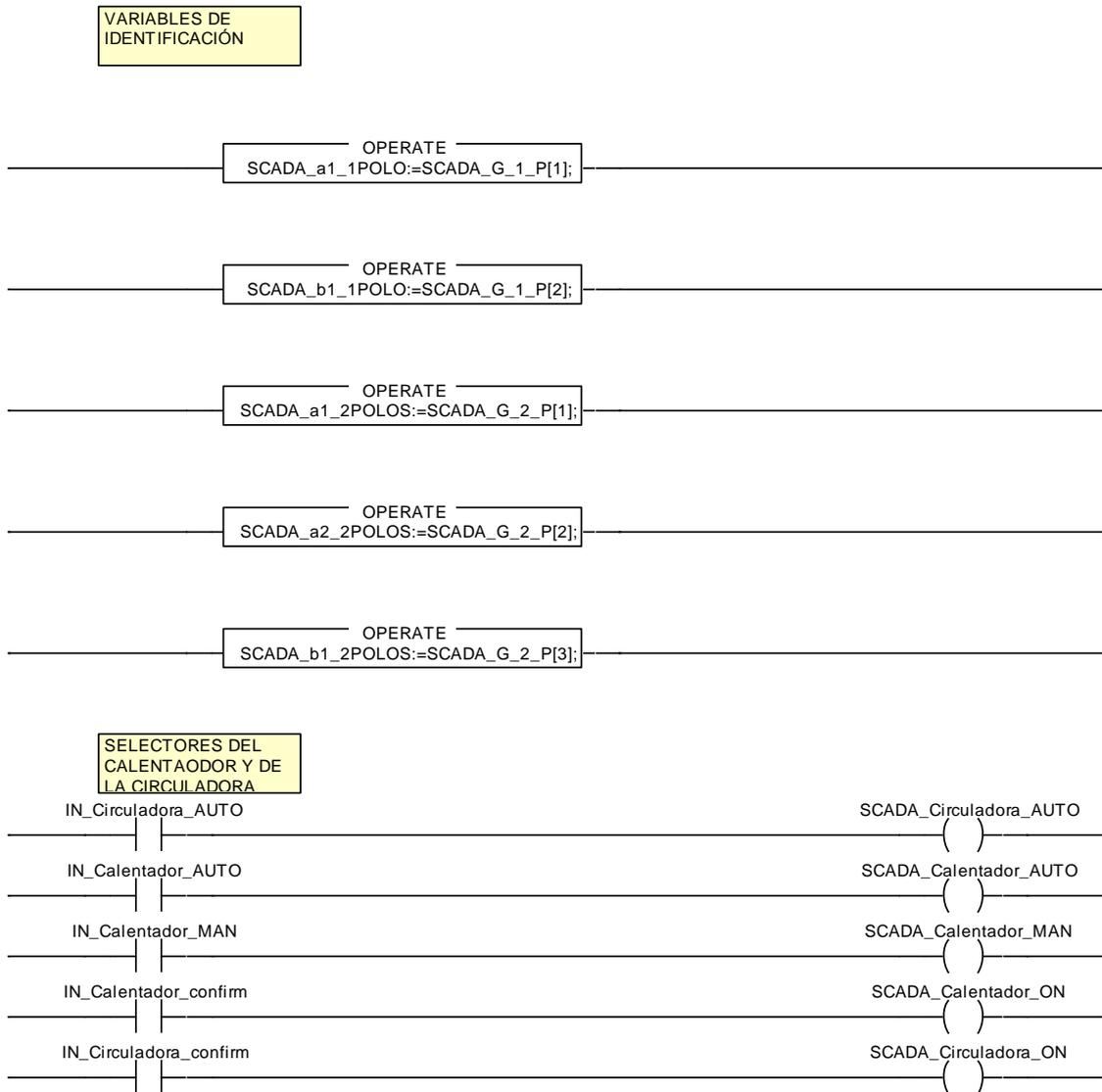


Figura 11.3.8.1 – Sección SCADA

Capítulo 12

Páginas del SCADA



Figura 12.0.8.1 – Página de inicio de SCADA CONFIG

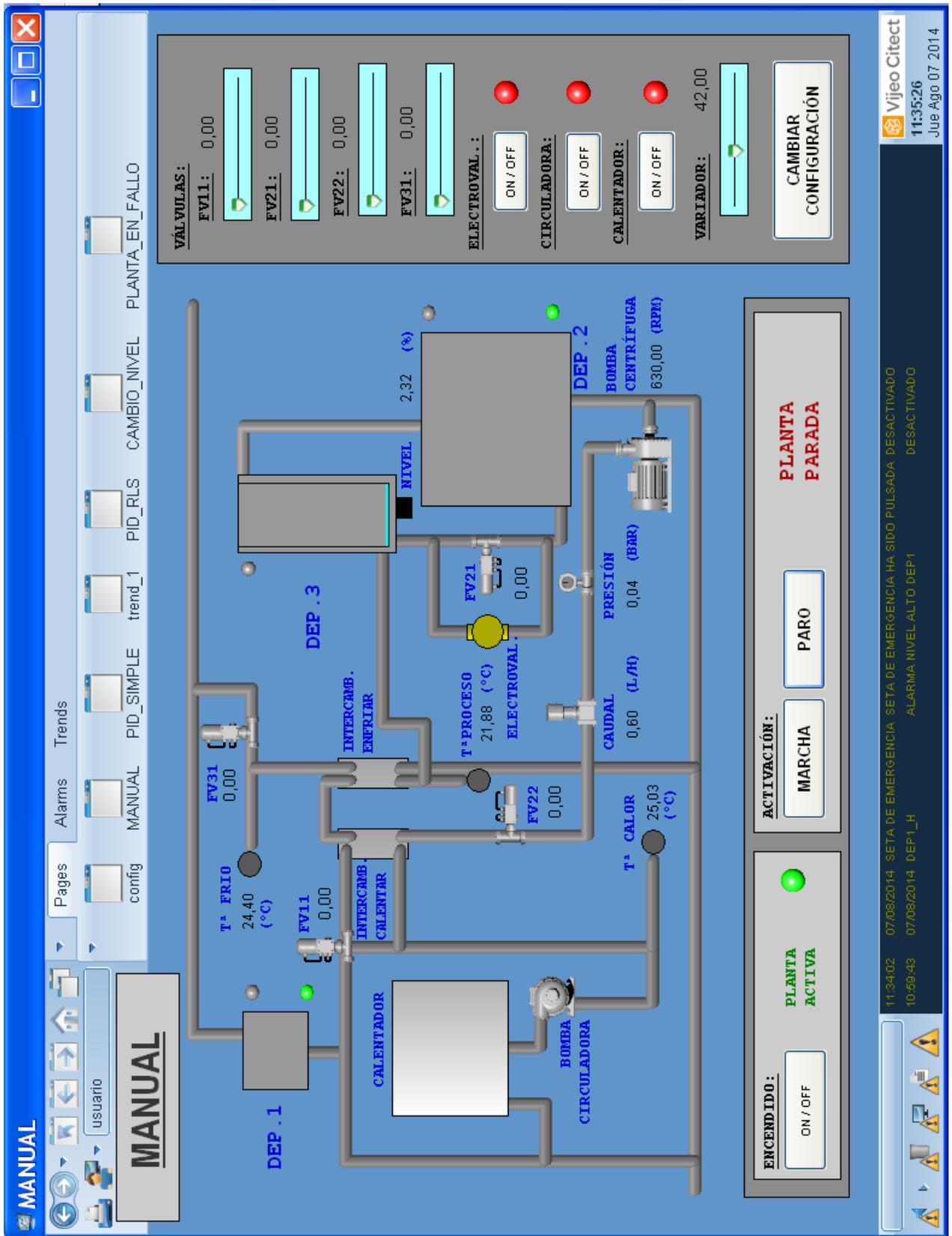


Figura 12.0.8.2 – Página de SCADA MANUAL

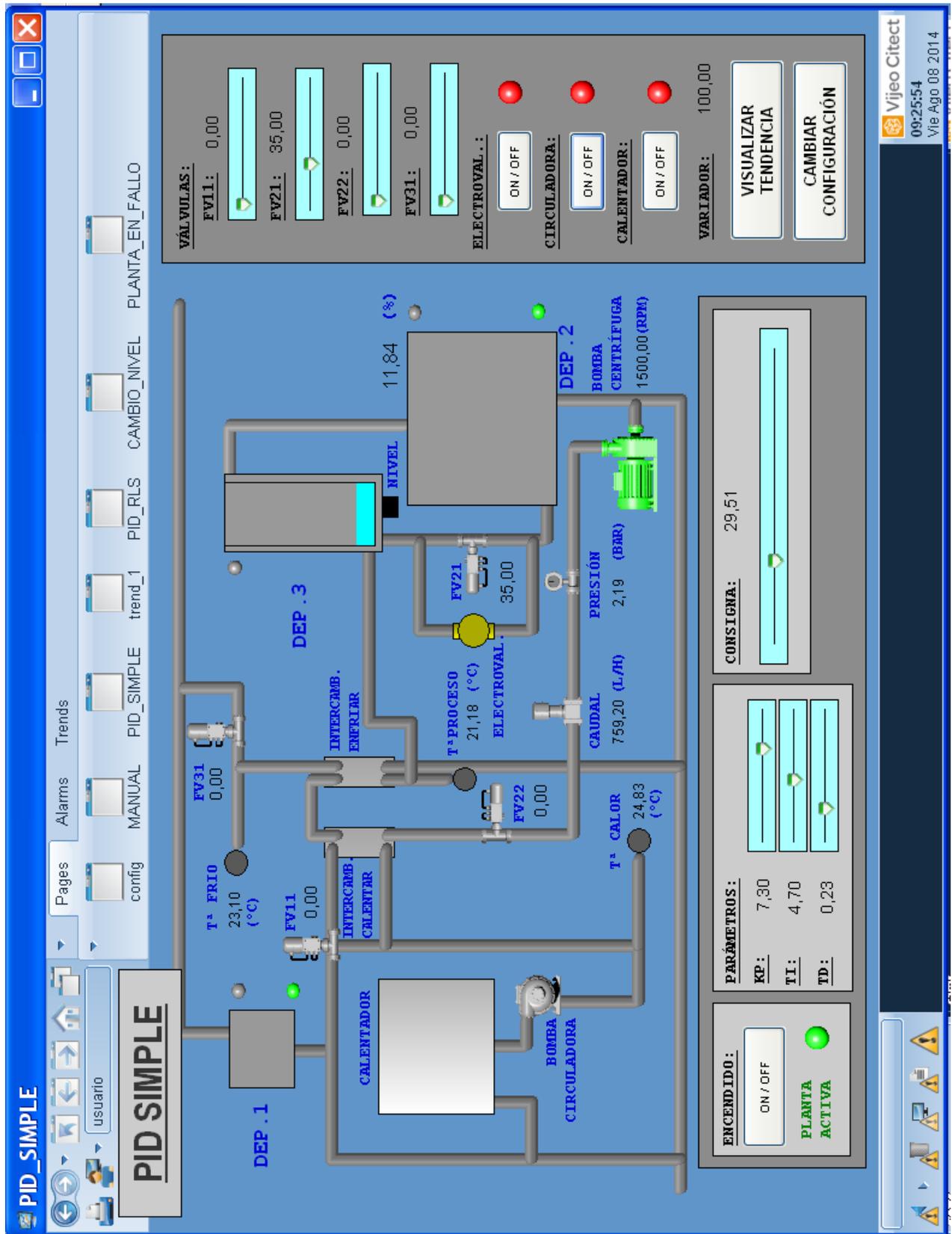


Figura 12.0.8.3 – Página de SCADA PID SIMPLE

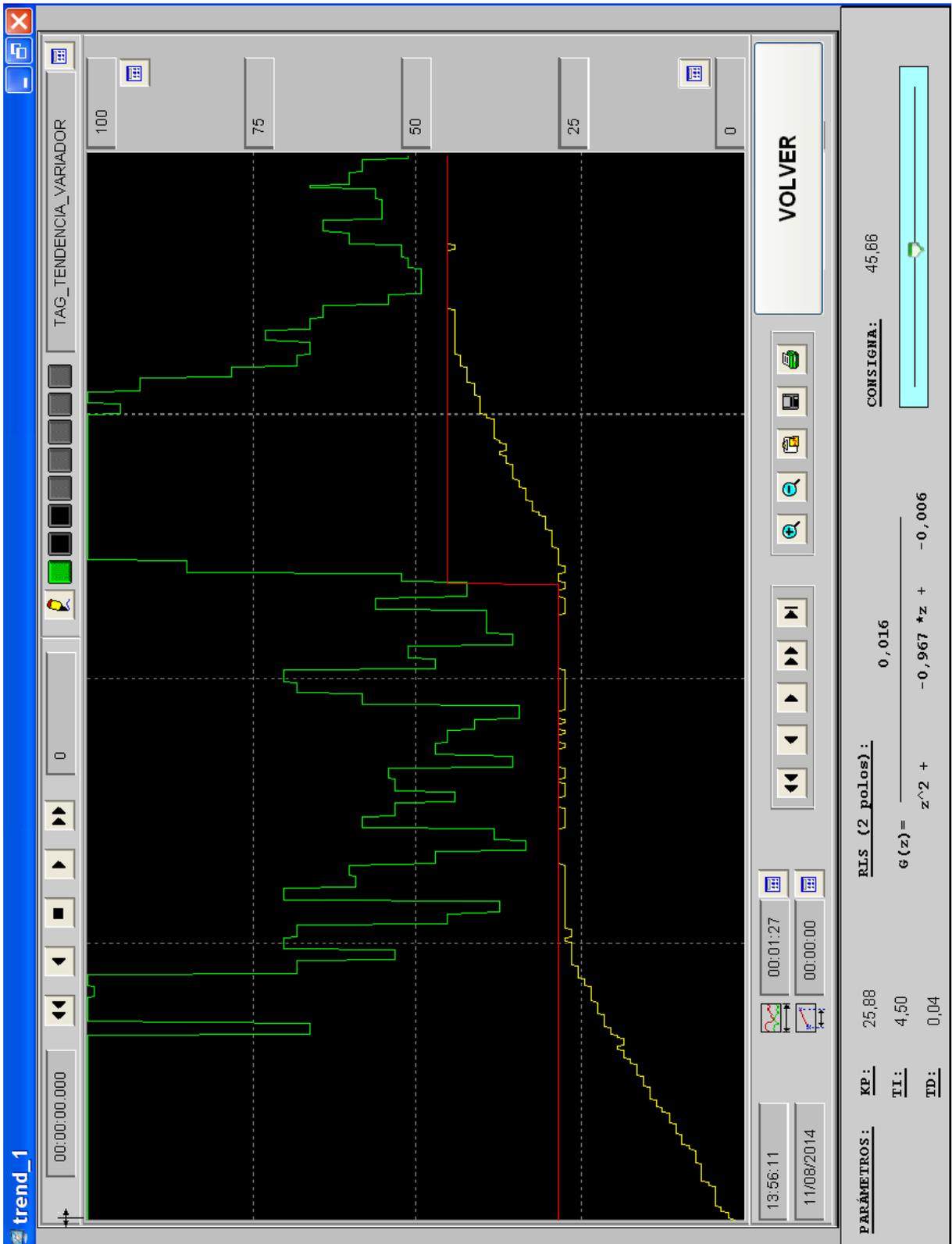


Figura 12.0.8.4 – Página de SCADA TREND para visualizar tendencias

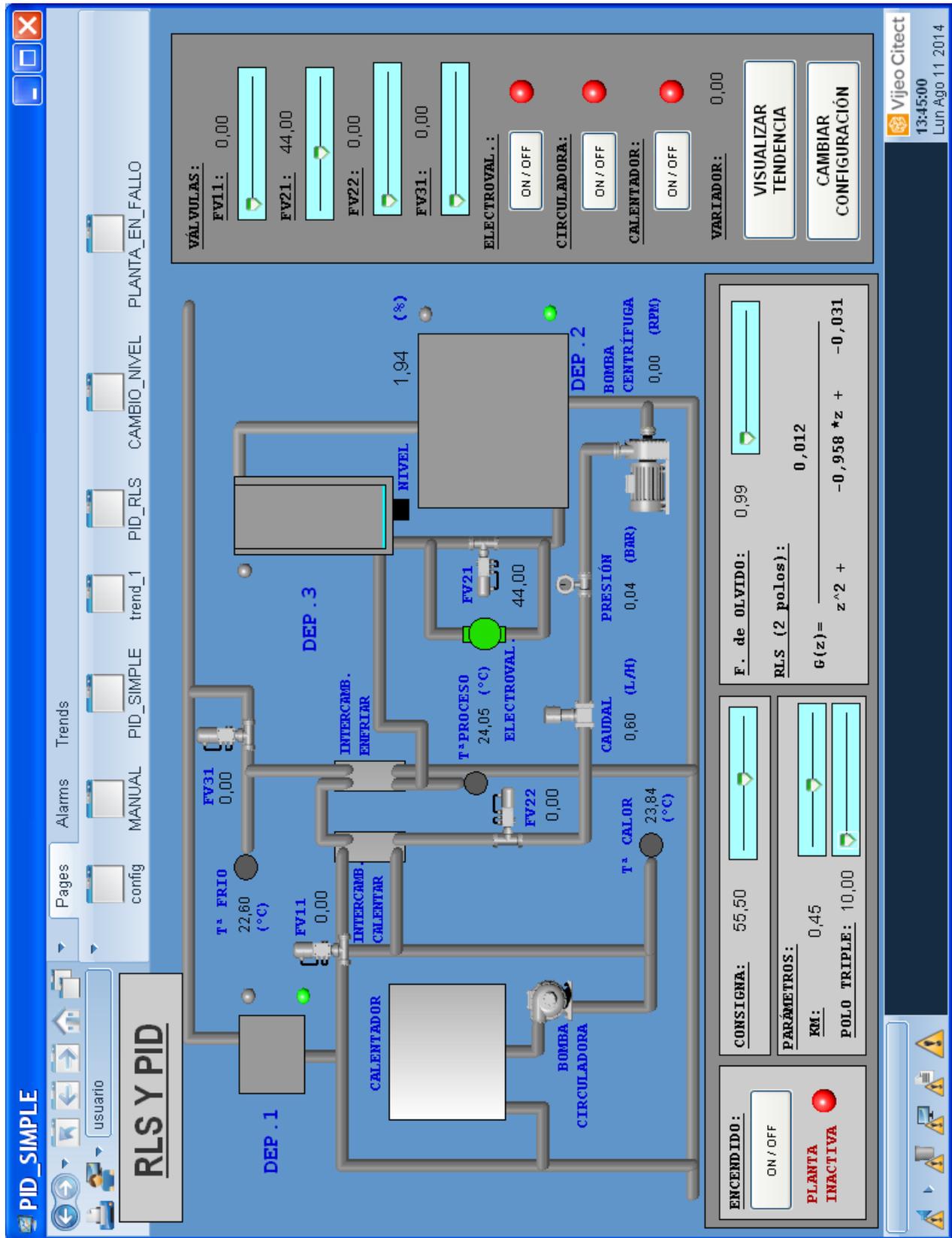


Figura 12.0.8.5 – Página de SCADA RLS PID

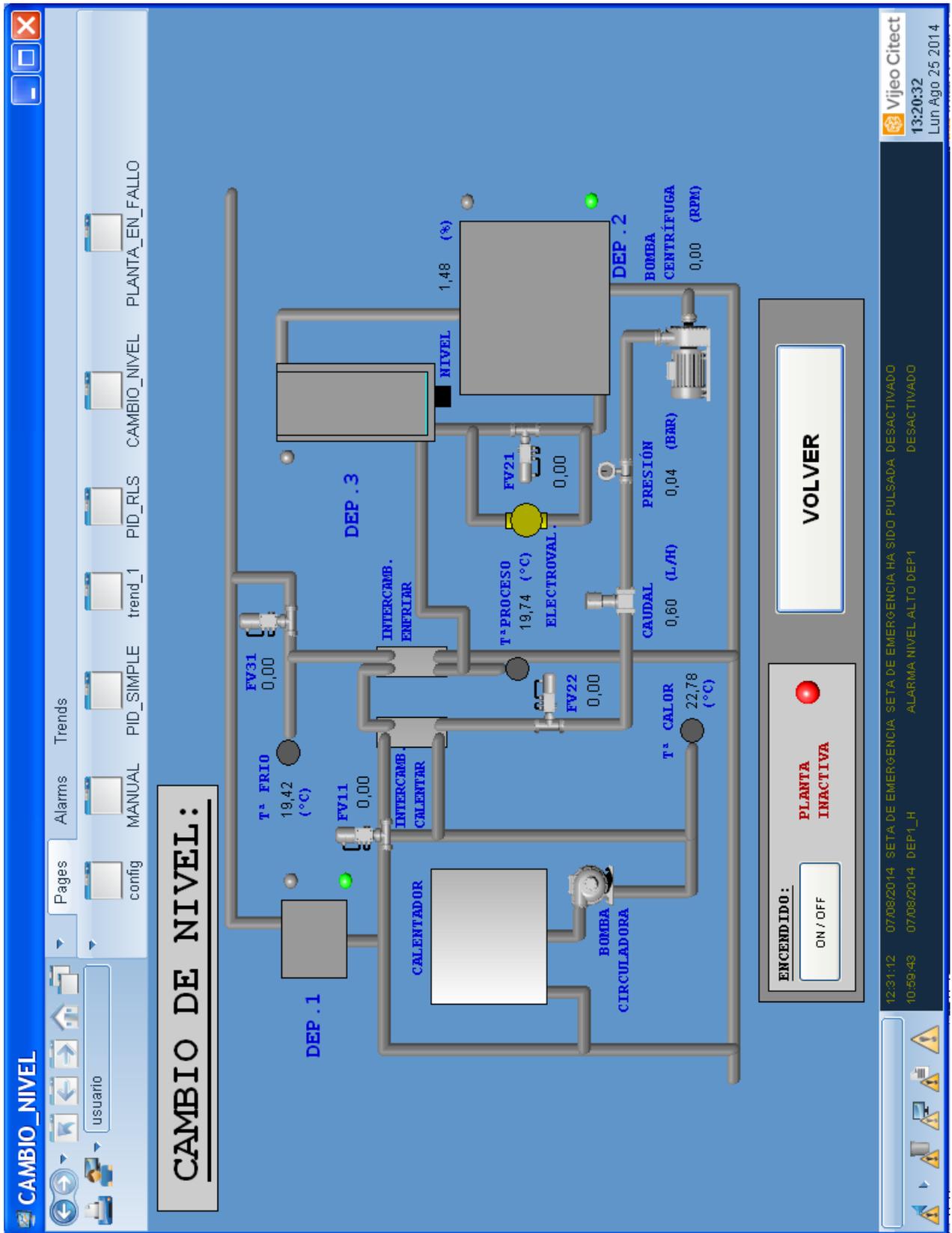


Figura 12.0.8.6 – Página de SCADA CAMBIO DE NIVEL



Figura 12.0.8.7 – Página de SCADA PLANTA EN FALLO lista para rearme

PLANOS

TÍTULO: Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios

PLANOS

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N

15405 - FERROL

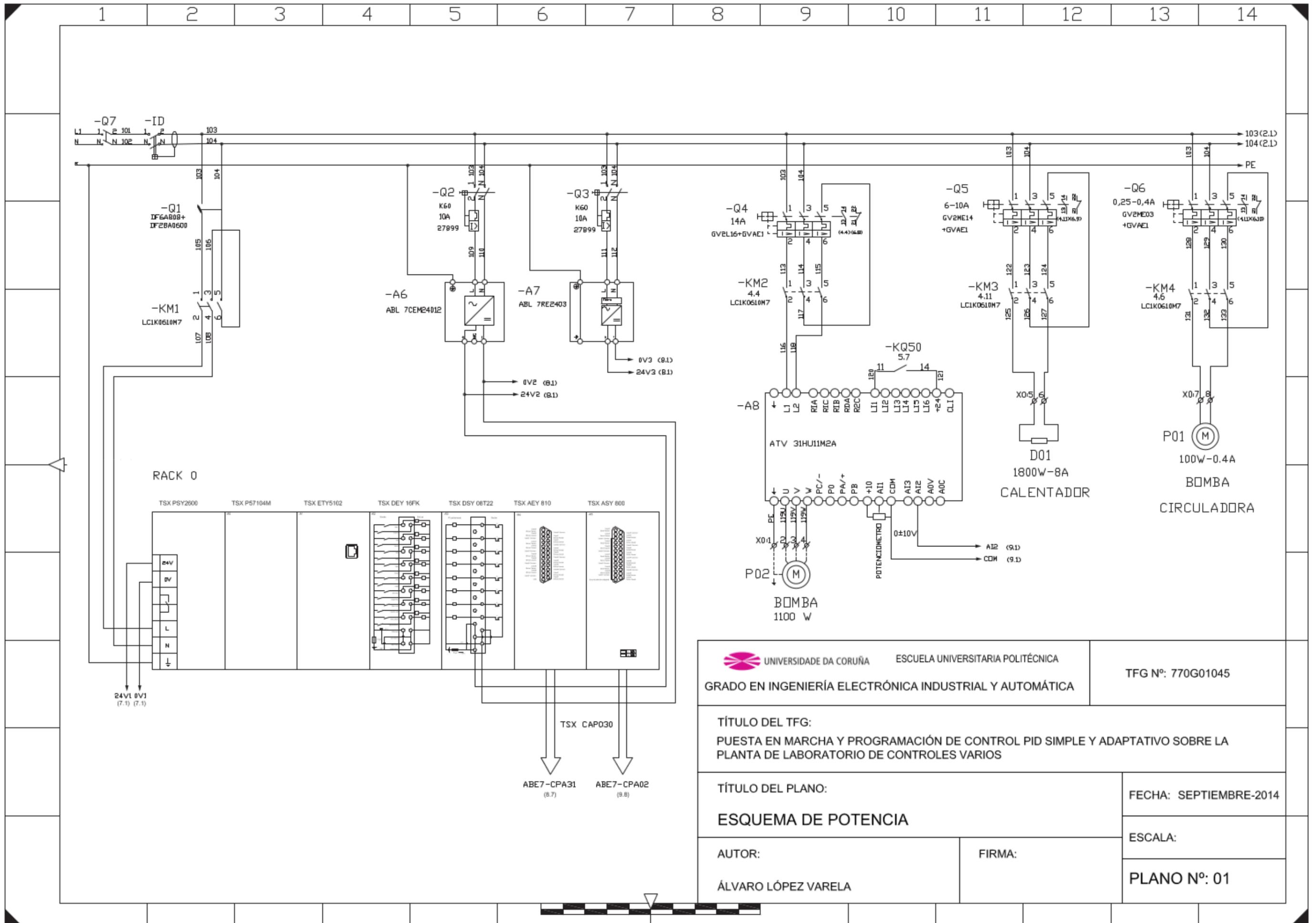
FECHA: SEPTIEMBRE DE 2014

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ÁLVARO LÓPEZ VARELA

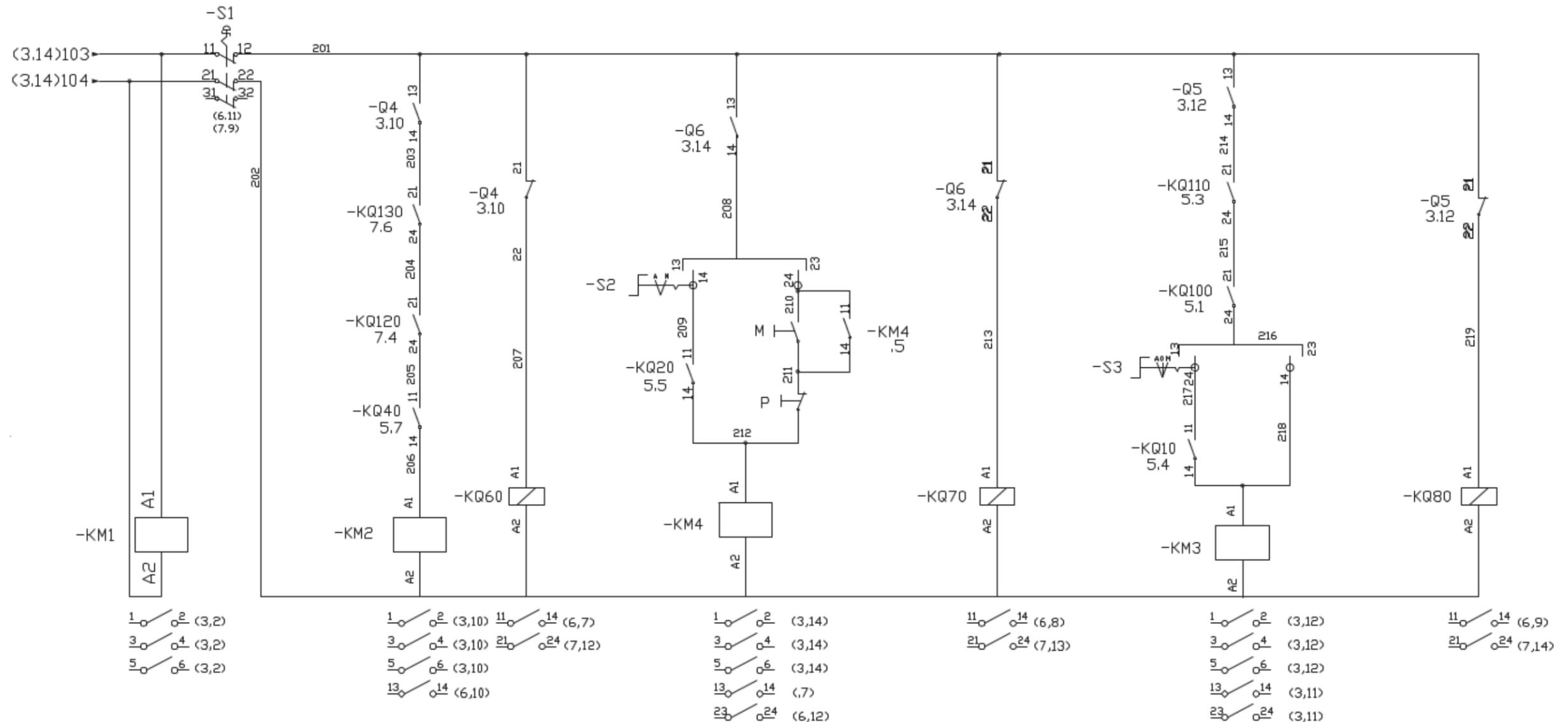
Índice de planos

1	Esquema de potencia	225
2	Esquema de control	227
3	Salidas digitales	229
4	Entradas digitales	231
5	Esquema de control 2	233
6	Entradas analógicas	235
7	Salidas analógicas	237



 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG Nº: 770G01045
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		
TÍTULO DEL TFG: PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN DE CONTROL PID SIMPLE Y ADAPTATIVO SOBRE LA PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROLES VARIOS		
TÍTULO DEL PLANO: ESQUEMA DE POTENCIA		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR:		ESCALA:
ÁLVARO LÓPEZ VARELA		PLANO Nº: 01
FIRMA:		

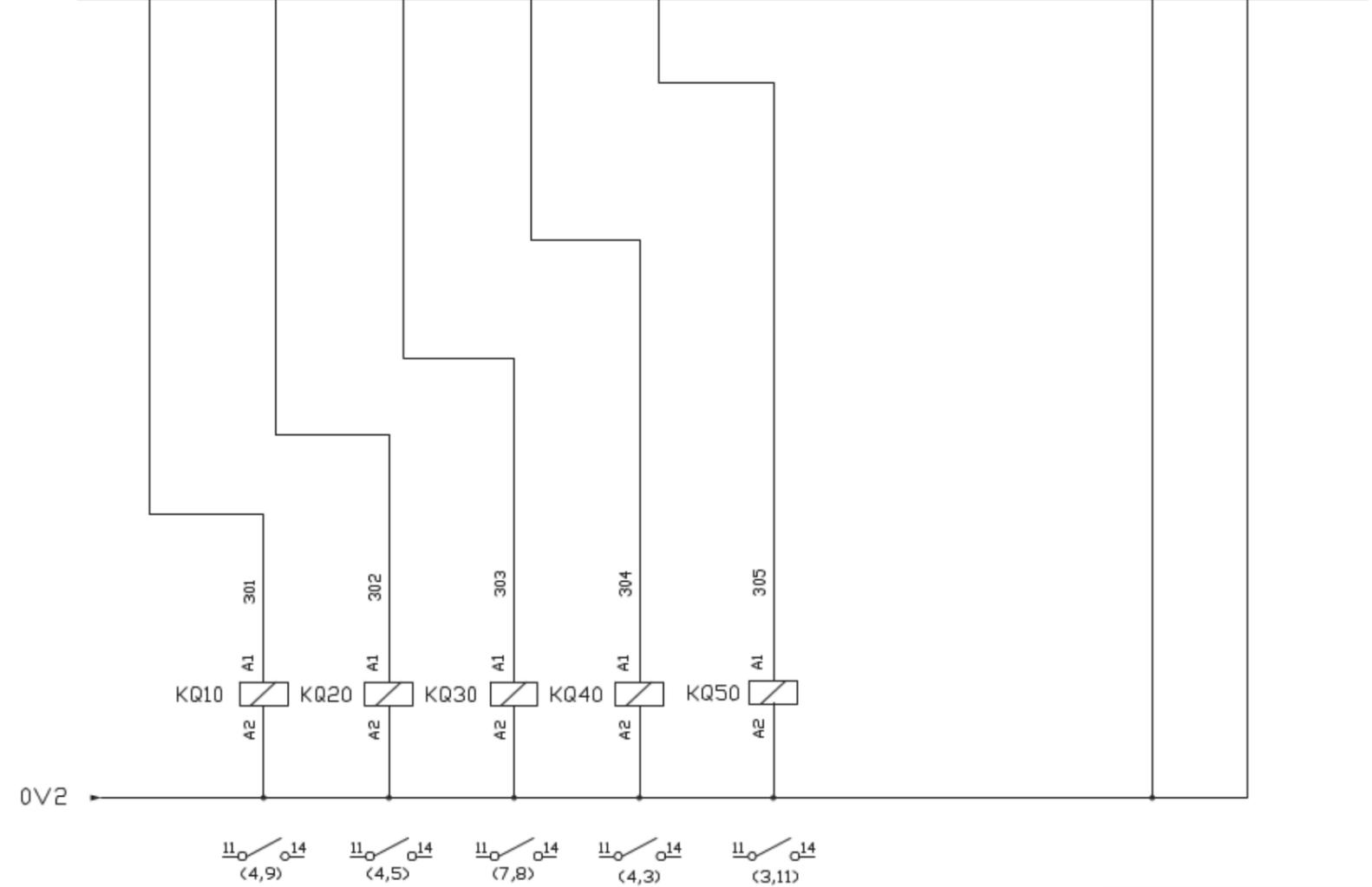
ALIMENT. AUTÓMATA	STOP EMERGENCIA	BOMBA (VARIADOR)	FALLO TÉRMICO	BOMBA CIRCULADORA	FALLO TÉRMICO	CALENTADOR	FALLO TÉRMICO
-------------------	-----------------	------------------	---------------	-------------------	---------------	------------	---------------



 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG Nº: 770G01045
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		
TÍTULO DEL TFG: PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN DE CONTROL PID SIMPLE Y ADAPTATIVO SOBRE LA PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROLES VARIOS		
TÍTULO DEL PLANO: ESQUEMA DE CONTROL		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR:	FIRMA:	ESCALA:
ÁLVARO LÓPEZ VARELA		PLANO Nº: 02



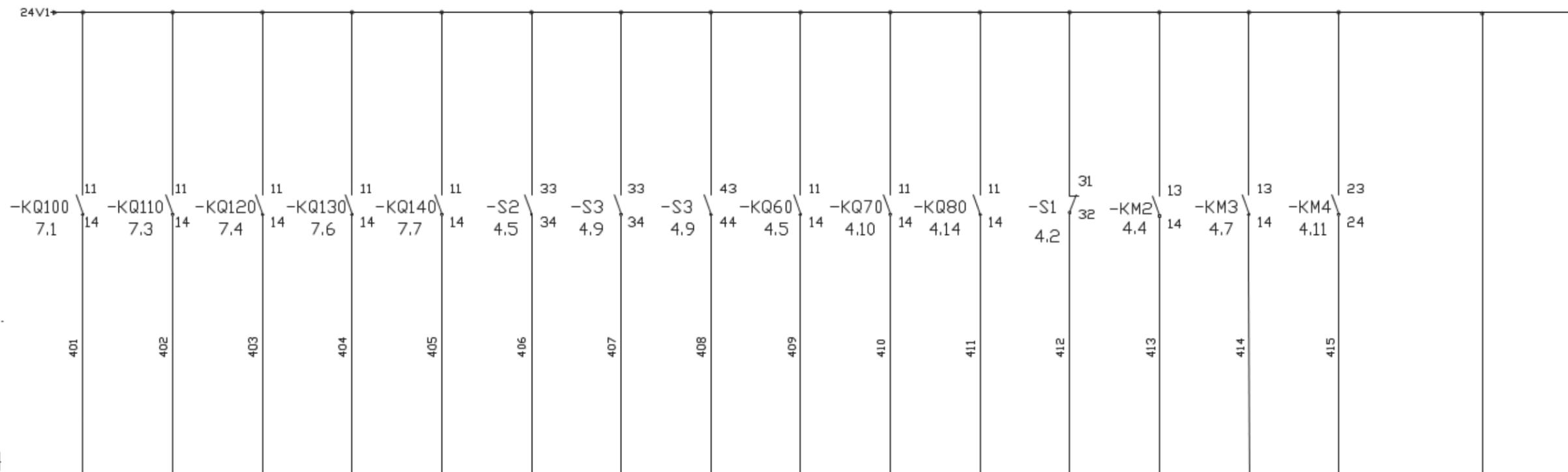
Salidas TSX DSY 08T2								
CALENTADOR D01 ON/OFF	B. CIRCULADORA P01 ON/OFF	ELECTROVALV. FY22 ON/OFF	VARIADOR FREQ. ON/OFF	VARIADOR FREQ. ORDEN MARCHA	RESERVA	RESERVA	RESERVA	ALIMENTACIÓN TARJETA
O0	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	0M 0L+ 1M 1L+



 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG Nº: 770G01045
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		
TÍTULO DEL TFG: PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN DE CONTROL PID SIMPLE Y ADAPTATIVO SOBRE LA PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROLES VARIOS		
TÍTULO DEL PLANO: SALIDAS DIGITALES		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		ESCALA: PLANO Nº: 03
FIRMA:		



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14



100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	1	2	3	4	5	6	7	8
I0	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	24V	0V	24V	0V				
DETECTOR NIVEL LSL1	DETECTOR NIVEL LSH1	PRESOSTATO	DETECTOR NIVEL LSL2	DETECTOR NIVEL LSH2	CIRCULADORA P01 AUTO	CALENTADOR D01 AUTO	CALENTADOR D01 MANUAL	FALLO TÉRMICO BOMBA	FALLO TÉRMICO CIRCULADORA	FALLO TÉRMICO CALENTADOR	STOP EMERGENCIA	CONF. MARCHA BOMBA	CONF. MARCHA CIRCULADORA	CONF. MARCHA CALENTADOR	RESERVA	Entradas ABE 7TES160							
24V	24V	0V	0V																				



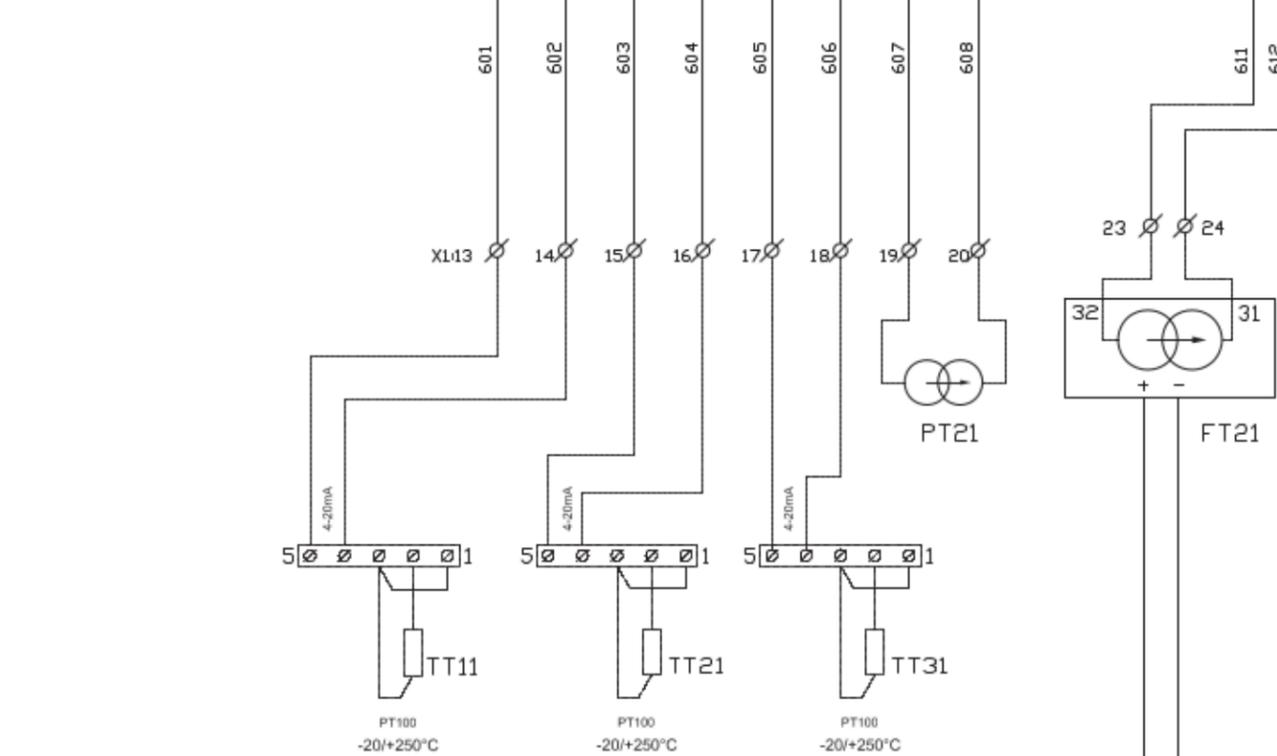
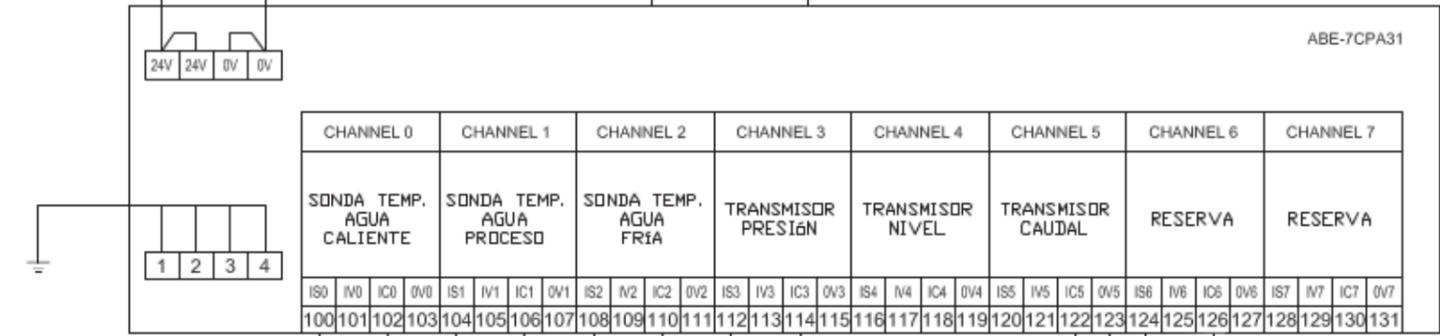
 UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA		TFG Nº: 770G01045
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		
TÍTULO DEL TFG: PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN DE CONTROL PID SIMPLE Y ADAPTATIVO SOBRE LA PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROLES VARIOS		
TÍTULO DEL PLANO: ENTRADAS DIGITALES		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		FIRMA:
		ESCALA: PLANO Nº: 04



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

(3.7) 0V3 → 0V3 (7.1)
 (3.7) 24V3 → 24V3 (7.1)

TSX AEY810 3.6)
 ↑
 TSX CAP030
 Sub-D 25 points



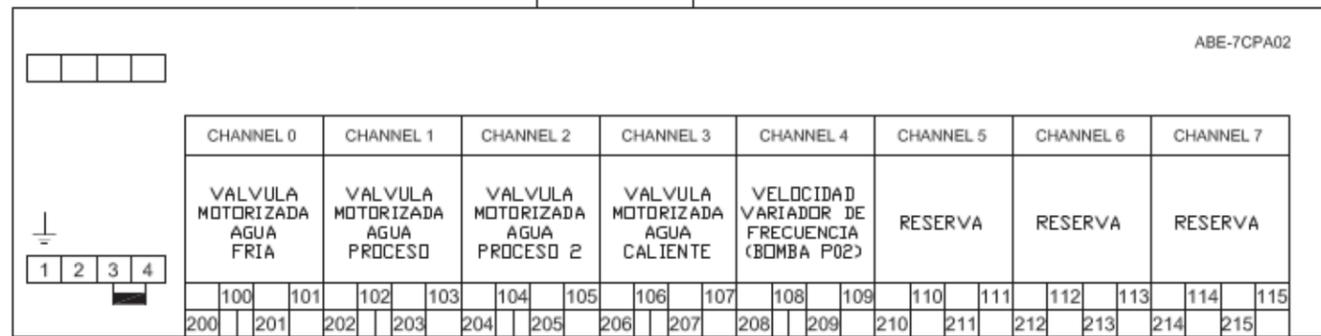
(3.6) 24V2 →
 (3.6) 0V2 →

UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		TFG Nº: 770G01045
TÍTULO DEL TFG: PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN DE CONTROL PID SIMPLE Y ADAPTATIVO SOBRE LA PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROLES VARIOS		
TÍTULO DEL PLANO: ENTRADAS ANALÓGICAS		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		FIRMA: ESCALA: PLANO Nº: 06

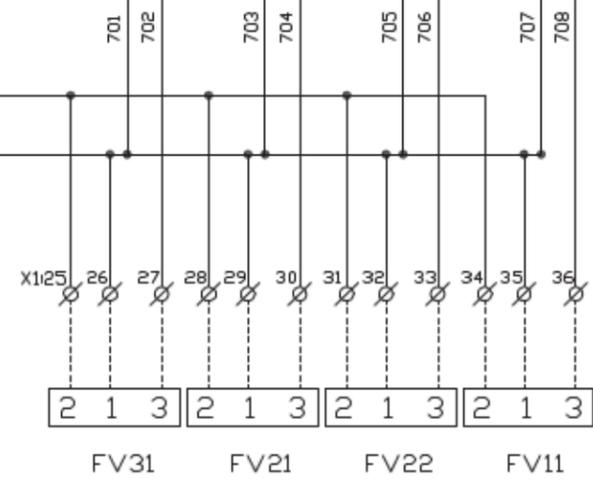


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

TSX ASY800 (3.7)
 ↑
 TSX CAP030
 Sub-D 25 points



(8.14) 24V3
 (8.14) 0V3



(1.11) AI2
 (1.11) COM

UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		TFG Nº: 770G01045
TÍTULO DEL TFG: PUESTA EN MARCHA Y PROGRAMACIÓN DE CONTROL PID SIMPLE Y ADAPTATIVO SOBRE LA PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROLES VARIOS		
TÍTULO DEL PLANO: SALIDAS ANALÓGICAS		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		FIRMA: ESCALA: PLANO Nº: 07



PLIEGO DE CONDICIONES

TÍTULO: Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios

PLIEGO DE CONDICIONES

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2014

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ÁLVARO LÓPEZ VARELA

13 Condiciones de funcionamiento	245
13.1 Colocación de la planta	245
13.2 Líquidos de la planta	245
13.3 Presión ambiental	245
13.4 Temperatura ambiente	246
13.5 Humedad y proyecciones de líquidos	246
13.6 Polvo	246
13.7 Alimentación	246
13.8 Comunicación con PC	246

Capítulo 13

Condiciones de funcionamiento

En el presente trabajo, es conveniente determinar el ámbito de utilización de la planta y las condiciones de entorno en las cuales puede realizar sus funciones. De este modo, las condiciones de funcionamiento de la planta son:

13.1. Colocación de la planta

La maqueta está dispuesta sobre unas ruedas y sobre un suelo liso y nivelado. Por lo tanto, éstas condiciones deben mantenerse pues una colocación inclinada de la planta podría suponer medidas falseadas y otros inconvenientes.

13.2. Líquidos de la planta

La planta se programa de tal forma que admita cambios en las características de los fluidos del sistema. Sin embargo, quedan vetados los líquidos corrosivos, ácidos o de cualquier tipo que puedan destruir las tuberías y demás elementos. Los líquidos deben ser limpios, es decir, sin partículas en suspensión que se puedan depositar en las tuberías u reducir su sección, y preferiblemente con puntos de fusión y ebullición similares a los del agua, o bien menores de fusión y mayores de ebullición. No se admiten líquidos tóxicos o explosivos.

13.3. Presión ambiental

No es relevante.

13.4. Temperatura ambiente

La temperatura ambiente afecta de forma determinante a los líquidos de la maqueta, por lo cual es conveniente no trabajar fuera del rango de seguridad de 5 a 40°C.

13.5. Humedad y proyecciones de líquidos

Los elementos de la parte frontal de la planta están diseñados y protegidos para trabajar con líquidos conductores y con humedad, pero el panel de control y distribución, situado en su parte posterior no, por lo que permanecerá cerrado ante posibles proyecciones de agua u otros líquidos que puedan afectar al correcto funcionamiento de todos los elementos de control.

13.6. Polvo

Los depósitos de almacenamiento del líquido de proceso, de medición de nivel y de expansión del calentador están abiertos al exterior, por lo que la planta deberá estar lejos de focos de polvo u otras partículas. Cuando no sea posible trabajar sin garantizar que no haya polvo, los depósitos se tapan dejando en todo momento los depósitos a presión ambiental.

13.7. Alimentación

La planta tiene un consumo estimado a mayor potencia de 16.889 A, por lo que se deberá conectar a una toma de fuerza de 20 A como mínimo.

13.8. Comunicación con PC

Para poder trabajar con la planta una vez programada, es necesario un ordenador que cuente con el software de realización del SCADA instalado, más concretamente, Vijeo Citect 7.2. Del mismo modo dicho ordenador debe contar con una conexión de red Ethernet para poder conectarse a la planta. Para realizar modificaciones en la programación de la planta no permitidas desde el SCADA, es necesario que dicho ordenador cuente también con el software de control Unity Pro XL.

PRESUPUESTO

TÍTULO: Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios

PRESUPUESTO

PETICIONARIO: ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N

15405 - FERROL

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2014

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: ÁLVARO LÓPEZ VARELA

Concepto	Ud medida	Precio / Ud	Unidades	Total
Puesta en marcha	horas ingeniero	50.00 €	50 h	2500 €
Gestion de la planta	horas ingeniero	50.00 €	25 h	1250 €
Control PID simple	horas ingeniero	50.00 €	10 h	500 €
Control PID adaptativo	horas ingeniero	50.00 €	65 h	3750 €
SCADA	horas ingeniero	50.00 €	50 h	2500 €
Cambios en la planta	horas técnico	50.00 €	3 h	150 €
Electroválvula	ud	118.58 €	2 h	118.58 €

TOTAL:

10268.58 €

