



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2018/19

*IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL BASADO EN GAIN
SCHEDULING Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE
COMPUTACIONAL PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS.*

Máster en Ingeniería Industrial

ALUMNO: Álvaro López Varela

TUTOR: Jose Luis Calvo Rolle

FECHA: SEPTIEMBRE DE 2019

Implementación de control basado en Gain Scheduling y aplicación de técnicas de aprendizaje computacional para detección de anomalías

Resumen: Desde hace unas décadas, la implementación de sistemas de control ha evolucionado desde la búsqueda de un funcionamiento deseado a un funcionamiento óptimo. Múltiples técnicas de control han sido propuestas en este sentido, como el control mediante Gain Scheduling. La técnica de control mediante Gain Scheduling se basa en la actualización de los parámetros de uno o varios controladores en función de las condiciones de proceso o externas. En el presente trabajo se realiza la implementación de esta técnica sobre un controlador PID, en el cual se actualizan las constantes proporcional, integral y derivativa en función de un grupo de variables de proceso. También se programa una detección de anomalías para determinar si durante el funcionamiento se produce alguna novedad o perturbación que causa que el sistema salga de su región de funcionamiento normal. Las implementaciones se realizan sobre la planta de laboratorio de Controles Varios, ubicada en el laboratorio de Optimización y Control de la Escuela Universitaria Politécnica de Serantes.

Implementación de control basado en Gain Scheduling e aplicación de técnicas de aprendizaje computacional para detección de anomalías

Resumo: Desde hai unhas décadas, a implementación de sistemas de control evolucionou dende a busca dun funcionamento desexado a un funcionamento óptimo. Múltiples técnicas de control foron propostas neste senso, coma o control mediante Gain Scheduling. A técnica de control mediante Gain Scheduling basease na actualización dos parámetros dun ou varios controladores en función das condicións de proceso ou externas. No presente traballo realízase a implementación desta técnica sobre un controlador PID, no cal se actualizan as constantes proporcional, integral e derivativa en función dun grupo de variables de proceso. Tamén se programa unha detección de anomalías para determinar se durante o funcionamento se produce algunha novidade ou perturbación que causa que o sistema saia da súa rexión de funcionamento normal. As implementacións realízanse na planta de laboratorio de Controles Varios, ubicada no laboratorio de Optimización e Control da Escuela Universitaria Politécnica de Serantes.

Implementation of a gain scheduling-based control and application of computational learning techniques for anomaly detection

Abstract: Some decades from now, the implementation of control systems has been changing from a desired to an optimal performance. Multiple techniques has been proposed in this sense, like the Gain Scheduling control. This technique is based on the actualization of the parameters of one or several controllers depending on the process conditions or external conditions. In this work, this control technique is implemented with a PID control, where the proportional, integral and derivative constants are actualized with the process conditions. An anomaly detection is also implemented to determine if any perturbation or novelty takes the plant of its normal performance. All the implementations are done in the Planta de Controles Varios, placed in the Optimization and Control laboratory in the Escuela Universitaria Politécnica de Serantes.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2018/19

*IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL BASADO EN GAIN
SCHEDULING Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE
COMPUTACIONAL PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS.*

Máster en Ingeniería Industrial

Documento

ÍNDICE GENERAL

Contenidos del TFM	7
Índice de figuras	11
Índice de tablas	13
Índice del documento Memoria	17
1 Objeto	19
2 Alcance	21
3 Antecedentes	23
3.1 Planta de laboratorio de controles varios	23
4 Normas y referencias	25
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas	25
4.2 Bibliografía	25
4.3 Programas de cálculo	25
4.4 Otras referencias	25
5 Definiciones y abreviaturas	27
6 Requisitos de diseño	29
7 Análisis de las soluciones	31
7.1 Descripción de la planta	31
7.1.1 Estructura y tuberías	32
7.1.2 Sensores	33
7.1.3 Actuadores	34
7.1.4 Panel de mando	37
7.1.5 Cuadro de Control y Distribución	38
7.2 Control	45
7.2.1 PID	45
7.2.2 Gain Scheduling	48
7.3 Detección de anomalías	50
7.3.1 Detección de anomalías en el control del nivel	52
8 Resultados finales	55
8.1 Test inicial de funcionamiento de equipos	55
8.2 Control de proceso	56
8.2.1 Procesos	56
8.3 Control de nivel	60
8.3.1 Control PID	60
8.3.2 Obtención de parámetros optimizados	65

8.3.3	Almacenamiento de parámetros	67
8.3.4	Gain Scheduling	67
8.3.5	Interfaz gráfica	70
8.4	Detección de anomalías	72
8.4.1	Detección regresiva simple	72
8.4.2	Detección estadística	73
8.4.3	Interfaz gráfica	76
	Índice del documento Anexos	83
9	Documentación de partida	85
9.1	Datos de partida	86
9.1.1	Identificación de la planta	86
9.1.2	PID SIMPLE	93
10	Cálculos	95
10.1	Media y covarianza	95
11	Programación	97
11.1	Lista de variables	98
11.2	Bloques de función derivados	104
11.2.1	Activ_detec	104
11.2.2	Calc_indice	106
11.2.3	Deteccion_estad	108
11.2.4	Deteccion_y_estim	111
11.2.5	Medias_elementos_G	113
11.2.6	Obt_param_Relay	115
11.2.7	Param_detec	118
11.2.8	PID_SIMPLE	120
11.2.9	Relay_Feedback	123
11.2.10	RLS	123
11.3	Secciones	124
11.3.1	Seguridad	124
11.3.2	Mando	125
11.3.3	Funcionamiento	126
11.3.4	Acciones seguridad	127
11.3.5	IN_SCADA	128
11.3.6	Acciones funcionamiento	132
11.3.7	PID	134
12	Otros anexos	137
12.1	Guía de usuario	137
12.1.1	Inicio	139
12.1.2	Obtención de parámetros	140
12.1.3	Gain Scheduling	141

12.1.4	Aprendizaje	142
12.1.5	Detección de anomalías	142
12.1.6	Gráficas	143
12.1.7	Planta en fallo	144
12.2	Macro de Excel	146
12.3	Código de MATLAB	149
	Índice del documento Planos	153
	Esquema de potencia	155
	Esquema de control	157
	Salidas digitales	159
	Entradas digitales	161
	Esquema de control 2	163
	Entradas analógicas	165
	Salidas analógicas	167
	Índice del documento Pliego de condiciones	171
13	Condiciones de funcionamiento	173
13.1	Colocación de la planta	173
13.2	Líquidos de la planta	173
13.3	Presión ambiental	173
13.4	Temperatura ambiente	173
13.5	Humedad y proyecciones de líquidos	173
13.6	Polvo	174
13.7	Alimentación	174
13.8	Comunicación con PC	174
	Índice del documento Presupuesto	177
14	Presupuesto	179

Índice de figuras

3.1.0.1	Planta de controles varios	23
7.1.0.1	Planta de controles varios	31
7.1.1.1	Esquema de la planta	32
7.1.2.1	Detector de nivel	33
7.1.2.2	Sensor de temperatura	33
7.1.2.3	Sensor de presión	33
7.1.2.4	Sensor de nivel	34
7.1.2.5	Caudalímetro	34
7.1.3.1	Bomba centrífuga	35
7.1.3.2	Bomba de circulación Saci VA 35/130	35
7.1.4.1	Panel de mando	37
7.1.5.1	Procesador TSX P57 104M	38
7.1.5.2	Módulo TSX ETY 5103	38
7.1.5.3	Módulo TSXDEY16FK	39
7.1.5.4	Módulo TSXDSY08T22	39
7.1.5.5	Módulo TSXAEY810	39
7.1.5.6	Módulo TSXASY800	40
7.1.5.7	Características de los contactores	40
7.1.5.8	Características de los relés	41
7.1.5.9	Variador de frecuencia ATV 31HU11M2A de Telemecanique	41
7.1.5.10	Características del variador ATV 31HU11M2A de Telemecanique	42
7.1.5.11	Base Telefast ABE-7CPA31	42
7.1.5.12	Base Telefast ABE-7CPA02	43
7.2.1.1	Controlador PID	45
7.2.2.1	PID con Gain Scheduling	48
7.3.0.2	Ejemplo de anomalías en 2 dimensiones.	50
8.2.1.1	Guía GEMMA	56
8.2.1.2	Procesos de la guía GEMMA	57
8.2.1.3	Modos de funcionamiento	58
8.3.1.1	Relé con histéresis	61
8.3.1.2	Respuesta a consigna de 30 con parámetros calculados mediante el método Relay-Feedback con constantes estándar	63

8.3.1.3	Respuesta a consigna de 30 con parámetros calculados mediante el método Relay-Feedback con constantes para pequeña sobreoscilación	63
8.3.1.4	Respuesta a consigna de 30 y de 50 % con parámetros calculados mediante el método Relay-Feedback con constantes experimentales	64
8.3.2.1	Gráfica de respuesta de PID.	65
8.3.2.2	Ajuste fino de un PID.	66
8.3.4.1	Respuesta ante varias entradas escalón mediante control con parámetros estáticos.	68
8.3.4.2	Respuesta ante varias entradas escalón mediante control con Gain Scheduling con FV21 al 50 %	68
8.3.4.3	Respuesta ante varias entradas escalón mediante control con Gain Scheduling con FV21 al 80 %	69
8.3.5.1	Pantalla de inicio.	70
8.3.5.2	Pantalla de obtención de parámetros.	71
8.3.5.3	Pantalla de control PID mediante Gain Scheduling.	71
8.4.1.1	Gráfica de detección de anomalías ante aporte externo de agua.	73
8.4.2.1	Visualización de detección de anomalías en 3D.	74
8.4.2.2	Visualización de detección de anomalías en 3D con zoom en región de funcionamiento normal.	75
8.4.3.1	Pantalla de aprendizaje.	76
8.4.3.2	Pantalla de detección de anomalías.	77
8.4.3.3	Gráfica de Excel con datos de aprendizaje (azul), datos normales (en verde) y anomalías (en rojo)	77
8.4.3.4	Aplicación de Excel para graficar la detección de anomalías.	78
12.1.0.1	Planta de Controles Varios.	137
12.1.0.2	Icono de inicio de aplicación.	138
12.1.1.1	Página de inicio.	139
12.1.2.1	Página de obtención de parámetros.	140
12.1.3.1	Página de control PID mediante Gain Scheduling.	141
12.1.4.1	Pantalla de aprendizaje.	142
12.1.5.1	Pantalla de detección de anomalías.	143
12.1.6.1	Pantalla de gráficas.	144
12.1.7.1	Pantalla de fallos de planta.	144

Índice de tablas

7.1.3.1 Características de la electroválvula	35
7.1.3.2 Características eléctricas de las válvulas servopilotadas	36
7.1.5.1 Características de las fuentes de alimentación	43
7.1.5.2 Características del interruptor diferencial	43
7.1.5.3 Características de los interruptores magnetotérmicos	44
7.2.2.1 Índices de regiones de control para Gain Scheduling	49
8.3.1.1 Método de sintonización de Ziegler & Nichols	62
8.3.1.2 Cálculo de parámetros implementado en el control de nivel.	62



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2018/19

*IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL BASADO EN GAIN
SCHEDULING Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE
COMPUTACIONAL PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS.*

Máster en Ingeniería Industrial

Documento

MEMORIA

Índice del documento MEMORIA

1	Objeto	19
2	Alcance	21
3	Antecedentes	23
3.1	Planta de laboratorio de controles varios	23
4	Normas y referencias	25
4.1	Disposiciones legales y normas aplicadas	25
4.2	Bibliografía	25
4.3	Programas de cálculo	25
4.4	Otras referencias	25
5	Definiciones y abreviaturas	27
6	Requisitos de diseño	29
7	Análisis de las soluciones	31
7.1	Descripción de la planta	31
7.1.1	Estructura y tuberías	32
7.1.2	Sensores	33
7.1.3	Actuadores	34
7.1.4	Panel de mando	37
7.1.5	Cuadro de Control y Distribución	38
7.2	Control	45
7.2.1	PID	45
7.2.1.1	Modelo PID	46
7.2.1.2	Filtro derivativo	47
7.2.1.3	Anti-windup	47
7.2.2	Gain Scheduling	48
7.3	Detección de anomalías	50
7.3.1	Detección de anomalías en el control del nivel	52
8	Resultados finales	55
8.1	Test inicial de funcionamiento de equipos	55
8.2	Control de proceso	56
8.2.1	Procesos	56
8.3	Control de nivel	60
8.3.1	Control PID	60
8.3.1.1	Relay-Feedback	61

8.3.2	Obtención de parámetros optimizados	65
8.3.3	Almacenamiento de parámetros	67
8.3.4	Gain Scheduling	67
8.3.5	Interfaz gráfica	70
8.4	Detección de anomalías	72
8.4.1	Detección regresiva simple	72
8.4.2	Detección estadística	73
8.4.3	Interfaz gráfica	76
8.4.3.1	Vijeo Citect	76
8.4.3.2	Excel	77
8.4.3.3	Matlab	79

1 Objeto

El presente proyecto tiene como objeto la implementación de un control de nivel en la planta de laboratorio de controles varios basado en Gain Scheduling, así como la programación de un sistema que permita detectar novedades o anomalías producidas por cualquier tipo de perturbación o fallo en el régimen general de trabajo utilizando métodos de aprendizaje computacional.

2 Alcance

El presente proyecto pretende dar respuesta a los problemas de fallos en los regímenes de funcionamiento normales en instalaciones de control. Para demostrar el funcionamiento de los métodos de detección de anomalías, se implementará uno en la planta de laboratorio de controles varios de la E.U.P. de Serantes (Ferrol).

El proyecto consta de 5 partes:

- Identificación del lazo de control de nivel.
- Estudio e implementación de un control mediante Gain Scheduling en la planta de laboratorio de controles varios
- Familiarización con sistemas inteligentes típicos empleados en detección de anomalías.
- Implementación de un modelo de detección de anomalías sobre el sistema en estudio.
- Diseño y programación de un sistema SCADA para monitorización.

3 Antecedentes

3.1. Planta de laboratorio de controles varios

La planta de Controles Varios del laboratorio de Optimización y Control es una instalación sobre un panel vertical de un sistema de tuberías que incluye sistemas de bombeo, sistemas de intercambio de calor y sistemas de control de presión y medición de caudal, entre otros equipos. La planta se describe de forma más detallada en el apartado 7.1.5. Los métodos de control y de detección de anomalías objeto del presente proyecto se implementarán sobre el lazo de control de nivel de esta planta, que ya ha sido probado e identificado en anteriores proyectos [2].



Figura 3.1.0.1 – Planta de laboratorio de controles varios

En trabajos previos [2], [3], se han llevado a cabo desde la puesta en marcha de la instalación a nivel general, incluyendo una interfaz gráfica para supervisión y actuación individual de equipos, hasta la implementación de controles de nivel o caudal, desde PIDs simples hasta PIDs adaptativos con técnicas de identificación para actualización de parámetros del controlador. Por lo tanto, ya existe una estructura de control a nivel de proceso implementada en el autómeta de control, así como otras funciones de escalado o actuación de equipos que es posible reutilizar.

Del mismo modo, la identificación de parámetros realizada en [2] también es de utilidad para el presente proyecto, con las modificaciones oportunas.

La implementación de Gain Scheduling sirve a modo de comparativa (o mejora) con respecto a las técnicas de control implementadas previamente, y surge como posible solución a la variabilidad de respuesta del control de planta observada en los trabajos previos. Por su parte, la detección de anomalías es una herramienta muy útil hoy en día para la detección de fallos en el funcionamiento de una planta industrial, pero no había sido implementada en la Planta de laboratorio de Controles Varios, por lo que este desarrollo no reutiliza ningún esquema previo existente en el programa del autómeta.

4 Normas y referencias

4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

4.2. Bibliografía

- [1] Åström, K. J., Hagglund, T., (1984), *Automatic Tuning of Simple Regulators*, Volume 17, IFAC Proceedings Volumes, ELSEVIER.
- [2] López Varela, A., (2014), *Puesta en marcha y programación de control PID simple y adaptativo sobre la Planta de Laboratorio de Controles Varios*, UDC.
- [3] Pérez Bascompte, O., (2015), *Puesta en marcha y programación de control PID del lazo de regulación de caudal sobre la planta de laboratorio de Controles Varios*, UDC.
- [4] Chandola, V., Banerjee, A., Kumar, V., (2009), *Anomaly Detection : A Survey*, ACM Computing Surveys.

4.3. Programas de cálculo

- Unity Pro XL.
- Vijeo Citect 7.2.
- Matlab 2013.b.
- Microsoft Excel 2013.

4.4. Otras referencias

Se utiliza el sistema \LaTeX como procesador de textos. \LaTeX es un sistema de composición de textos muy extendido en el ámbito científico.

Para elaborar el documento \LaTeX , se utilizaron los siguientes programas:

- *Miktex* (compilador).
- *TexnicCenter* (editor).
- *Gsview* (intérprete de documentos .ps).

- *Ghostscript*.
- *Adobe Reader* (visualizador de documentos .pdf).

5 Definiciones y abreviaturas

- PID: Modelo de control basado en la suma de una acción proporcional, una integral y una derivativa *Proportional Integral Derivative*
- Kp: Constante proporcional del PID.
- Ti: Tiempo integral del PID.
- Td: Tiempo derivativo del PID.
- Tc: Tiempo de control o de muestreo.
- PV: Variable de proceso a controlar *Process Value*.
- SP: Consigna *Set Point*.
- NA: Contacto normalmente abierto.
- NC: Contacto normalmente cerrado.

6 Requisitos de diseño

Mediante la programación desarrollada en el presente proyecto, el autómata de control deberá ser capaz de controlar el nivel de líquido del depósito de control de forma autónoma. El control mediante Gain-Scheduling permitirá modificar los parámetros del PID de forma automática para adecuarlos a la región de funcionamiento y para trabajar siempre con los parámetros optimizados.

El programa de autómata contará además con un sistema de detección de anomalías *on-line*, de forma que tras una adquisición de datos durante el funcionamiento de la planta en condiciones normales (sin perturbaciones), el programa podrá detectar y alertar al operario que se ha detectado una anomalía. Un sistema de visualización en ordenador permitirá graficar los estados de funcionamiento correcto y los estados con anomalías.

En cuanto a la programación del autómata, en rasgos generales, ha de ser robusta, en tanto a que se comporte de forma determinista ante fallo, fiable, en tanto a que responda siempre de la misma forma, y efectiva, en cuanto a que cumpla su objetivo.

El programa de monitorización y control será utilizado por usuarios no familiarizados con los conceptos que aquí se tratan, por lo que ha de ser simple, directo e intuitivo. La función principal del mismo será de monitorización, aunque también se permitirá gestionar características básicas del control y/o actuación.

7 Análisis de las soluciones

7.1. Descripción de la planta

La planta sobre la que se realiza el proyecto se encuentra en el Laboratorio de Optimización y Control, y está controlada por un autómata que monitoriza los valores de sensores y controla la acción sobre actuadores, tales como bombas o un calentador. La planta se denomina *Planta de Laboratorio de controles varios 7.1.0.1*, ya que sobre ella es posible implantar lazos de control de nivel, caudal, presión o temperatura.



Figura 7.1.0.1 – Planta de laboratorio de controles varios

Se considera el control de nivel como el lazo de control más conveniente e intuitivo para la implementación y prueba de los métodos de control y detección de anomalías que se

introducirán más adelante, debido por una parte, a que su tiempo de respuesta es suficientemente largo como para observar a simple vista los transitorios (los lazos de control de caudal o presión son más rápidos) y suficientemente corto como para recorrer todo el rango de funcionamiento en menos de un minuto (no ocurre con temperatura). Del mismo modo, también es interesante este lazo debido a las diferentes perturbaciones que se pueden introducir en el control mediante la activación de diferentes actuadores (válvulas de entrada y salida del tanque).

A continuación se describen los equipos e instrumentos que conforman la planta, realizando especial hincapié en los elementos principales que afectan al control de nivel.

7.1.1. Estructura y tuberías

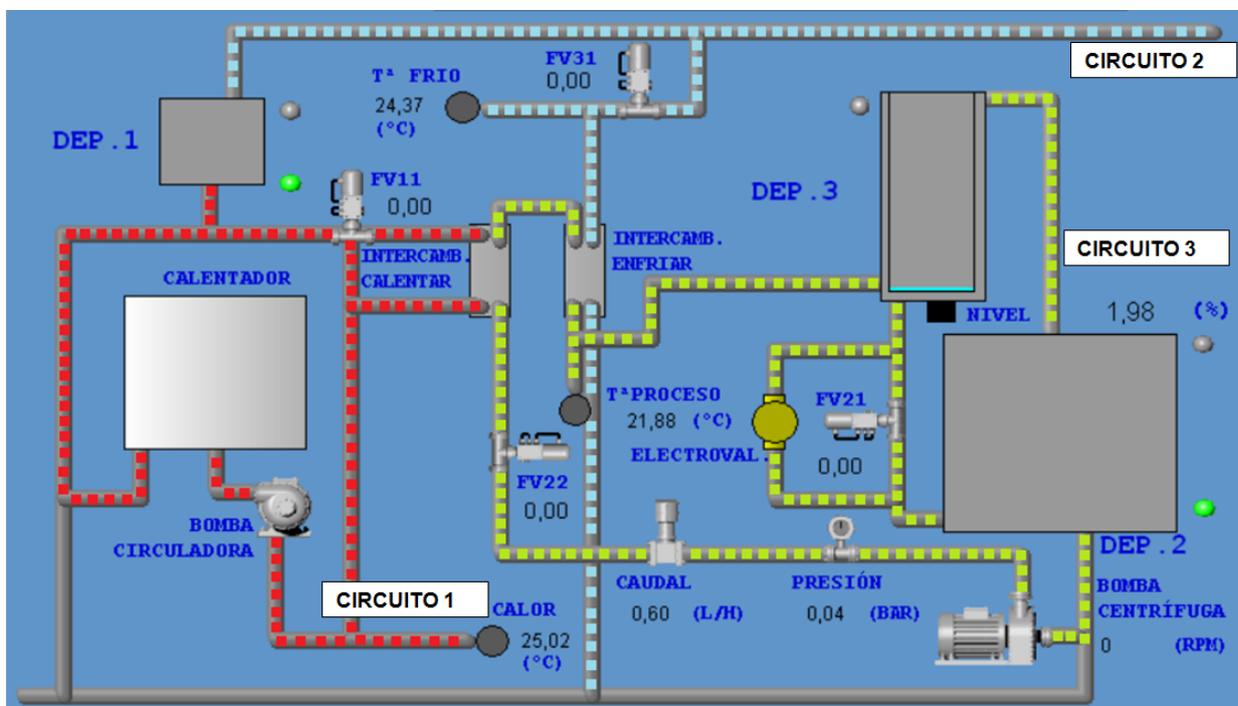


Figura 7.1.1.1 – Esquema de la planta

- **Placa estructural:** Consiste en una plancha de acero sobre un soporte con ruedas sobre la que se disponen el resto de elementos.
- **Depósitos:** Existen tres depósitos en la planta: uno para expansión del calentador (depósito 1), otro de almacén de agua de proceso (depósito 2) y uno de proceso en el que se realiza el control de nivel (depósito 3).
- **Tuberías:** se dividen en un circuito de agua caliente (circuito 1), otro de agua fría (circuito 2) y otro de proceso (circuito 3). Los circuitos no se conectan entre sí, de forma que no hay transferencia de agua de uno a otro.

- **Intercambiadores de calor:** Éstos permiten el intercambio de energía entre los circuitos 1 y 3, y 2 y 3, lo que afecta principalmente al control de temperatura, y no al presente.

7.1.2. Sensores

- **Detectores de nivel:** 7.1.2.1 Son sensores todo-nada normalmente abiertos, y se sitúan en los tanques para evitar desbordamientos y problemas de desabastecimiento.



Figura 7.1.2.1 – Detector de nivel

- **Sensor de temperatura:** 7.1.2.2 Consiste en una PT100 con un circuito de acondicionamiento que linealiza su medida. El sensor está encapsulado y se encuentra en tramos de tubería rectos sin circulación de líquido para no afectar a la medida.



Figura 7.1.2.2 – Sensor de temperatura

- **Sensor de presión:** 7.1.2.3 Consiste en un sensor cerámico acondicionado que mide la presión a la salida de la bomba centrífuga.



Figura 7.1.2.3 – Sensor de presión

- **Sensor de nivel:** Éste es uno de los elementos centrales de control. El sensor 7.1.2.4 mide presión, de forma que al estar situado en la parte inferior del depósito 3 permite medir los metros de columna de agua (m.c.a.), y conociendo la densidad del líquido,

es posible establecer el nivel del depósito. Como se puede deducir, un cambio en el líquido de proceso provocaría un fallo en la medición de nivel, por lo que sería necesario realizar una recalibración. El sensor está compuesto por un sensor cerámico capacitivo que permite la medición de nivel continuo en tanques abiertos y un transmisor de nivel con membrana para montaje exterior tipo TNE-16 de Design Instruments. La señal de salida es de 4-20 mA. Requiere una tensión de alimentación entre 13 y 36 Vcc y presenta un rango de 0 a 200 mca.



Figura 7.1.2.4 – Sensor de nivel

- **Caudalímetro:** 7.1.2.5 Se sitúa a la salida de la bomba centrífuga, y su medida se basa en la inducción electromagnética, por lo que sólo es válido para líquido que sean conductores eléctricos. El caudalímetro es de menor dimensión que las tuberías sobre las que se montan, por lo que se bifurca la tubería de salida de la bomba en 2 tuberías iguales de menor sección. El instrumento se monta en una de ellas y mide la mitad de la medida real.



Figura 7.1.2.5 – Caudalímetro

7.1.3. Actuadores

- **Bomba centrífuga:** 7.1.3.1 La bomba centrífuga utilizada es el modelo K 8-T de Bombas Saci. Mediante una turbina, impulsa el agua a través de todo el circuito de proceso hasta el depósito de control de nivel. Su rango de temperatura de funcionamiento es de -10 a 50°C, restricciones a considerar en el control de temperatura. La bomba se mueve gracias a un motor acoplado a ella y controlado mediante un variador de frecuencia que regula la velocidad de la bomba. La presión máxima de trabajo es de 6Kg=cm².

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 7.1.3.1 – Características de la electroválvula



Figura 7.1.3.1 – Bomba centrífuga

- Bomba circuladora:** 7.1.3.2 La bomba es la encargada de circular el agua al calentador, forzando el movimiento del agua en el interior del calentador para homogeneizar la temperatura del líquido. Además, esta bomba también es necesaria para recircular el líquido por un intercambiador de calor.

La bomba cuenta con 3 velocidades, configurables manualmente con la bomba parada.



Figura 7.1.3.2 – Bomba de circulación Saci VA 35/130

- Electroválvula:** La electroválvula que inicialmente tiene la maqueta es de la serie 86 de Ceme. Se trata de una electroválvula de 2/2 vías NC, que exige una presión mínima para su activación de 0.3 bares, o lo que es lo mismo, 3 metros de columna de agua.
- 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). Existen 2 válvulas que son claves en el control de nivel, que son la válvula de

salida del depósito de control de nivel (FV21) y la válvula de entrada al depósito (FV22)

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

Tabla 7.1.3.2 – 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.

- **Calentador:** Es un termo eléctrico que permite calentar el agua del circuito de agua caliente a una velocidad de hasta 50°C/hora, pudiendo modificarse la consigna del depósito de forma manual. El calentador se actúa hasta que consigue la temperatura deseada. Su funcionamiento se indica mediante un LED.

7.1.4. Panel de mando

El panel de mando 7.1.4.1 se sitúa en la parte posterior de la planta, y permite realizar determinadas acciones de arranque de la planta de forma manual.



Figura 7.1.4.1 – Panel de mando

- **Selector de encendido:** Controla la alimentación de red a la planta. El selector tiene dos posiciones, ON y OFF, y cuenta con un indicador lumínico activo en ON.
- **Selector de 3 posiciones:** Está identificado como «CALENTADOR», y permite activar el calentador de forma manual («MAN»), mediante el autómata («AUTO») o inhabilitarlo («OFF»). Cuenta con un indicador lumínico activo en «AUTO».
- **Selector de 2 posiciones:** Está identificado como «CIRCULADORA», y 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 autómata.
- **Pulsadores:** Controlan la activación y parada de la bomba circuladora con el selector en «MAN».
- **Pilotos:** Existen tres indicadores de color rojo en la parte inferior del panel que informan del accionamiento de una de las protecciones eléctricas de la planta (para el calentador, la bomba circuladora y la bomba centrífuga).
- **Seta de emergencia:** Está situada en el lateral izquierdo del Cuadro de Control y Distribución. Las acciones de seguridad relacionadas con la activación de la seta se gestionan en el autómata. La seta se desenclava 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 autómata TSX Premium de Telemecanique. Los procesadores Premium TSX P57 gestionan toda una estación del autómata formada por módulos de E/S y módulos con funciones específicas

CPU: El procesador instalado es el TSX P57 104M.



Figura 7.1.5.1 – Procesador TSX P57 104M

El procesador dispone de una tarjeta PCMCIA de ampliación de memoria (TSXMFPP224K).

Módulo de comunicación: La CPU no cuenta con puerto Ethernet, por lo que es necesario un módulo acoplador Ethernet TCP/IP de referencia TSX ETY 5103 (10/100 Mbit/s) y clase Transparent Ready C30.



Figura 7.1.5.2 – Módulo TSX ETY 5103

Entre otras funciones, este módulo permite la implantación de un sistema SCADA al permitir diversas formas de comunicación entre PLC y PC.

La comunicación del PLC con los sensores y actuadores de la planta se realiza a través de diversos módulos módulos:

Entradas digitales: 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

Salidas digitales: Consiste en 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

Entradas analógicas: Se utiliza un módulo TSXAEY810, que permite 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 varias gamas de medida, aunque en la planta se utiliza la transmisión a 4..20 mA.



Figura 7.1.5.5 – Módulo TSXAEY810

Salidas analógicas: Se utiliza un módulo del tipo TSXASY800, con ocho salidas analógicas no aisladas que ofrece, al igual que el módulo anterior, varias gamas de transmisión para la entrada.



Figura 7.1.5.6 – Módulo TSXASY800

- Relés:** Se utilizan para escalar niveles de potencia entre las salidas del PLC y las entradas de los actuadores. Los utilizados son relés de propósito general, de 2 polos, enchufables y con indicador LED 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.
- Contactores:** En la planta hay instalados cuatro contactores, con los que se gobierna el automático, 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 salida auxiliar para confirmación de contacto.

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

Figura 7.1.5.7 – Características de los contactores

- Térmicos:** Se utilizan para prevenir daños en la instalación, y más concretamente, en la bomba circuladora, el calentador y la bomba centrífuga. Sólo son rearmables manualmente, pero disponen de una conexión con el automático que permite saber si están actuados o no.

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 7.1.5.8 – Características de los relés

- Variador de frecuencia:** 7.1.5.9 Este es el elemento de control más relevante para el presente proyecto., Éste permite regular la potencia entregada al motor acoplado a la bomba circuladora, y de este modo permite controlar la velocidad de giro de la bomba y el caudal bombeado. 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. La configuración se puede realizar a través de una pequeña pantalla con botones del propio aparato.



Figura 7.1.5.9 – 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.	línea	Corriente nominal	Corriente transitoria máx. durante 60s.	Potencia disipada con carga nominal	Referencia	Peso
	en	en								
	U ₁	U ₂					4kHz			
kW	HP	A	A	KVA	KA	A	A	W		Kg
1,1	1,5	12,1	10,2	2,4	1	6,9	10,4	74	ATV31HU11M2A	1,800

Figura 7.1.5.10 – Características del variador ATV 31HU11M2A de Telemecanique

- **Base de simulación** La base de simulación Telefast ABE7-TES160 permite simular entradas y salidas digitales, tanto a nivel de PLC como a nivel de autómeta. En el presente proyecto las variables fundamentales son analógicas, por lo que no será de utilidad.
- **Base Telefast ABE-7CPA31** La base ABE-7CPA31 se utiliza para aislar la alimentación de los captadores 4..20 mA.

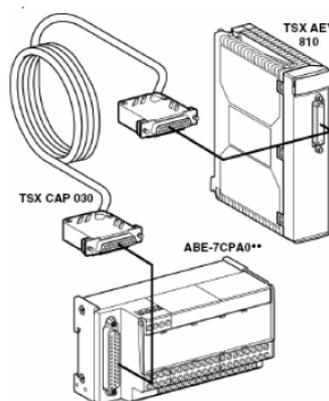


Figura 7.1.5.11 – Base Telefast ABE-7CPA31

- **Base Telefast ABE-7CPA02** Es una base TELEFAST 2 ABE-7CPA02 para conectar en el bloque de terminales salidas de corriente y de tensión.

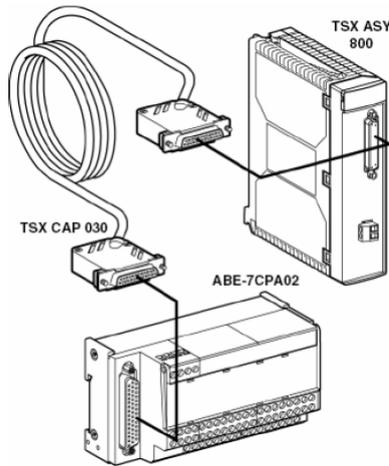


Figura 7.1.5.12 – Base Telefast ABE-7CPA02

- Fuentes de alimentación:** Estas fuentes de los modelos ABL 7CEM y ABL 7RE de Telemecanique, aportan la alimentación en continua necesaria en la instalación. Estas fuentes de alimentación están equipadas con una protección electrónica. 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:** 7.1.5.2 Interrumpe automáticamente un circuito en caso de defecto de aislamiento entre conductores activos y tierra. El interruptor utilizado es de 30 mA, con un calibre de 25 A.

Nº 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:** 7.1.5.3 Son dispositivos de mando y protección contra las sobrecargas y cortocircuitos. Los interruptores utilizados son de 10 A.

Nº 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

7.2. Control

7.2.1. PID

Los controladores que siguen un modelo PID son los más ampliamente utilizados en la industria actual, dentro de sus múltiples variantes. Para un modelo continuo SISO (una entrada y una salida), se puede representar un control PID según el esquema de la figura 7.2.1.1:

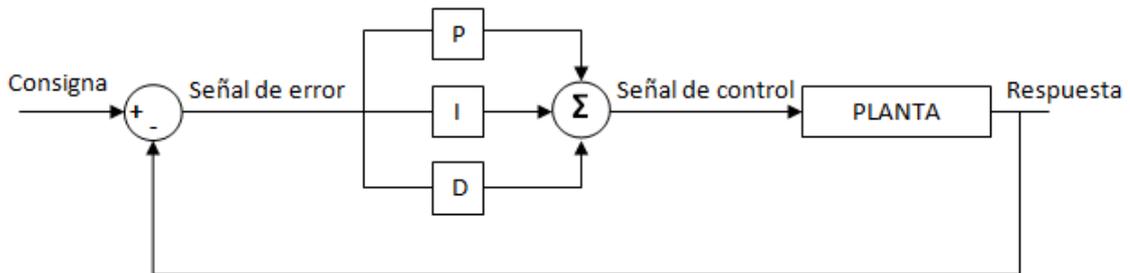


Figura 7.2.1.1 – Controlador PID

Los controladores PID se basan en la suma de tres acciones:

- **Acción proporcional (P):** es la responsable de reducir el error en régimen permanente (aunque no eliminarlo). También influye directamente en el tiempo de respuesta.
- **Acción integral (I):** elimina el error en régimen permanente, pero aumenta la sobreoscilación.
- **Acción derivativa (D):** permite mejorar el régimen transitorio, reduciendo la sobreoscilación.

La fórmula general de este regulador en el dominio del tiempo y para sistemas continuos se puede simplificar dando lugar al siguiente regulador:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) = ke(t) + k_i \int_0^{\infty} e(t)dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) = \quad (7.2.1.1)$$

$$= K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^{\infty} e(t)dt + T_d \frac{d}{dt} e(t)] \quad (7.2.1.2)$$

La ecuación anterior representaría un sistema continuo, pero en los sistemas de autómatas, así como en la mayoría de sistemas de control de la industria actual, se aplica el control discreto. Existen dos modelos que representan un modelo PID discreto, que son el PID con la formulación «posicional» y la «de velocidad o incremental». En la planta ya está programado un controlador PID discreto con formulación posicional, con la ecuación 7.2.1.3.

$$u(t) = K_P[e(t) + \frac{T_c}{T_i} \sum e(i) + \frac{T_d}{T_c}[e(t) - e(t-1)]] + u(t-1) \quad (7.2.1.3)$$

Sin embargo, esta formulación de PID se modifica para mejorar su desempeño y ajustarla a las características de la planta.

Antes de la descripción del PID implementado, es necesario destacar que para un buen funcionamiento del control discreto, el tiempo de muestreo debe ser estable y al menos dos veces menor que el periodo natural del sistema (*Criterio de Nyquist*). Este criterio se cumple holgadamente, ya que el intervalo de tiempo para el control de nivel es de 100 milisegundos, muy inferior al período natural del sistema, que es de varios segundos.

7.2.1.1. Modelo PID

El modelo PID programado en la planta se ha diseñado empleando la discretización de Tustin. Para simplificar las expresiones, se añaden unos nuevos términos de acumulación i y d , así como unas nuevas constantes derivadas de las ya conocidas proporcional, integral y derivativa:

$$e[k] = sp[k] - y[k] \quad (7.2.1.4)$$

$$i[k] = C_1(e[k] + e[k - 1]) + i[k - 1] \quad (7.2.1.5)$$

$$d[k] = C_2(e[k] + e[k - 1]) + C_3d[k - 1] \quad (7.2.1.6)$$

$$u[k] = K_P(e[k] + i[k] + d[k]) \quad (7.2.1.7)$$

$$(7.2.1.8)$$

Siendo:

- y : variable de proceso medida.
- sp : consigna o *set point*.
- e : error.
- i : término integral acumulado.
- d : término derivativo acumulado.
- u : variable de control.
- K_P : constante proporcional.
- C_1, C_2, C_3 : constantes derivadas, calculadas como:

$$C_1 = \frac{T_c}{2T_i} \quad (7.2.1.9)$$

$$C_2 = \frac{2T_d}{2T_d/N + T_c} \quad (7.2.1.10)$$

$$C_3 = \frac{2T_d/N - T_c}{2T_d/N + T_c} \quad (7.2.1.11)$$

$$(7.2.1.12)$$

- T_i : constante integral.

- T_d : constante derivativa.
- T_c : período de muestreo.
- N : constante de limitación de acción derivativa.

7.2.1.2. Filtro derivativo

En las expresiones 7.2.1.9 se puede ver la presencia de un término N , que se corresponde con un filtro paso bajo o una limitación a la acción derivativa en cada paso de tiempo. Esta nueva funcionalidad se introduce por dos motivos: por un lado, se desea que la variación de consigna de la bomba sea lenta, es decir, que no se produzcan saltos rápidos o oscilaciones bruscas, para sí mejorar la vida útil de la misma; por otro lado, la interfaz de usuario está diseñada para que cualquier alumno pueda aprender sobre sintonización de lazos PID, y pueda introducir constantes de forma manual, y una constante derivativa muy alta podría hacer inestable el control e incluso dañar la bomba.

$$\lim_{T_d \rightarrow \infty} C_2 = \lim_{T_d \rightarrow \infty} \frac{2T_d}{2T_d/N + T_c} = N \quad (7.2.1.13)$$

$$\lim_{T_d \rightarrow \infty} C_3 = \lim_{T_d \rightarrow \infty} \frac{2T_d/N - T_c}{2T_d/N + T_c} = 1 \quad (7.2.1.14)$$

7.2.1.3. Anti-windup

En algunos casos, es posible que la señal calculada por el regulador como consigna al actuador de control sea superior a la consigna máxima. En estos casos, el error acumulado en el término integral sigue subiendo, pero no contribuye a una modificación de la consigna del actuador.

De este modo, se está produciendo una saturación de la acción integral del controlador, lo que provoca que cuando la consigna del actuador debiera bajar, seguiría en el valor máximo durante más tiempo debido a la acción integral acumulada, con los correspondientes efectos negativos sobre el control (sobreoscilaciones, inestabilidades, etc.).

Para evitar esto, se programa un anti-windup, que consiste en establecer un límite a la acción integral. En el presente proyecto, dicho límite no se condiciona a la saturación de la salida, sino a un valor máximo del término i calculado en la ecuación 7.2.1.4.

7.2.2. Gain Scheduling

En la industria existen multitud de sistemas que no están funcionando de forma óptima debido a que sus parámetros no están optimizados para todas las regiones de trabajo. Una de las soluciones son los controladores mediante Gain Scheduling, que permiten ajustar automáticamente los parámetros de control en función de las condiciones de operación y de los parámetros de la planta. Los sistemas Gain Scheduling son muy utilizados en aplicaciones con una dinámica muy variable o para sistemas no lineales. En particular, este tipo de control es muy utilizado en sistemas de control de vuelo, en los que en función de la altura de vuelo se establecen unos parámetros precalculados para los controladores.

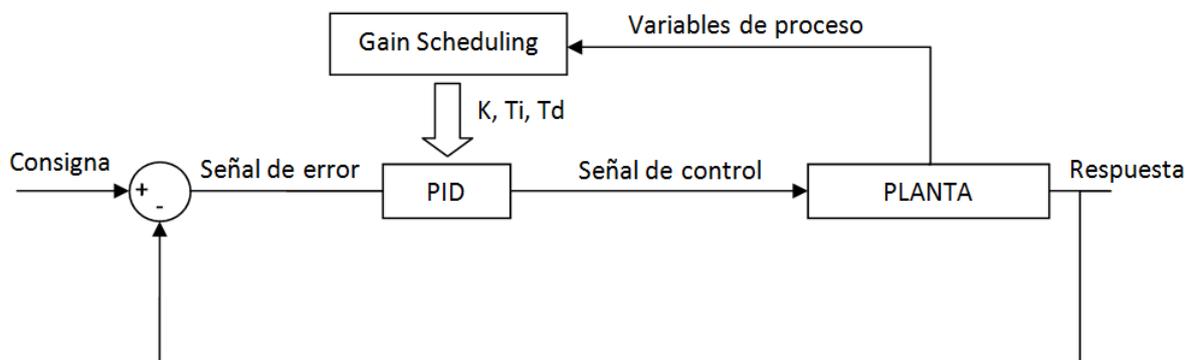


Figura 7.2.2.1 – PID con Gain Scheduling

Una de las ventajas de este controlador con respecto a controladores adaptativos es su rapidez en la actualización de parámetros. Mientras un controlador adaptativo debe aprender y adecuarse a cada cambio, un control mediante Gain Scheduling ya tiene los parámetros óptimos calculados en el instante en que la dinámica del sistema cambia.

Por otro lado, la principal desventaja de este tipo de control frente al adaptativo es que el sistema sólo se adapta a cambios conocidos y calculados previamente, mientras que el control adaptativo puede funcionar y adaptarse a cualquier tipo de perturbación en el control o cambio en las condiciones de funcionamiento.

Por ello, es muy útil la implementación del control de anomalías en unión con el presente sistema de control, de modo que ante cambios en el régimen de funcionamiento conocidos y precalculados el sistema actualiza sus parámetros de control, y ante cambios no contemplados tendremos un aviso ante una anomalía en el control. De esta forma se garantiza un control seguro.

La técnica de Gain Scheduling se puede aplicar a variedad de controladores, pero en el presente proyecto se aplicará al modelo de PID 7.2.1.4, de forma que en función de las condiciones de la planta, se modifican los parámetros K , T_i y T_d , como se puede ver en la figura 7.2.2.1. Para ello con anterioridad debe haber un estudio previo de la planta para establecer regiones de funcionamiento y los parámetros óptimos en cada caso.

Para el lazo de control de nivel se proponen 30 regiones, si bien en el presente proyecto sólo se mostrarán resultados para unas pocas, debido al número de gráficas resultantes, y a que los resultados de una región se pueden extrapolar a los de otra. En el control de nivel, tenemos 4 actuadores que tienen un impacto directo en el nivel medido:

- **Variador de frecuencia:** es el actuador de control, así que no es adecuado utilizarlo para establecer la zona de funcionamiento.
- **Válvula FV22:** es la válvula de salida de de agua de la bomba y de entrada de agua al depósito de control de nivel. Esta válvula implica aumentos de presión a la salida de la bomba, por lo que sólo se utilizará para introducir perturbaciones para la detección de anomalías.
- **Válvula FV21:** válvula de descarga del tanque de control de nivel. En función de su grado de apertura, la respuesta de un controlador PID con parámetros constantes varía significativamente, por lo que se elige la medición de apertura de esta válvula para el establecimiento de las regiones de control.
- **Electroválvula:** es una válvula todo-nada de descarga del tanque de control de nivel, y tiene los mismos efectos que la válvula motorizada FV21, por lo que también se elige para establecer las regiones de control.

Por último, se observa en diferentes pruebas con controladores PID con varios juegos de parámetros, que otro factor determinante para el establecimiento de las regiones de control debe ser la consigna de control. Se elige la consigna y no la medida del nivel para evitar el cambio de región cuando la consigna coincide con el límite de división de dos regiones. De este modo, las 30 regiones se identifican mediante un índice, tal y como se puede observar en la tabla 7.2.2.1.

SP Nivel	EV OFF			EV ON		
	Apertura de FV21			Apertura de FV21		
	0-33,3	33,3-66,6	66,6-100	0-33,3	33,3-66,6	66,6-100
0-20	1	6	11	16	21	26
20-40	2	7	12	17	22	27
40-60	3	8	13	18	23	28
60-80	4	9	14	19	24	29
80-90	5	10	15	20	25	30

Tabla 7.2.2.1 – Índices de regiones de control para Gain Scheduling

7.3. Detección de anomalías

La detección de anomalías se refiere al problema de encontrar patrones en datos que no se corresponden con el comportamiento esperado. Es ampliamente utilizado en múltiples campos, tales como el económico, militar o el sanitario, de forma que al detectar una anomalía se pueden aplicar los procedimientos adecuados para gestionarla.

En la figura 7.3.0.2 se puede observar una separación entre los datos en las regiones N_1 y N_2 , que se corresponden con datos normales, y los datos O_1 y O_2 , que son anomalías. Sin embargo, no siempre esta división es tan clara. Además, los datos normales suelen contener ruido, lo que provoca más dificultades en la detección. El problema radica, por lo tanto, en establecer un método de separación de los datos considerados como anomalías de los considerados como normales. Para ello existen múltiples algoritmos que mediante un aprendizaje son capaces de clasificar los datos.

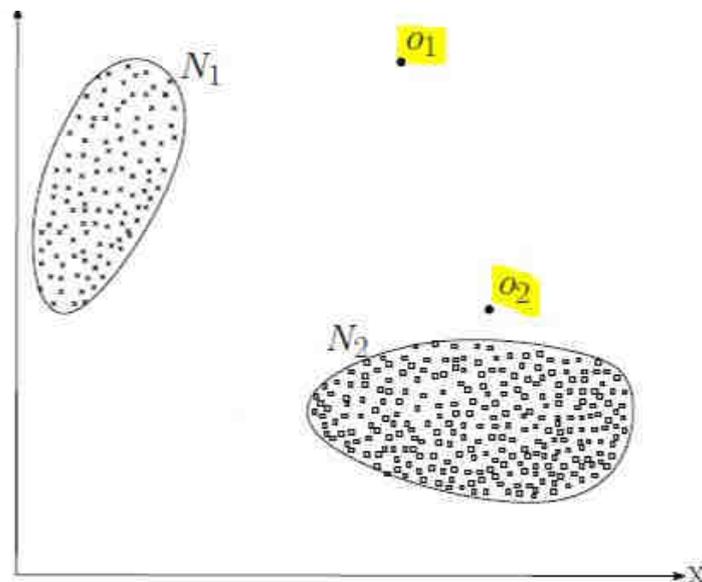


Figura 7.3.0.2 – Ejemplo de anomalías en 2 dimensiones.

Una primera clasificación de las técnicas de detección de anomalías podría ser la referente a las técnicas que son capaces de manejar múltiples clases o las que manejan una única clase como clase de funcionamiento normal. Por ejemplo, la clasificación realizada en la figura 7.3.0.2 hace referencia a un sistema multiclase, porque existen 2 regiones diferenciadas consideradas como normales (N_1 y N_2). En caso de que fuese de una clase, sólo la región N_1 sería considerada normal y las regiones N_2 , O_1 y O_2 serían anomalías. La principal diferencia es que los algoritmos multiclase suelen ser más complejos.

Para el presente trabajo, se plantea un algoritmo de clase única, en el que se tratará de generar una región de funcionamiento normal que abarque todos los posibles estados normales de la planta.

Las principales técnicas utilizadas hoy en día para la detección de anomalías son:

- **Redes neuronales.** Las técnicas de detección mediante redes neuronales utilizan un modelo computacional basado en una estructura interconectada de unidades elementales o neuronas artificiales que es capaz de realizar un aprendizaje automático por ellas mismas. Estas técnicas son muy útiles para aquellos problemas difíciles de resolver o representar mediante programación convencional.
- **Redes bayesianas.** Una red bayesiana es un modelo de probabilidad, y en este caso se utiliza para estimar la probabilidad de observar una anomalía a partir de unos datos de aprendizaje. Estas técnicas han sido implementadas en sistemas de detección de anomalías aplicados a intrusión o a análisis de datos de texto.
- **SVM o Máquinas de Vectores de Soporte.** Consisten en un conjunto de modelos de aprendizaje supervisado desarrollados por Vladimir Vapnik ampliamente utilizados para clasificación de datos. Estos algoritmos permiten predecir la clase de una nueva muestra en función de un modelo creado a partir de unos datos de entrenamiento iniciales.
- **Basado en reglas.** Este tipo de métodos utilizan algoritmos de aprendizaje de reglas a partir de unos datos de aprendizaje. En la fase de prueba con datos reales, si alguno de los nuevos datos no cumple las reglas aprendidas, se considera una anomalía.
- **Técnicas de vecino más próximo o *Nearest neighbor*.** Son un conjunto de técnicas que utilizan la distancia de un dato a su dato vecino más próximo para la detección de anomalías. Básicamente, la discriminación de datos se consigue evaluando su grado de agrupamiento. Esta técnica deja de ser válida para anomalías persistentes con un grado de agrupación igual a los datos normales.
- **Técnicas de agrupamiento o *Clustering*.** Estas técnicas utilizan algoritmos de clasificación en grupos, de tal forma que los datos normales pertenecerán al cluster o grupo mientras que las anomalías no entrarán dentro del mismo. Esta técnica es muy similar a la presentada en el punto anterior, pero su principal diferencia es que en esta técnica cada nuevo dato se computa con respecto a las características del grupo, mientras que en la de vecino más próximo se computa con respecto a sus vecinos locales.
- **Técnicas estadísticas.** Las técnicas estadísticas generan un modelo estadístico, generalmente del funcionamiento normal del sistema, y luego aplica un análisis estadístico para comprobar si un dato pertenece al modelo o no. Aquellos valores que tienen una baja probabilidad de pertenecer al modelo se consideran anomalías.
- **Técnicas teóricas de información.** Estas técnicas evalúan el contenido de los datos, basándose en la premisa de que las anomalías inducen irregularidades en el contenido de los datos.
- **Técnicas espectrales.** Estas técnicas consisten en trasladar los datos a un subespacio de menor dimensión en el que las anomalías pueden ser identificadas de forma simple.

7.3.1. Detección de anomalías en el control del nivel

En la aplicación de detección de anomalías para el control de nivel, se proponen 2 técnicas de detección, ambas con una misma estructura de fases de aprendizaje y detección.

Por un lado, gracias a la identificación de la planta mediante mínimos cuadrados realizada en [2], es muy sencillo obtener un nivel esperado gracias a la función de la planta y los valores del nivel y de la salida anterior. De este modo, una primera detección de anomalías se corresponde con la evaluación del nivel esperado y el nivel efectivo. Si esta diferencia supera un determinado margen, se considera que existe una anomalía.

En el proyecto [2] se realizaron 2 identificaciones de planta, pero se decide utilizar la de 2 polos por ser la que se aproxima mejor a la real y ofrece mejores resultados. La función de transferencia discreta obtenida es la siguiente:

$$G(z) = \frac{b_1}{z^2 + a_1z + a_2} \quad (7.3.1.1)$$

Para la identificación, se utilizan los valores de nivel en los instantes $t-1$ y $t-2$ y el valor de la consigna de la bomba en $t-1$. De este modo, la salida estimada utilizada será la expresada en la ecuación 7.3.1.2. El desarrollo de estos cálculos se incluye en el apartado de anexos.

$$y_{estimada}(t) = b_1u_{t-1} - a_1y_{t-1} - a_2y_{t-2} \quad (7.3.1.2)$$

siendo u la consigna de la bomba e y el nivel medido.

La segunda de las técnicas propuestas también contiene una identificación de la planta, pero involucra un análisis estadístico:

1. Se realiza la identificación de la planta durante el funcionamiento del control mediante Gain Scheduling.
2. Se obtienen para cada instante de tiempo los valores de la función identificada a_1 , a_2 y b_1 .
3. Se calcula la covarianza y la media de la función de transferencia para todos los datos de aprendizaje.
4. En la fase de prueba o detección, se mantiene la identificación de la planta, y se calcula la distancia estadística de cada nuevo dato con respecto a la muestra anterior. El cálculo se realiza mediante la media y la covarianza, y la distancia calculada es la llamada «distancia de Mahalanobis», que incluye en su cálculo la media y la covarianza, por lo que da una buena medida de la dispersión y correlación de los datos.

Se plantea este segundo método por 2 razones: la primera, como ejemplo de implementación y prueba de un modelo estadístico con una fase de aprendizaje para la detección de anomalías; y por otro lado, para tener un sistema más preciso que permita obtener anomalías con menor margen de error, ya que en anteriores proyectos se ha comprobado que la identificación de

la planta tiene variaciones significativas entre instantes próximos en el tiempo con la planta estable.

La distancia de Mahalanobis se puede calcular como se indica en la ecuación 7.3.1.3, donde x es el vector de datos, μ la media y σ^{-1} la inversa de la covarianza.

$$d_M = \sqrt{(\mathbf{x} - \mu)^T \sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mu)} \quad (7.3.1.3)$$

De este modo, se considerarán como anomalías en el proceso de detección todos aquellos datos cuya distancia de Mahalanobis sea superior a un valor constante calculado experimentalmente. Esta distancia genera una superficie de separación de los datos en 3 dimensiones, que se puede expresar mediante la ecuación 7.3.1.4.

$$c^2 = (\mathbf{x} - \mu)^T \sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mu) \quad (7.3.1.4)$$

8 Resultados finales

A continuación se describirán los resultados finales obtenidos del presente proyecto, detallando la programación realizada así como su cometido.

8.1. Test inicial de funcionamiento de equipos

En primer lugar, es preciso realizar una inspección detallada de los equipos de planta previa implantación de cualquier control o nueva programación, para detectar cualquier posible daño o problema relacionado con su falta de uso. Recordemos que esta planta de laboratorio sólo se utiliza en determinadas prácticas, y por lo tanto está parada la mayor parte del tiempo.

La inspección inicial consiste en una primera revisión visual de los equipos, incluyendo cableados y estado externo con los equipos desconectados de la red. A este respecto se observa que la instalación está en buen estado salvo por una pequeña grieta en el cristal del depósito de suministro de agua de proceso, lo cual no impide el correcto funcionamiento de la instalación.

En un segundo paso, se arranca la planta en modo manual con el programa que tiene instalado el PLC y el SCADA asociado, que se corresponden con la programación llevada a cabo en el trabajo un fin de grado [3]. Desde el SCADA se van activando los equipos de uno en uno dentro de sus márgenes de funcionamiento (en este caso no se realiza inspección de protecciones ni seguridades más allá de sobrellenos). Como resultado, se observan los siguientes desperfectos en instrumentos y actuadores:

- Sensor de temperatura de circuito de agua fría (TT11).
La medida que da es incorrecta (4°C), siendo la medida correcta alrededor de 20°C. Sería preciso desmontarlo, limpiarlo y recalibrarlo, pero este no es el objetivo del presente proyecto ni afecta a las nuevas implementaciones de control.
- Electroválvula
Se observa que la electroválvula situada a la salida del tanque de medición de nivel no se activa correctamente. Si bien la parte eléctrica funciona correctamente, la válvula no llega a abrirse. En este tipo de válvulas, las de membrana, es habitual que ante paradas prolongadas se «agarren» y dejen de funcionar correctamente. Para solventar este problema, sería preciso desmontar la electroválvula y repararla, o bien instalar una nueva, pero para los objetivos del presente proyecto no será preciso, pues existe una

válvula motorizada en paralelo que permitirá modificar el régimen de funcionamiento del control de nivel.

Por último, se prueba el lazo de control de nivel con el PID con parámetros constantes ya programado en en PLC, y se observa un buen desempeño general pero con diferentes características de sobreoscilación y tiempo de estabilización dependiendo del estado de la válvula de descarga y de la consigna de nivel. En la sección *INCLUIRSECCION* se compararán los resultados del control PID mediante Gain Scheduling con un control con parámetros constantes para diferentes regímenes de funcionamiento.

8.2. Control de proceso

8.2.1. Procesos

En el autómata existe una programación tipo GRAFCET basada en la Guía GEMMA. Esta guía enumera los modos y estados posibles en que se puede encontrar una planta y define sus características, así como las posibles acciones de cada etapa.

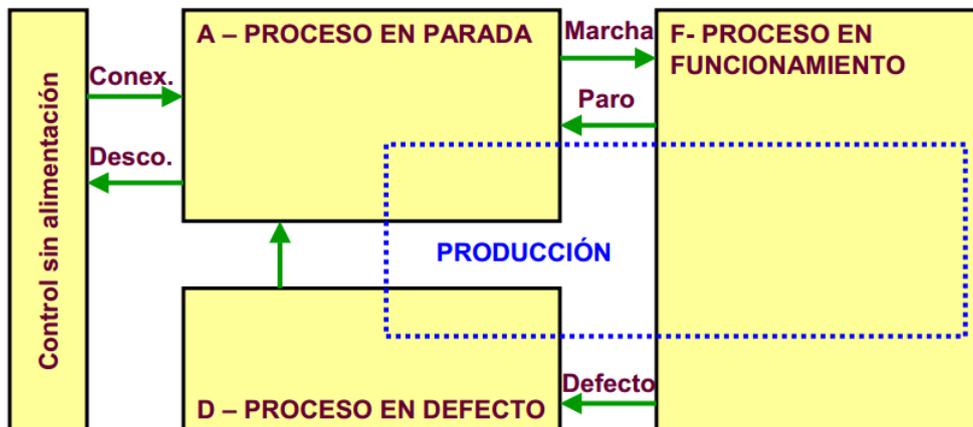


Figura 8.2.1.1 – Guía GEMMA

Las secciones correspondientes a los modos y etapas de la guía GEMMA se programan en el software Unity Pro mediante el lenguaje de programación llamado SFC (*Sequential Function Chart* o Gráfica de Función Secuencial). Las acciones asociadas a las distintas etapas están programadas en otras secciones mediante el lenguaje más apropiado para cada una de ellas.

Según la guía GEMMA, un proceso puede clasificarse en tres grandes categorías: proceso de funcionamiento (todo funciona con normalidad y la planta está activa), proceso de parada (la planta está detenida total o parcialmente) o proceso de fallo (relacionado con la existencia de problemas en el control, comunicación, etc.). Dentro de estos tres grandes bloques, como se puede observar en la figura 8.2.1.2, se engloban una variedad de procesos.

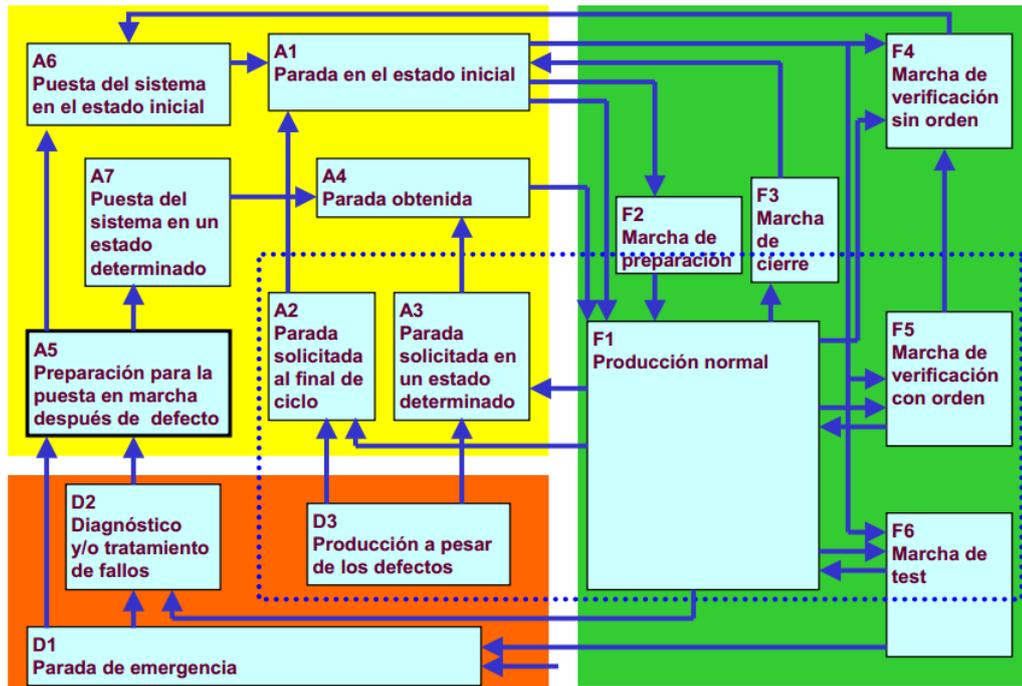


Figura 8.2.1.2 – Procesos de la guía GEMMA

El programa del que se parte se estructura en tres secciones, ordenadas según su prioridad:

- **Seguridad:** Gestiona las situaciones de fallo y el funcionamiento normal.
- **Mando:** Existen dos modos de funcionamiento: manual y automático.
- **Funcionamiento:** En él se establecen los modos de funcionamiento, tales como control de nivel.

En el presente proyecto se generan nuevos modos de funcionamiento, mientras que los modos de seguridad y mando se conservan del proyecto [3].

La sección de programa correspondiente a los modos de funcionamiento se genera completamente de nuevo, para incluir de forma exclusiva los controles incluidos en el presente proyecto. La razón de esta eliminación de funcionalidades anteriormente implementadas es la de simplificar el código, y del mismo modo así no es necesario modificar las implementaciones previas para adecuarlas al nuevo código. En caso de que se desee en un futuro realizar esta ampliación, sería preciso analizar y reescribir varios códigos, ya que, por ejemplo, la implementación del proyecto [3] no contiene varias de las funcionalidades de [2], que es previo.

Los nuevos modos de funcionamiento configurados, que se pueden observar en la figura 8.2.1.3, son:

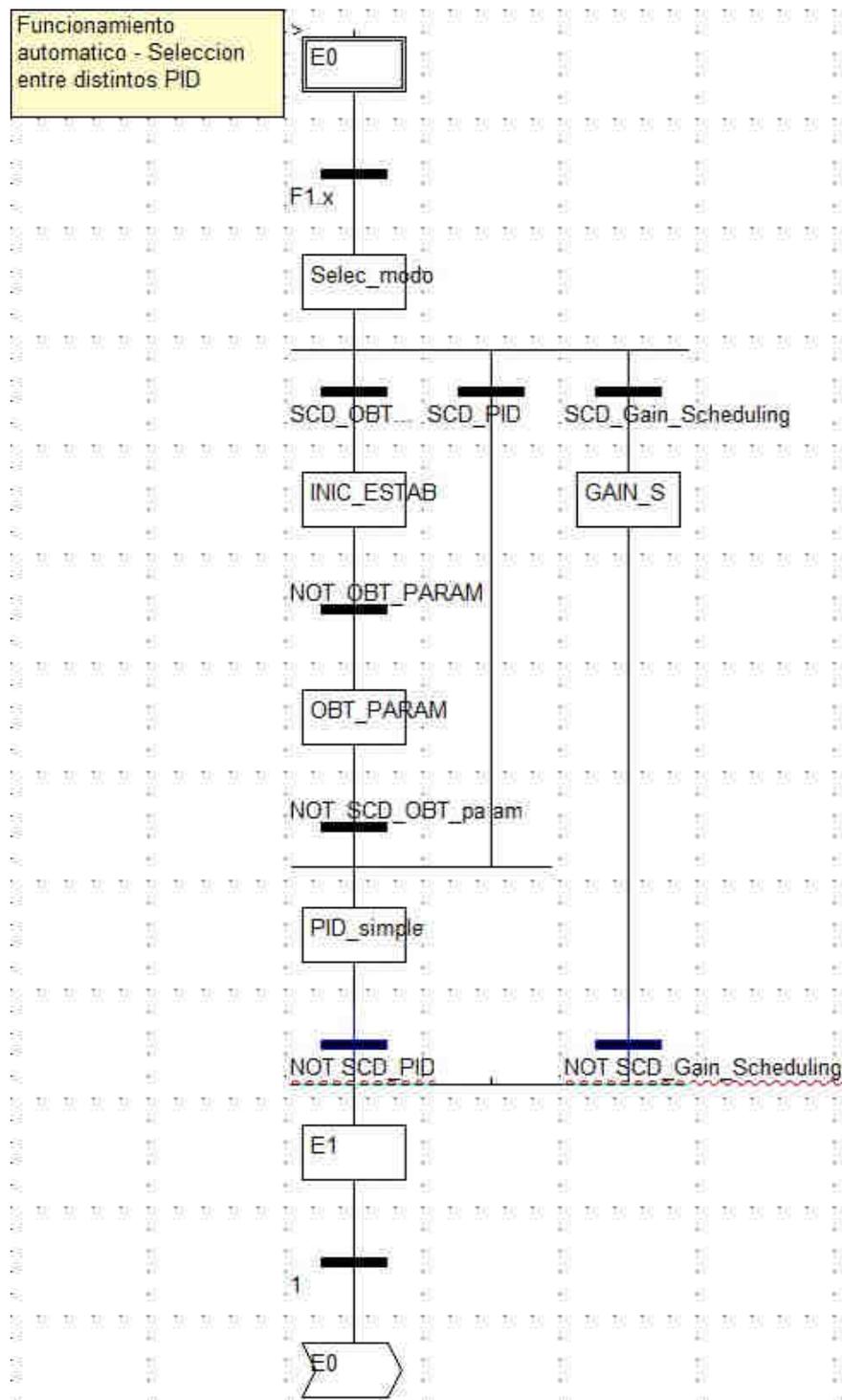


Figura 8.2.1.3 – Modos de funcionamiento

- **E0.** Es el estado 0, el cual se activa por defecto. La única forma de que no se active es que exista alguna seguridad activada.
- **Selec_mod0.** Es el estado en el que el programa evalúa qué opción de funcionamiento se selecciona, y se activa cuando la planta está en estado seguro y en modo automático. Este estado no tiene asociadas acciones de funcionamiento, pero permite modificar la posición de las válvulas motorizadas.

- **Inic_Estab.** Si se selecciona el modo de obtención automática de parámetros para el PID mediante el método de Relay-Feedback, este es el primer estado de la secuencia. Mientras está activo este estado, se activa el control de nivel mediante un PID con unos parámetros prefijados para alcanzar una estabilidad alrededor de una consigna antes de activar el método de relé con histéresis o Relay-Feedback. Este estado finaliza automáticamente transcurridos 60 segundos o si se detiene la obtención de parámetros.
- **Obt_param.** Este es el estado durante el cual se realizan oscilaciones alrededor del nivel de consigna mediante el método de Relay-Feedback, como se comentará en la sección 8.3.1.1. El estado finaliza tras 150 segundos o si se detiene la obtención de parámetros.
- **PID_Simple.** En esta etapa se permite la activación del control de nivel mediante un PID con parámetros estáticos que se pueden modificar manualmente por el usuario. En particular, el cometido de esta etapa es la realización de un ajuste fino de los parámetros, bien sea a partir de los obtenidos del método de Relay-Feedback o bien a partir de una estimación inicial.
- **Gain_S.** Es el estado en que se realiza el control mediante Gain Scheduling. Durante esta etapa también se pueden realizar, si está seleccionada la opción, el aprendizaje para la detección de anomalías y la propia detección. Estas últimas funcionalidades sólo están permitidas en este estado.
- **E1.** Es el estado 1 o estado final, y se activa cuando se detienen los modos PID_Simple o Gain_S.

8.3. Control de nivel

El cometido principal del proyecto es controlar el nivel de líquido del depósito de control utilizando un regulador PID que actualizará sus parámetros en función de las condiciones de la planta (Gain Scheduling), además de detectar anomalías *online* tras una etapa de «aprendizaje» en condiciones normales en varias regiones.

8.3.1. Control PID

En primer lugar es preciso establecer unas condiciones de funcionamiento del control de nivel con las especificaciones de la respuesta deseada. La obtención de parámetros optimizados se realizará cumpliendo las siguientes limitaciones:

- El error en estado estacionario debe ser inferior al 0.1 % del fondo de escala, es decir, 0.1 % del nivel.
- El objetivo es respuestas críticamente amortiguadas, pero se establece un límite a las sobreoscilaciones de un 10 % de la consigna.
- En caso de existir sobreoscilaciones, el factor de amortiguamiento deberá ser igual o inferior a 0,5. Dicho coeficiente se puede calcular como el producto de la amplitud de la primera sobreoscilación (a) menos la consigna, por la amplitud de la segunda sobreoscilación (b) menos la consigna.

$$C_{am} = \frac{b - sp}{a - sp} \quad (8.3.1.1)$$

- Cumpliendo los anteriores condicionantes, se buscarán respuestas rápidas, con un tiempo de establecimiento inferior a 30 segundos, sin contar el tiempo con la bomba saturada a máxima o mínima potencia. Se considera como tiempo de establecimiento el que tarda el nivel en alcanzar la consigna de forma estable, con un margen de $\pm 5\%$ del valor de la consigna.

Durante la etapa de ajuste fino o Inic_Estab, se han llevado a cabo diferentes pruebas con diferentes sets de parámetros y diferentes ajustes de anti-windup y de limitación derivativa, para, por un lado, dar una respuesta óptima en el control de nivel, y por otro lado, para minimizar el estrés de la bomba y tener así consignas de potencia con incrementos suaves y estables.

Finalmente, para el diseño del PID se ha optado por limitar la acción integral con un coeficiente N igual a 3,2 (ver ecuación 7.2.1.9), y aplicar un anti-windup de 10000. Estos valores, fuera de contexto, carecen de significado, pero para el PID implementado, una limitación derivativa con N=3,2 significa que el valor máximo del incremento de la acción derivativa será de $N * K_p$, siendo K_p la constante proporcional; y un anti-windup de 10000, para el sistema de control presente, implica que se permite una acumulación de integral hasta el valor de máximo de consigna de la bomba.

8.3.1.1. Relay-Feedback

Este método es simple, ampliamente utilizado, y constituye una estimación de parámetros en función de los tiempos de respuesta y los valores estacionarios de una señal controlada en función de una señal oscilatoria todo-nada en la señal de control. A diferencia de otros métodos de estimación de parámetros, como el método de oscilación última de Ziegler-Nichols, éste permite una fácil implementación y reduce el riesgo de llevar la planta a su límite de estabilidad, con sus correspondientes problemas.

El algoritmo implementado es el siguiente:

1. **Estabilización inicial.** Se estabiliza la señal alrededor de una consigna mediante un control PID con parámetros constantes. El objetivo de esta etapa es partir de un estado estacionario alrededor de la consigna, pues de otro modo se introducirían errores en el cálculo debido a la dinámica del sistema.
2. **Control mediante relé con histéresis.** Se introduce un relé de amplitud $\pm d$ y una histéresis $\pm \varepsilon$ como controlador en lugar del PID, como se indica en la figura 8.3.1.1. En la implementación realizada, la amplitud de la histéresis es de $\pm 5\%$ del nivel, y la señal de control es la potencia máxima de la bomba o bien la bomba parada. Para el cálculo de parámetros no se desprecian las rampas de aceleración y deceleración del variador de la bomba, ya que contribuyen al retardo de la señal y son importantes para el cálculo de parámetros.

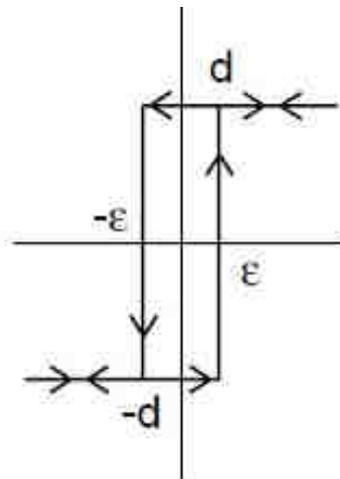


Figura 8.3.1.1 – Relé con histéresis

3. **Cálculo de ganancia y período últimos.** En el PLC se programa una sección que monitoriza por un lado la amplitud de la señal controlada (el nivel) y por otro el período de oscilación. En el presente programa, la amplitud de la oscilación (en adelante a) se calcula como la diferencia del valor máximo menos el mínimo registrados en la oscilación, mientras que el período de oscilación se calcula como el tiempo que tarda en volver a activarse la bomba tras la primera activación.

Mientras el período último se considera igual al período de oscilación calculado, la ganancia última se debe obtener mediante la expresión 8.3.1.2, planteada por Åström y Hagglund en [1].

$$K_u = \frac{4d}{\pi\sqrt{a^2 - \varepsilon^2}} \quad (8.3.1.2)$$

4. **Obtención de parámetros de PID.** Mediante los valores de ganancia última o crítica (K_u) y período último (T_u) es posible obtener los una estimación de los valores de los parámetros más adecuados para un control PID. En función del tipo de respuesta deseada, el cálculo de parámetros es diferente, como se puede observar en la tabla 8.3.1.1 de método de sintonización de Ziegler & Nichols

	K_c	T_i	T_d
Estándar	$0,6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$
Con pequeña sobreoscilación	$0,33K_u$	$T_u/2$	$T_u/3$
Sin sobreoscilación	$0,2K_u$	$T_u/2$	$T_u/3$

Tabla 8.3.1.1 – Método de sintonización de Ziegler & Nichols

Estos tres cálculos de parámetros de PID se han implementado en la fase de obtención de parámetros, y es posible seleccionar uno u otro a través del SCADA como se explicará en la sección correspondiente. Adicionalmente, se ha implementado una cuarta opción para cálculo de parámetros en función de resultados experimentales y posteriores ajustes finos. De este modo, las 4 estimaciones de parámetros implementadas son:

	K_c	T_i	T_d
Estándar	$0,6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$
Con pequeña sobreoscilación	$0,33K_u$	$T_u/2$	$T_u/3$
Sin sobreoscilación	$0,2K_u$	$T_u/2$	$T_u/3$
Experimental	$2,9K_u$	$2,25T_u$	$T_u/10,0$

Tabla 8.3.1.2 – Cálculo de parámetros implementado en el control de nivel.

A continuación se muestran las respuestas obtenidas para una consigna de 30 % de nivel con la electroválvula cerrada y la válvula de descarga FV21 abierta al 50 %.



Figura 8.3.1.2 – Respuesta a consigna de 30 con parámetros calculados mediante el método Relay-Feedback con constantes estándar

En la figura 8.3.1.2 se observa para el cálculo con constantes estándar que, aunque el sistema tiende a la estabilidad, es muy oscilante y muy lento.



Figura 8.3.1.3 – Respuesta a consigna de 30 con parámetros calculados mediante el método Relay-Feedback con constantes para pequeña sobreoscilación

En la gráfica de salida para un PID con parámetros calculados mediante las constantes de pequeña sobreoscilación, se puede observar una respuesta muy lenta, con una sobreoscilación pequeña. En el presente documento no se muestra la gráfica sin sobreoscilación, debido a que su tiempo de estabilización es superior a 5 minutos.

El principal inconveniente de las respuestas anteriores es su lentitud, ya que para alcanzar un valor estable son precisos en torno a 5 minutos para una consigna de nivel del 30 %. El objetivo deseado es tener un tiempo de estabilización, en el peor de los casos, inferior a 2 minutos, y por ello se plantea el nuevo set de constantes experimental para el cálculo del PID.

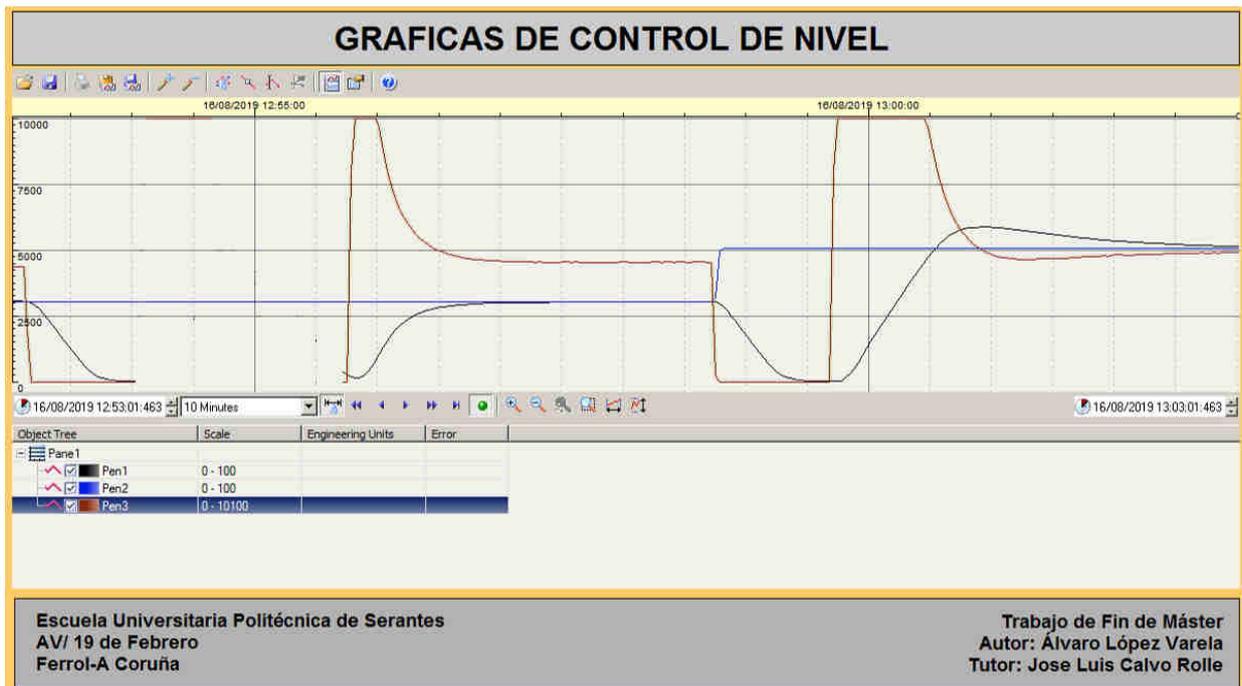


Figura 8.3.1.4 – Respuesta a consigna de 30 y de 50 % con parámetros calculados mediante el método Relay-Feedback con constantes experimentales

Observando las gráficas previas, se puede concluir que la mejor respuesta en cuanto a rapidez, sobreoscilación y razón de amortiguamiento es la que se corresponde con la obtención experimental de parámetros. En realidad, como se puede ver en la figura 8.3.1.4, para una consigna de 30 prácticamente no sería preciso un ajuste fino. Sin embargo, en esta misma figura se puede ver que los parámetros obtenidos no son óptimos para todas las situaciones (para una consigna de 50 % existe una importante sobreoscilación), por lo que se debe mejorar la respuesta modificándolos manualmente mediante un ajuste fino.

Sin embargo, el método Relay-Feedback con parámetros experimentales genera mejores resultados en general para cualquier punto de consigna que la utilización de unos parámetros de PID fijos para todas las regiones. De este modo, aunque no se realice un ajuste fino, el control mediante Gain scheduling con parámetros obtenidos mediante el método anterior sería en general más rápido, con menores sobreoscilaciones, y con una evolución más suave de la potencia de la bomba.

8.3.2. Obtención de parámetros optimizados

A pesar de que el método de Relay-Feedback suele conducir a buenos resultados, es preciso un ajuste fino experimental para poder obtener el mejor desempeño de la planta. Este ajuste fino está hoy en día presente en la mayoría de implementaciones de PID, y se utiliza para optimizar la respuesta deseada con respecto a unos parámetros de diseño. En ocasiones, no solo se desea que una señal tenga un valor estacionario determinado, sino que una respuesta transitoria dada. En algunos casos, puede ser deseable alcanzar el estado estacionario de forma rápida, sin importar sobreoscilaciones, mientras que en otras ocasiones el interés puede estar en minimizar o anular la sobreoscilación y obtener así una respuesta más lenta.

A continuación se introducen las reglas generales de sintonización manual y ajuste fino de un PID utilizadas para establecer los parámetros óptimos en cada región de control para el controlador mediante Gain Scheduling:

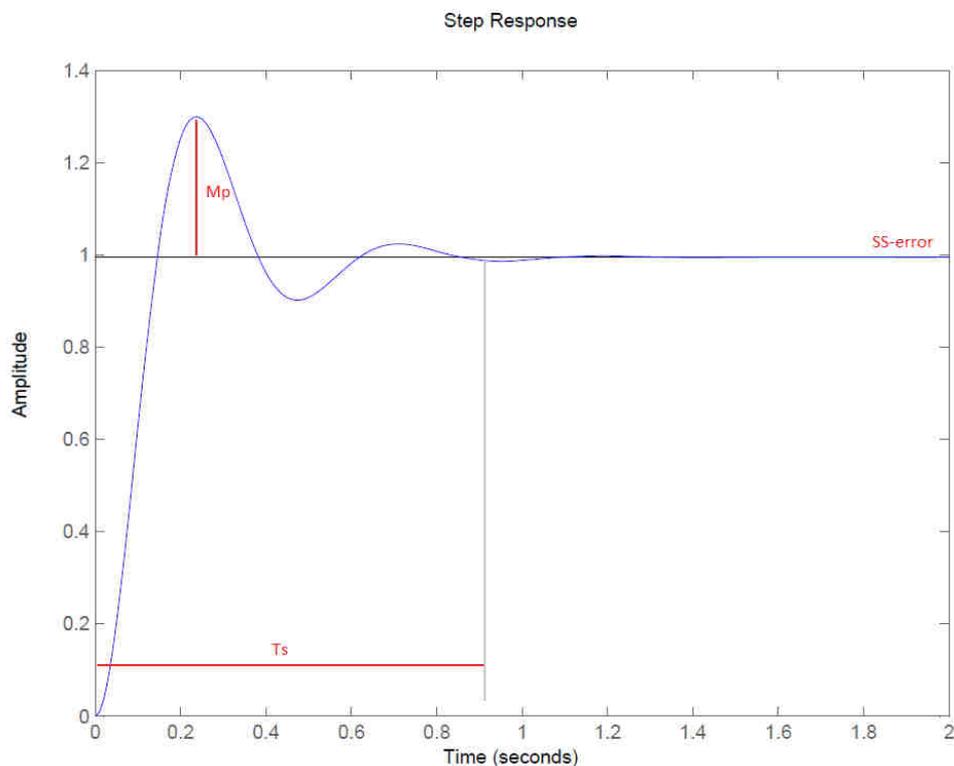


Figura 8.3.2.1 – Gráfica de respuesta de PID.

1. Para reducir el tiempo de subida, se debe subir la constante proporcional K_p o la integral T_i .
2. Para reducir la sobreoscilación, marcada en la figura 8.3.2.1 como M_p , se debe aumentar el término derivativo o bien reducir el integral o el proporcional.
3. Para reducir el tiempo de establecimiento o «settling time», T_s en la figura 8.3.2.1, se debe

aumentar la constante derivativa, o bien reducir la integral. La constante proporcional tiene poco efecto.

4. Por último, para eliminar el error estacionario o «steady-state-error», $SS - error$ en la figura 8.3.2.1, es necesario aumentar los términos proporcional o integral, mientras que el derivativo no tiene un efecto significativo.

Como se puede observar, estas normas están interrelacionadas y no siempre producen los resultados descritos, lo que dificulta el ajuste fino.

A continuación, en la gráfica 12.1.7.1 se muestra el resultado de un ajuste fino para una consigna de 30 % de nivel con la electroválvula cerrada y la válvula de descarga FV21 abierta al 50 %. En negro se muestra el nivel en porcentaje, en azul la consigna, y superpuesto se muestra la consigna de la bomba, de 0 a 10000. Se puede observar una mejora de la respuesta de en las sucesivas pruebas, con un sistema críticamente amortiguado con una respuesta lenta, posteriormente un sistema con una ligera sobreoscilación, y por último un sistema críticamente amortiguado con una respuesta rápida.

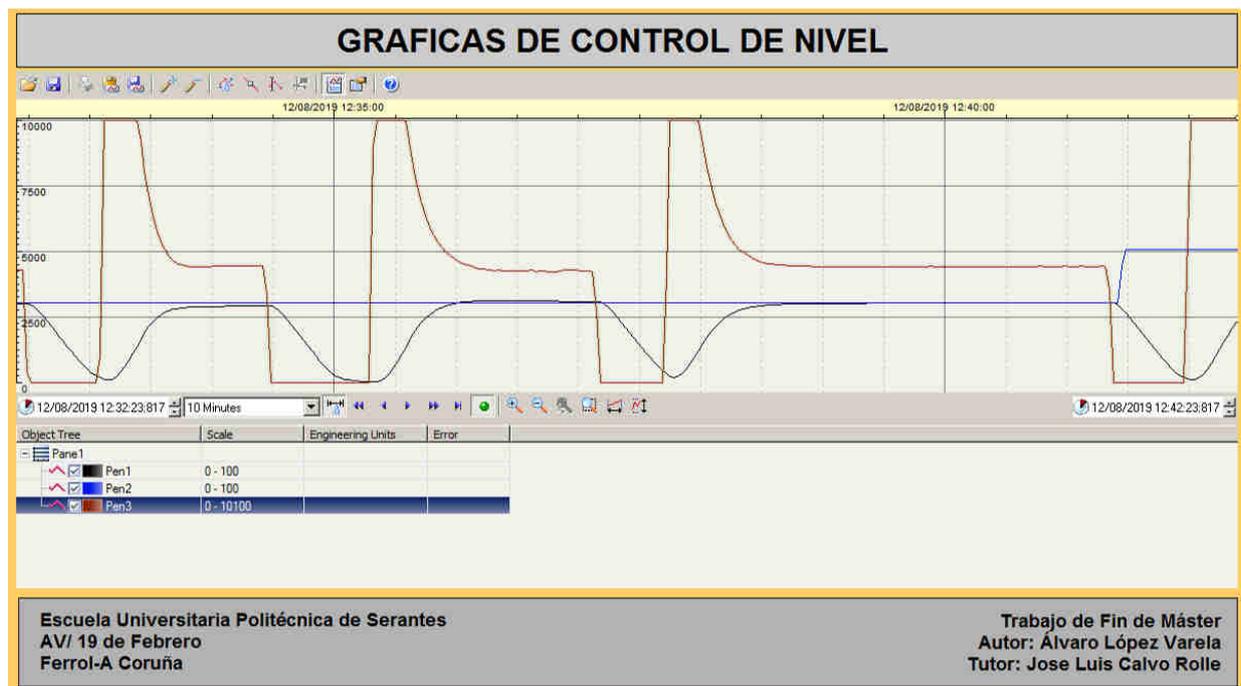


Figura 8.3.2.2 – Ajuste fino de un PID.

La obtención de parámetros y el ajuste fino se ha de realizar para todas las regiones de control establecidas (30), si bien debido al bloqueo de la electroválvula, sólo se realizará para las 15 primeras regiones.

Es necesario remarcar que el ajuste fino no se realiza sólo para cada consigna partiendo del depósito vacío, sino partiendo de varios niveles con dinámicas de bajada o subida. Todo ello es preciso realizarlo para cada región de control. En el presente documento no se muestran todos los ajustes, sino sólo el descrito a modo de ejemplo.

8.3.3. Almacenamiento de parámetros

El objetivo del controlador con ganancias variable o Gain Scheduling consiste en el establecimiento de varias regiones de funcionamiento con unos parámetros de control optimizados para cada una de ellas, con una actualización automática de parámetros con cada cambio de región.

Como ya se ha comentado, en el presente proyecto de control de nivel se establecen 30 posibles regiones. Los parámetros optimizados se almacenan como vectores de datos de dimensión 30, uno para el parámetro proporcional, otro para el integral y otro para el derivativo. Durante el control mediante Gain Scheduling, se calcula el índice de la región de control en cada instante, y se introducen en el control PID los parámetros almacenados en la posición correspondiente de cada vector de datos.

Durante la etapa de obtención de parámetros, los valores almacenados pueden ser modificados, bien sea por ajuste fino o por obtención mediante el método Relay-Feedback. Sin embargo, durante la etapa de control mediante Gain Scheduling no se permite la modificación.

8.3.4. Gain Scheduling

El control mediante Gain Scheduling permite seleccionar los parámetros óptimos de PID para cada región de trabajo. Por lo tanto, es necesario evaluar en cada paso de tiempo la región de trabajo en la que está la planta, así como actualizar las constantes proporcional, integral y derivativa para mejorar el control.

Las primeras pruebas se realizan con respuestas a escalón partiendo del reposo, es decir, nivel al 0 %, y se comprueba que en todos los casos el sistema tiene una respuesta muy próxima a la críticamente amortiguada, siendo la sobreoscilación máxima medida para el supuesto descrito (partiendo del equilibrio) inferior al 2 % de la consigna.

A continuación se muestra una comparativa entre un control mediante Gain Scheduling y un control con parámetros estáticos. En la figura 8.3.4.1 se puede comprobar los problemas de utilizar unos mismos parámetros de control para todas las regiones de control. Es este caso, se muestra la respuesta ante una consigna de 30 y 50 % con la válvula de descarga abierta al 80 %, siendo las constantes proporcional, integral y derivativa las calculadas para la región 8 (50 % de consigna de nivel y válvula de descarga al 50 %), que sería la región central y por lo tanto presumiblemente la que daría mejores resultados para todo el rango de funcionamiento. Sin embargo, se puede observar que, aunque las respuestas son estables y el control funciona correctamente, las respuestas son mucho más lentas, con amortiguamientos (consigna del 30 %) y sobreoscilaciones (consigna del 50 %) importantes.

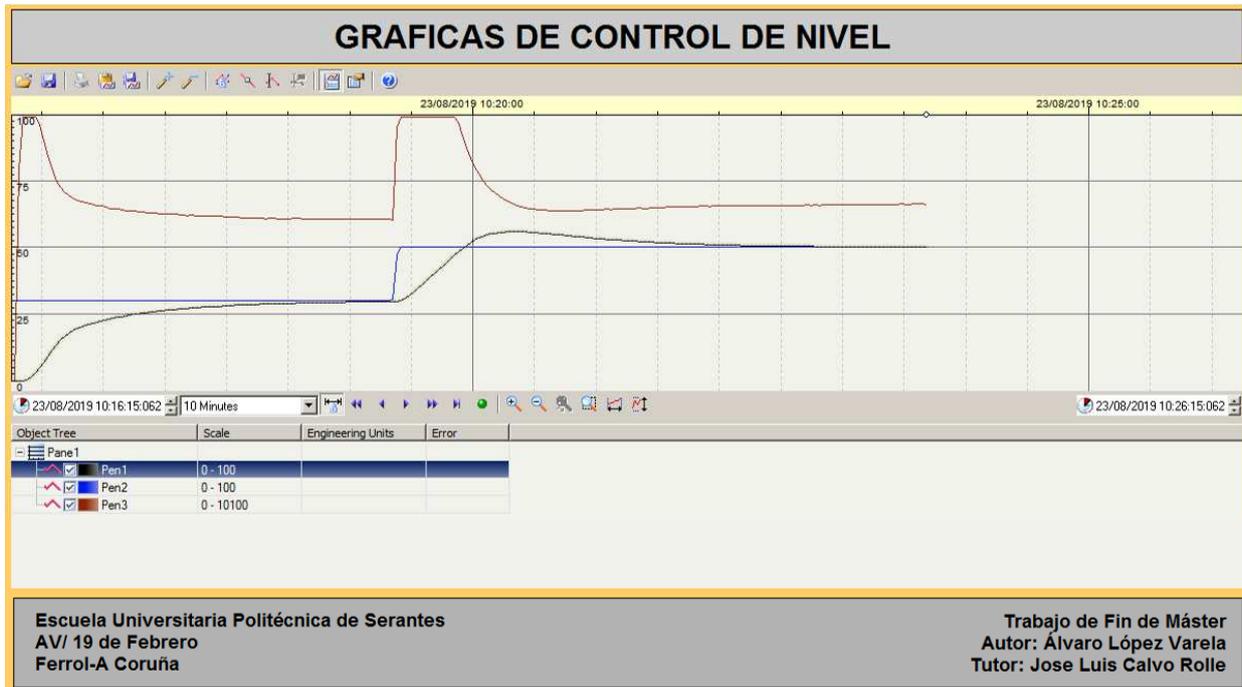


Figura 8.3.4.1 – Respuesta ante varias entradas escalón mediante control con parámetros estáticos.

En las figuras 8.3.4.2 y 8.3.4.3 se pueden observar las respuestas mediante un control Gain Scheduling a entradas escalonadas para una apertura de la válvula motorizada de descarga de un 50 % y un 80 %.

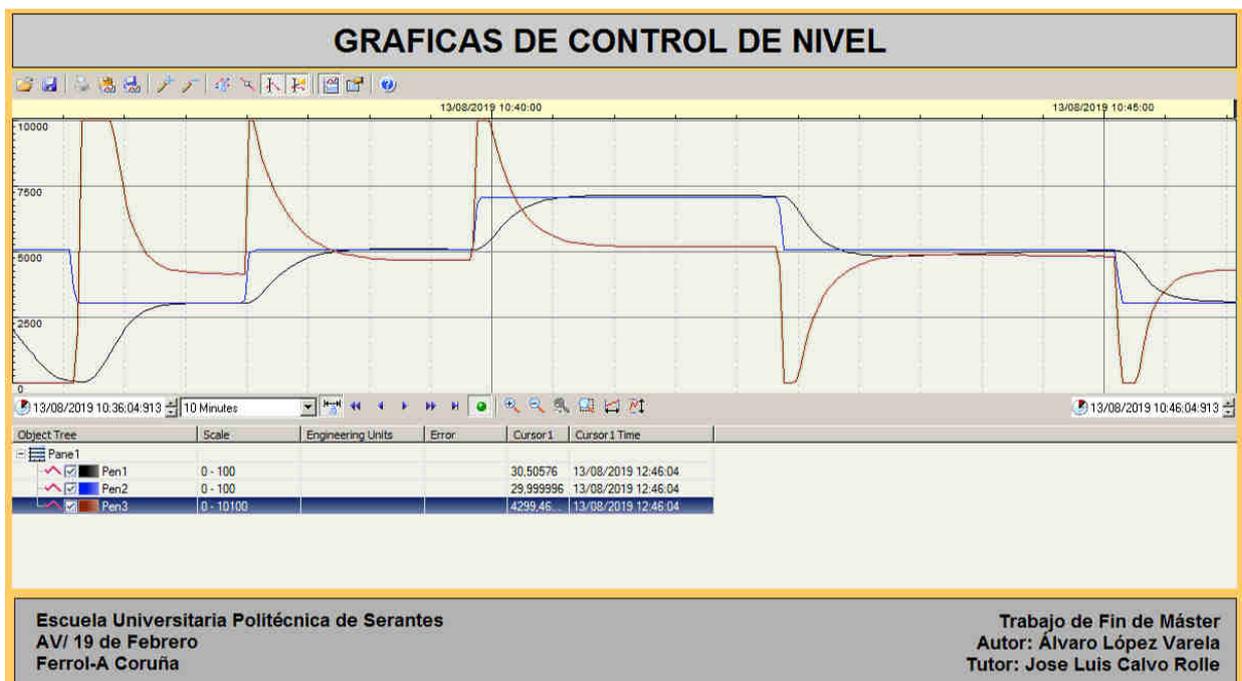


Figura 8.3.4.2 – Respuesta ante varias entradas escalón mediante control con Gain Scheduling con FV21 al 50 %

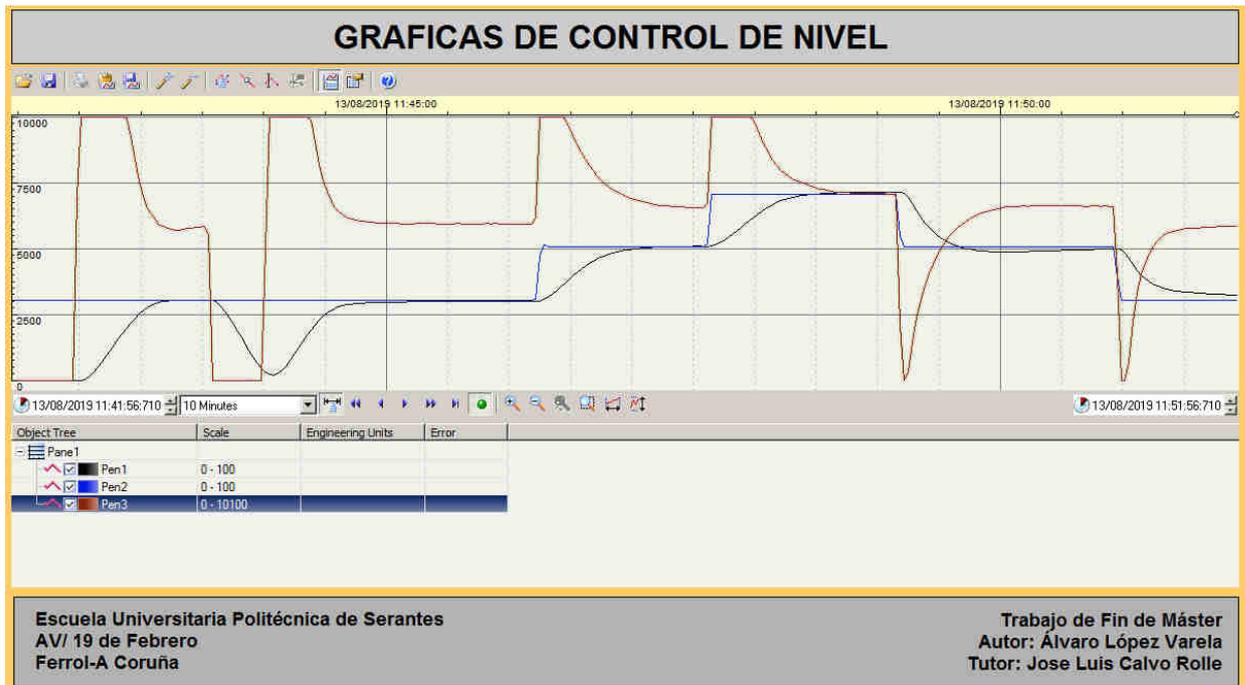


Figura 8.3.4.3 – Respuesta ante varias entradas escalón mediante control con Gain Scheduling con FV21 al 80 %

Comparando las figuras 8.3.4.2 y 8.3.4.3 con la figura 8.3.4.1, se pueden ver respuestas mucho más rápidas, muy próximas a un sistema críticamente amortiguado, con sobreoscilaciones mínimas y con un buen comportamiento tanto a la subida como a la bajada de nivel. Las gráficas mostradas tienen todas una escala de tiempos de 10 minutos y las escalas de porcentajes de nivel, consigna y potencia de la bomba son las mismas, de tal forma que se pueden apreciar los resultados a simple vista sin necesidad de superponerlas.

Cabe remarcar que la obtención de un buen control en la bajada del nivel no fue inmediato, y requirió la modificación y el ajuste de los parámetros de diseño del PID, en cuanto al anti-windup y al límite derivativo.

Por otro lado, no se ha podido probar ni calcular los parámetros optimizados para las regiones con la electroválvula abierta, pero la implementación realizada permite que una vez se repare, sea posible de forma sencilla y a través de la interfaz gráfica calcular los parámetros optimizados y almacenarlos en su región correspondiente.

8.3.5. Interfaz gráfica

Se diseña una nueva interfaz gráfica para el nuevo proyecto de forma que sea simple e intuitiva, y permita un manejo completo de las nuevas funcionalidades implementadas. La interfaz gráfica cuenta con 7 pantallas diferentes: «INICIO», «GAIN_SCHEDULING», «Calculo_Param_PID», «GRAFICAS», «PLANTA_EN_FALLO», «APRENDIZAJE» y «DETECCION_ANOMALIAS». Las pantallas se describen con más profundidad en el anexo 12.1.

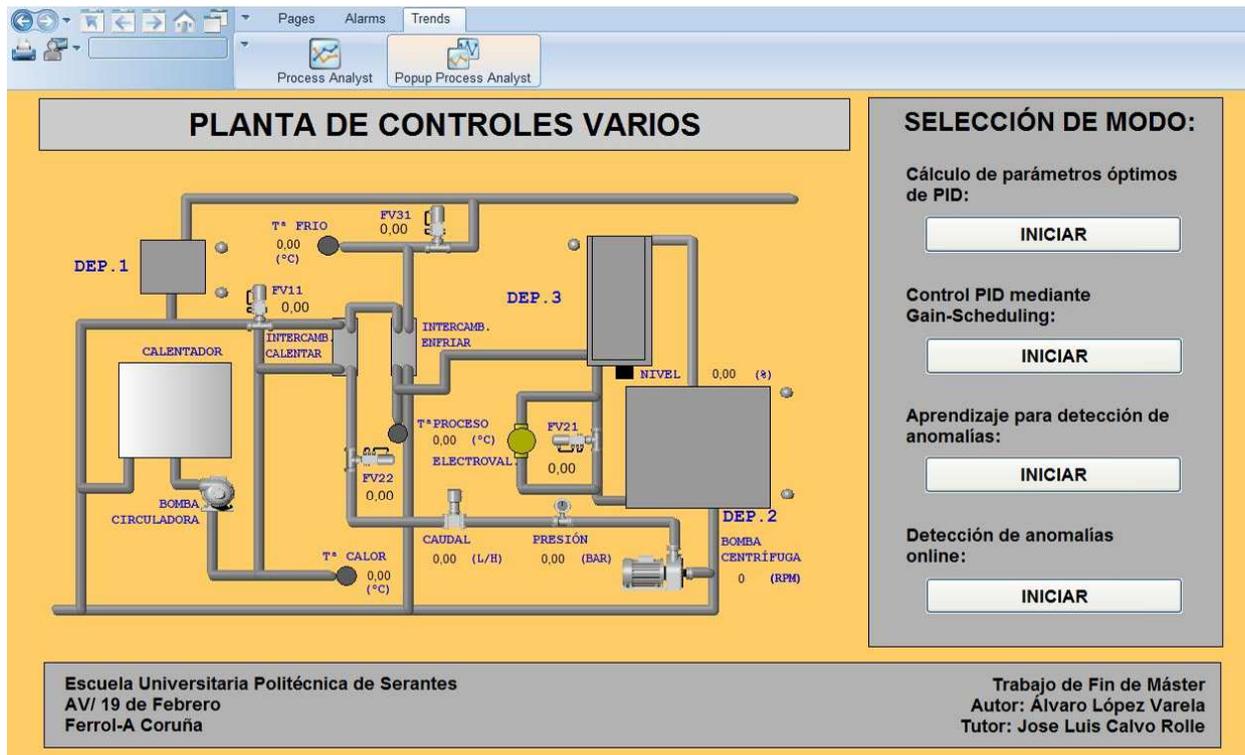


Figura 8.3.5.1 – Pantalla de inicio.

La pantalla «INICIO», como puede verse en la figura 8.3.5.1 es la que se activa inicialmente, y cuenta con un menú en el que se puede seleccionar el modo de funcionamiento: obtención de parámetros para el PID, control mediante Gain Scheduling, aprendizaje y detección de anomalías.

La pantalla «Calculo_Param_PID» (8.3.5.2) consta de un esquema general de la planta con los datos principales de funcionamiento, así como de un menú en el que se permite seleccionar la región de funcionamiento mediante el establecimiento de una consigna, el porcentaje de apertura de la válvula de descarga FV21 y la activación de la electroválvula. También se indican los parámetros actuales del PID, y en la parte inferior derecha existe la posibilidad de modificarlos manualmente (opción inhabilitada durante el método Relay-Feedback). Desde esta pantalla se pueden activar y detener tanto el ajuste manual como la obtención de parámetros automática a través de los pulsadores «INICIAR» y «DETENER» correspondientes.

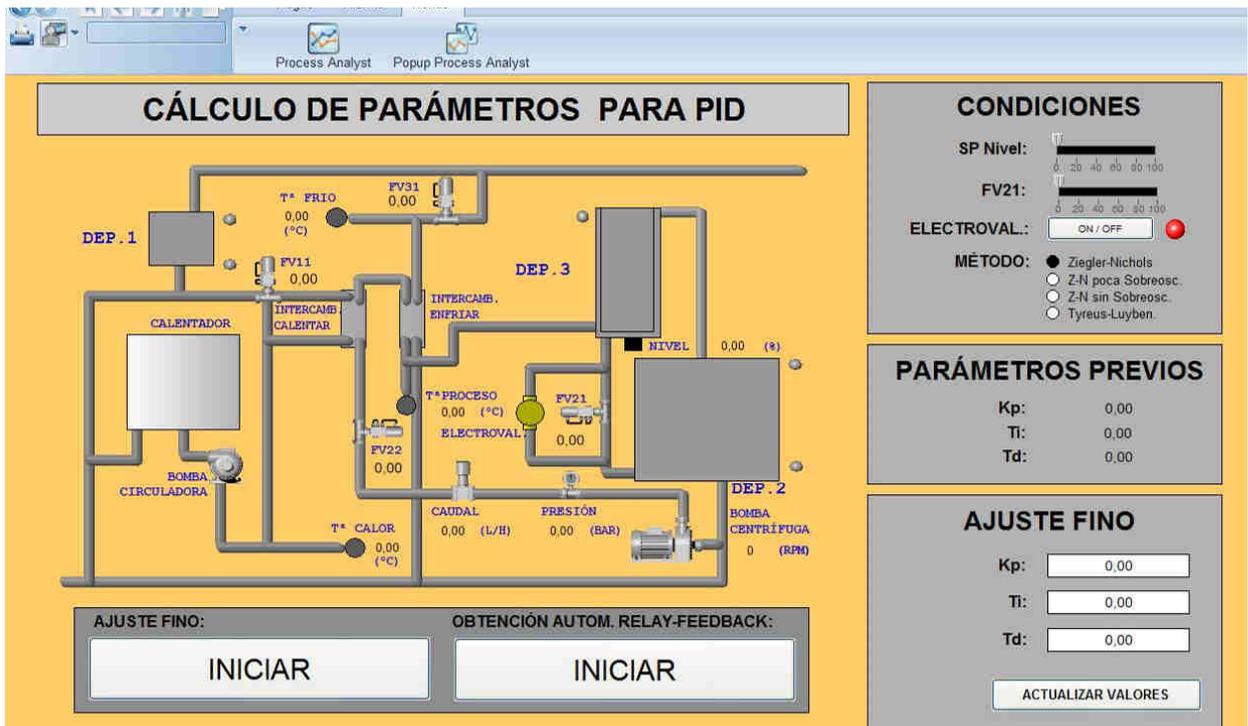


Figura 8.3.5.2 – Pantalla de obtención de parámetros.

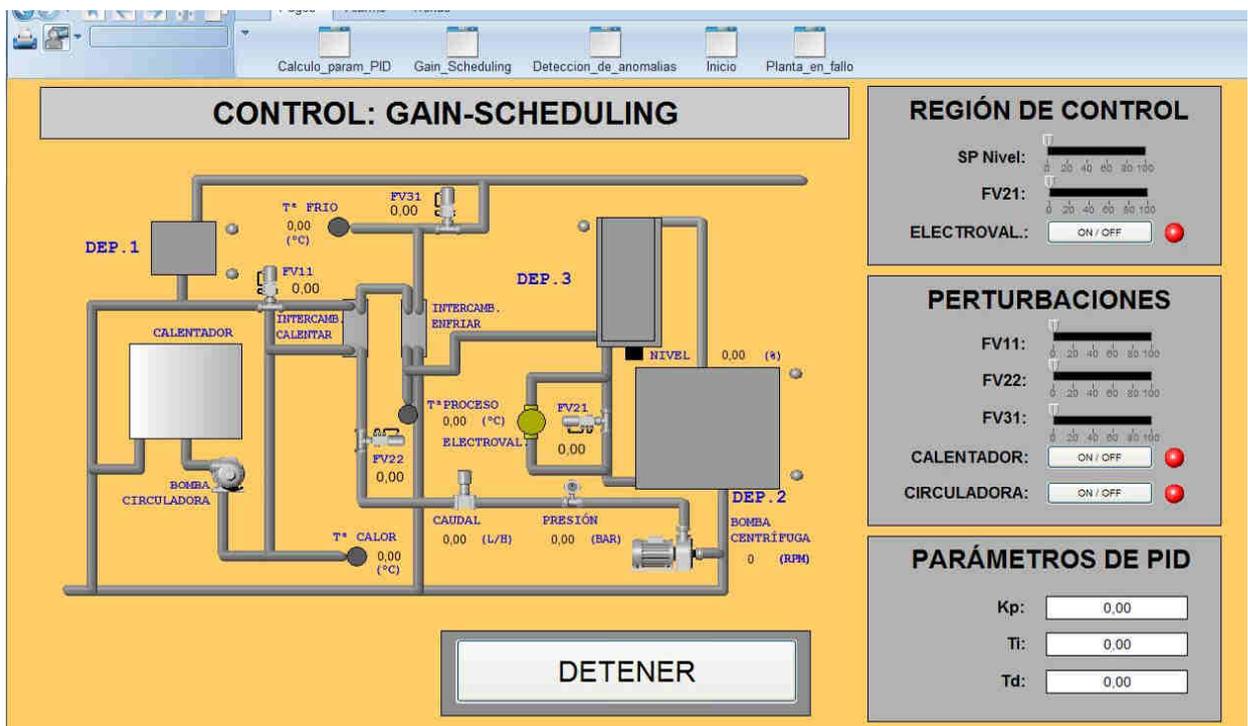


Figura 8.3.5.3 – Pantalla de control PID mediante Gain Scheduling.

Una de las pantallas más útiles es la de «GRAFICAS», mostrada anteriormente en la figura 8.3.4.2, que permite graficar los datos más importantes del control con respecto al tiempo.

8.4. Detección de anomalías

8.4.1. Detección regresiva simple

La primera de las detecciones programadas consta de dos fases:

- **Aprendizaje.** Durante esta etapa se realiza la identificación del lazo de control de nivel mediante mínimos cuadrados, modelando la planta mediante 2 polos como se muestra en la ecuación 7.3.1.1. Un factor muy importante en la identificación es el factor de olvido, que en este caso se establece en 0.98 para todas las pruebas.
- **Detección.** Una vez se termina el aprendizaje, se detiene la identificación, y se utilizan los últimos datos de dicha identificación para calcular en cada paso de tiempo el nivel estimado para el siguiente paso de tiempo según la ecuación 7.3.1.2. Para la detección, se calcula el error en porcentaje de nivel real según la ecuación 8.4.1.1, y se compara con un valor constante establecido por el usuario. Dicho valor se expresa en porcentaje, y ofrece buenos resultados para valores entre un 15 % y un 10 %.

$$error = \frac{\|nivel_{real} - nivel_{estimado}\|}{nivel_{real}} 100 \quad (8.4.1.1)$$

Es muy importante que la fase de aprendizaje sea similar a la fase de detección para producir buenos resultados. Si por ejemplo el aprendizaje se realizase con una consigna de 30 % y la válvula abierta al 30 %, y la detección para una consigna de 70 % de nivel y la válvula al 100 % de apertura, todos los datos de detección serían considerados como anomalías para un límite de detección bajo.

En la figura 8.4.1.1, puede verse la gráfica de resultado de una detección de anomalías, en la que el nivel real puede verse en azul, el nivel estimado en rojo y la detección de anomalías en negro (valor 1 en detección). La detección se realizó con las siguientes condiciones:

- **Aprendizaje:** 70 segundos, con la planta partiendo de reposo hasta estabilizarse en un 30 % de nivel con la válvula de descarga abierta al 50 %.
- **Detección**
 - Porcentaje de error máximo: 0,5 %.
 - Perturbaciones: se mantiene en la misma consigna (30 % de nivel) y se introducen 2 veces medio litro de agua aproximadamente de forma manual y de golpe en el tanque de control de nivel (correspondientes a los dos picos de nivel y a las dos anomalías encontradas). Tras esto se modifica la consigna de nivel y se abre la válvula motorizada de descarga al 100 % (sin resultados en la detección).

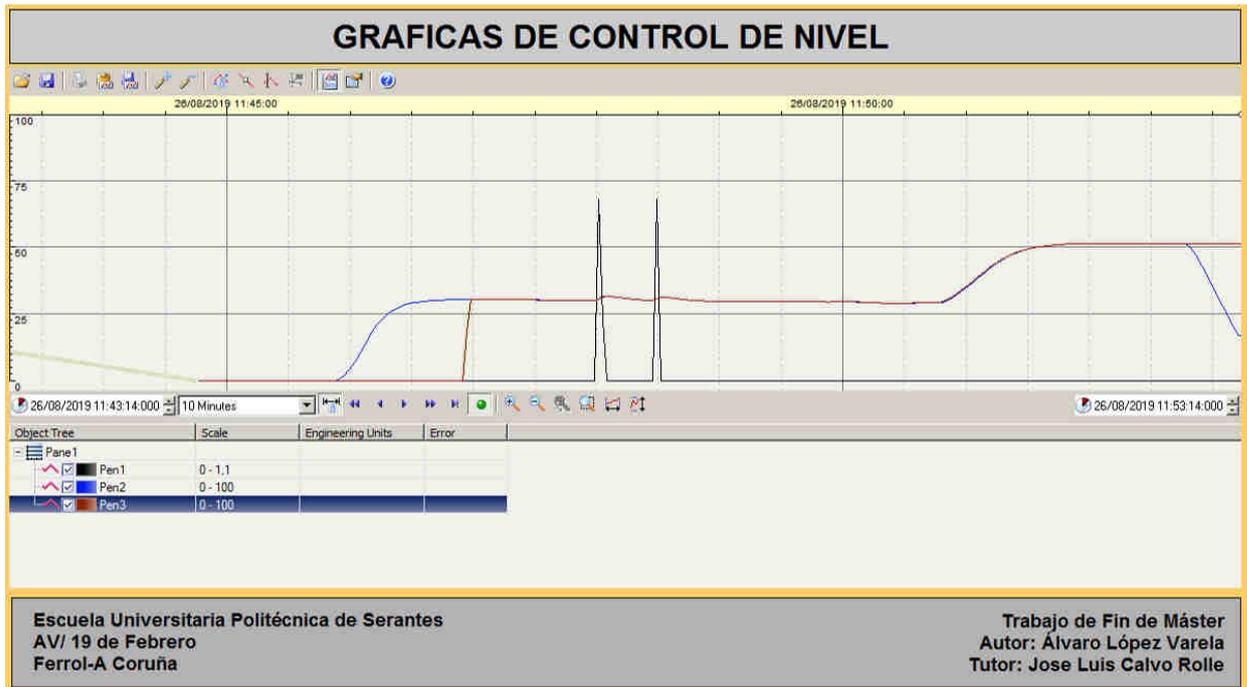


Figura 8.4.1.1 – Gráfica de detección de anomalías ante aporte externo de agua.

Bajando el porcentaje de error máximo, para las mismas condiciones que la detección anterior, podría producirse la detección de anomalías tras el cambio de consigna o con la apertura de la válvula, pero este sería un comportamiento no deseado, ya que forman parte del funcionamiento normal.

Aquí se puede observar la importancia de un buen aprendizaje, ya que si no se realiza teniendo en cuenta todas las posibles regiones de funcionamiento, para un valor bajo de porcentaje de error máximo podrían existir falsas detecciones.

8.4.2. Detección estadística

La detección estadística descrita en el apartado 7.3.1 se utiliza para tener una mejor precisión en la detección de anomalías, y de este modo tener en cuenta la dispersión de los datos.

En la implementación se siguen las siguientes fases:

- Aprendizaje.** Al igual que en la detección propuesta en el apartado anterior, se realiza la identificación por mínimos cuadrados, pero además se calcula la media y la covarianza de los datos a_1 , a_2 y b_1 de la identificación. Los cálculos de media y covarianza se realizan en cada paso de tiempo mediante las fórmulas 8.4.2.1 y 8.4.2.2, que permiten el cálculo de datos recursivo corrigiendo para cada paso de tiempo la media que se utiliza para calcular la covarianza. Sería posible y sencillo realizar este cálculo sólo al final del aprendizaje, pero al calcularlo en cada paso de tiempo se puede observar los efectos que cada nuevo dato tiene en el cálculo de la media y la covarianza.

$$\mu_n = \frac{\mu_{n-1}(n-1) + x_n}{n} \quad (8.4.2.1)$$

$$\sigma_{x_i x_j}^{(n)} = \frac{x_i x_j + \left(\sigma_{x_i x_j}^{(n-1)} + \mu_{x_i}^{(n-1)} \mu_{x_j}^{(n-1)} \right) (n-1)}{n} - \mu_{x_i}^{(n)} \mu_{x_j}^{(n)} \quad (8.4.2.2)$$

En las ecuaciones 8.4.2.1 y 8.4.2.2, el término \mathbf{x}_n es un vector de dimensión 3 compuesto por los parámetros identificados $\mathbf{x}_n = [a_1 \ a_2 \ b_1]$, mientras que μ es otro vector de dimensión 3 y σ es una matriz cuadrada simétrica de dimensión 3×3 .

- Detección.** Durante la detección, se continúa con la identificación de la planta, pero en este caso se reduce el factor de olvido a 0.9 para tener una respuesta más rápida ante una anomalía. Durante la identificación mediante RLS, se realiza en todos los casos una media de los 10 últimos valores para evitar saltos significativos que se producen entre medidas consecutivas (incluso en estado estacionario). Durante la detección de anomalías, esta media se desactiva, por el mismo motivo que se reduce el factor de olvido: más rapidez en la detección.

Los parámetros de identificación se comparan con la media y la covarianza mediante la distancia de Mahalanobis y se comprueba si esta medida es inferior a un valor dado por el usuario. En función del valor dado, la superficie de separación de las regiones de funcionamiento normal y anómalo (expresión 7.3.1.4) abarca más o menos volumen.

En las figuras 8.4.2.1 y 8.4.2.2 puede verse el resultado de una detección de anomalías en un gráfico en 3 dimensiones, que representa los valores de a_1 , a_2 y b_1 . Esta detección se realizó para un aprendizaje de 90 segundos en el que se contabilizan los valores identificados durante una subida de nivel desde el 0 % hasta el 30 % con la válvula motorizada de descarga abierta al 50 %. Para la detección, se mantiene la válvula al 50 % durante unos instantes, y posteriormente se abre al 100 %.

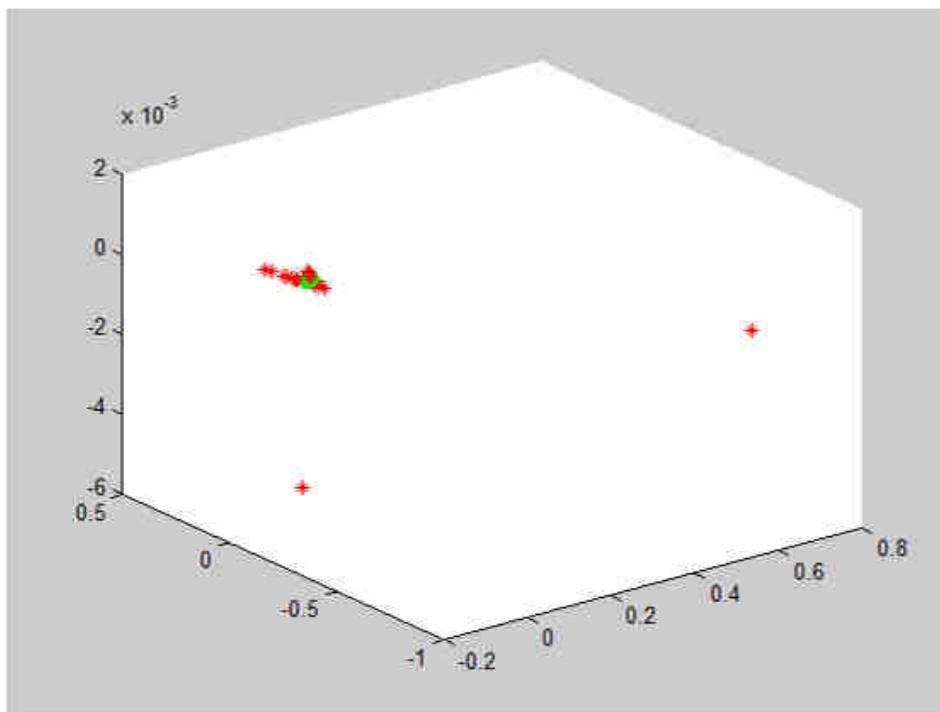


Figura 8.4.2.1 – Visualización de detección de anomalías en 3D.

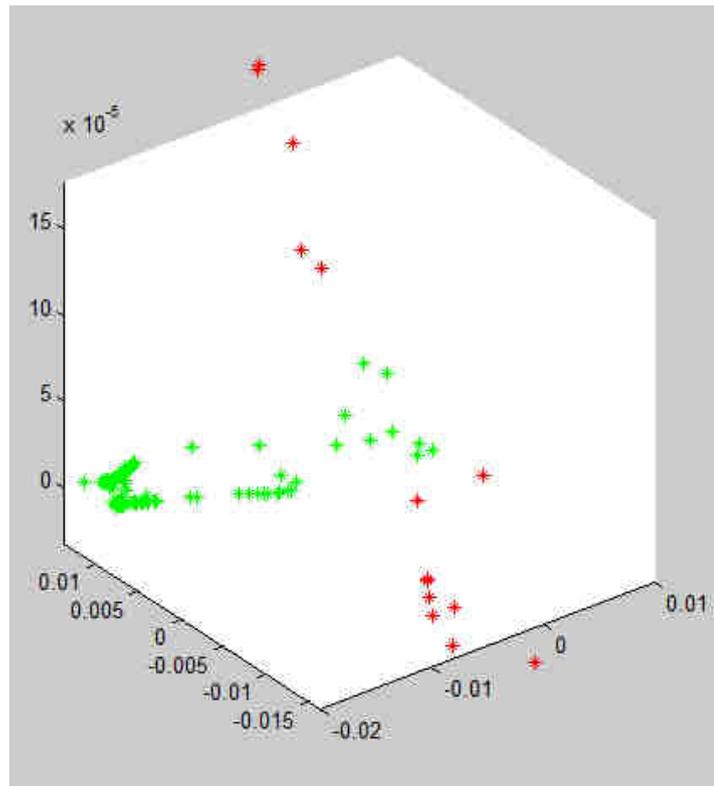


Figura 8.4.2.2 – Visualización de detección de anomalías en 3D con zoom en región de funcionamiento normal.

En la figura 8.4.2.1, las anomalías más apreciables son las debidas a los ya comentados saltos que se producen durante la identificación. En la figura 8.4.2.2, sin embargo, se aprecia un cambio de dinámica en el sistema debido a la apertura de la válvula motorizada, y por ello los nuevos datos son detectados como anomalías.

Un punto importante en esta detección es la selección de la distancia de Mahalanobis. Por ejemplo, si sólo se quisiesen descartar los picos durante la identificación, bastaría con utilizar un valor de distancia muy alto. Por otro lado, si se desea un control fino de la dinámica del sistema, sería preciso bajar la distancia al valor de la máxima distancia registrada durante el aprendizaje, para garantizar que si se repite alguno de los valores de aprendizaje se considerará como bueno. Sin embargo, esta distancia máxima no se calcula en el aprendizaje, ya que no se almacenan los datos en el autómata y la media y la covarianza varían con el avance del aprendizaje. Esta se puede calcular en la aplicación de Excel, que se describe en la sección 8.4.3.2.

El valor utilizado para la detección es un valor intermedio, de tal forma que las pequeñas variaciones en la dinámica del sistema se consideran como funcionamiento normal, y las variaciones considerables y los picos de identificación se consideran anomalías.

8.4.3. Interfaz gráfica

Para la detección de anomalías y la posible visualización de toda la información y el manejo de la planta se utilizan 3 programas diferentes: Vijeo Citec, como aplicación de monitorización y control; Excel, como herramienta para graficar y almacenar los datos obtenidos; y MATLAB, como herramienta matemática para analizar los datos y para realizar gráficas en 3 dimensiones.

8.4.3.1. Vijeo Citec

En el SCADA se crean 2 nuevas pantallas, una para aprendizaje y otra para detección.

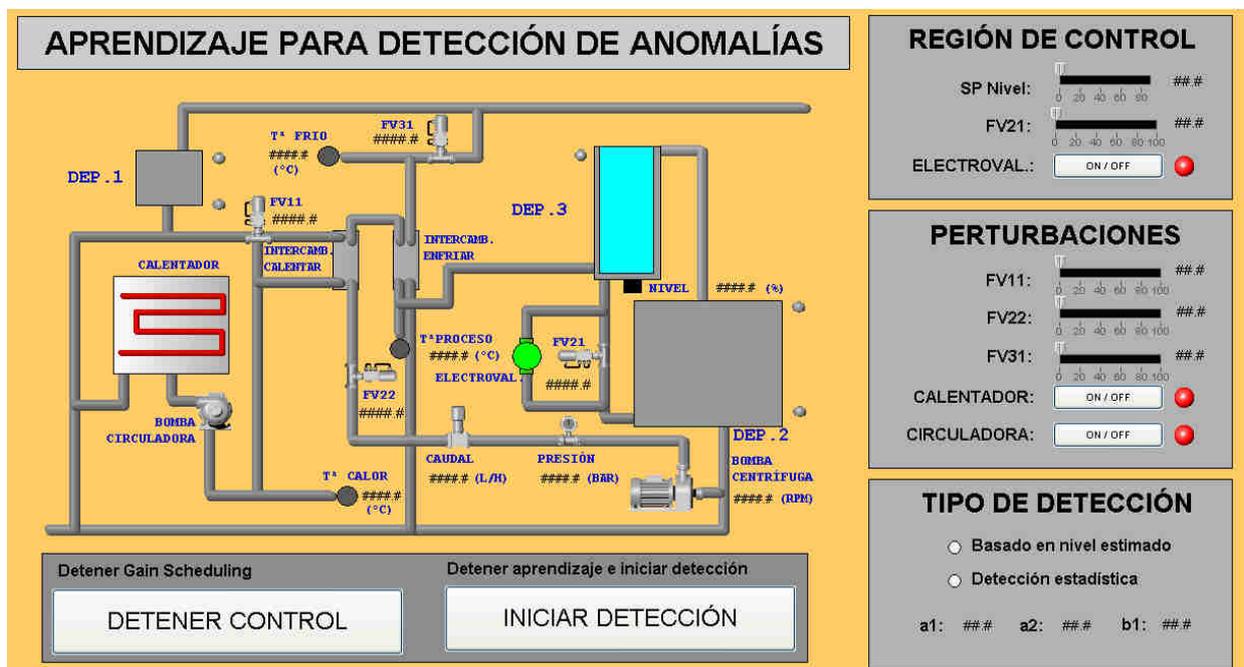


Figura 8.4.3.1 – Pantalla de aprendizaje.

La pantalla de aprendizaje sigue la misma estructura que las de obtención de parámetros y Gain Scheduling, y cuenta en su parte inferior derecha con un menú de selección de tipo de detección. En esta pantalla, una vez iniciado el aprendizaje, es posible detener el aprendizaje e iniciar la detección, o bien detener el control por completo.

En la pantalla de detección de anomalías, se muestran los datos instantáneos del nivel estimado o de los parámetros de identificación calculados en cada instante, en función del tipo de detección seleccionado durante el aprendizaje. También se muestran la media y la covarianza, y existe la posibilidad de actualizar el valor de porcentaje máximo de error o distancia máxima de Mahalanobis. En la parte inferior, se muestra si el funcionamiento es normal o si se ha detectado alguna anomalía.

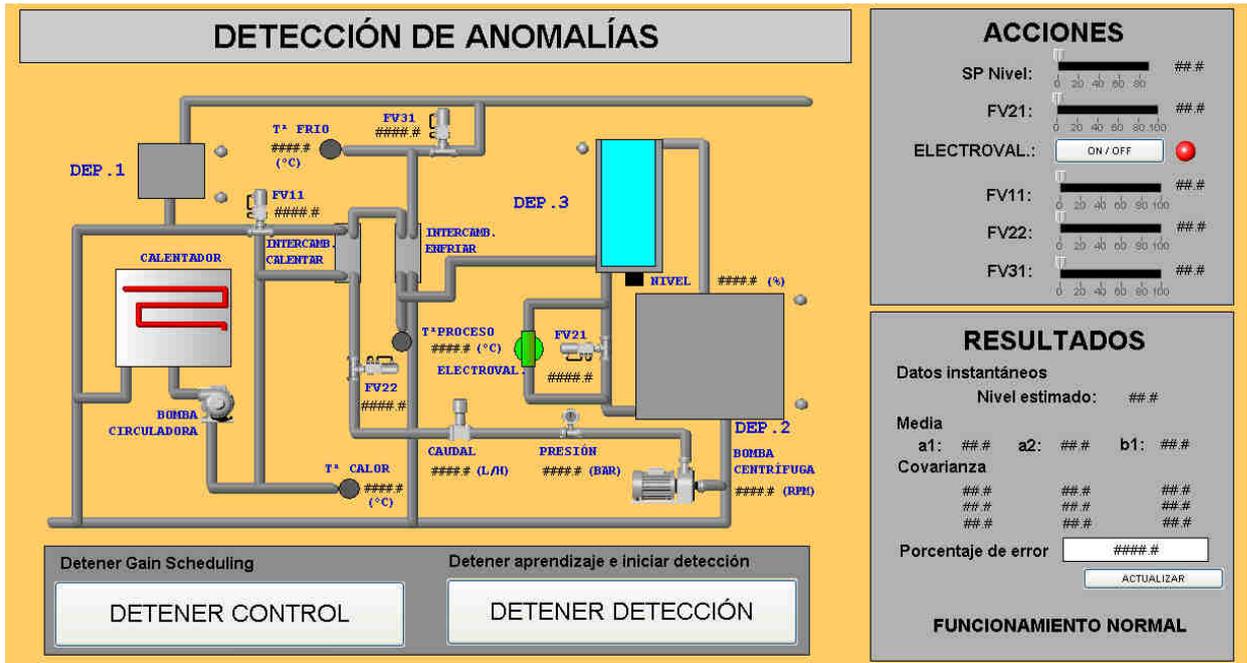


Figura 8.4.3.2 – Pantalla de detección de anomalías.

La pantalla «GRAFICAS» también es muy útil, ya que permite ver las anomalías que se han detectado con el paso del tiempo y el estado de la planta, como puede verse en la figura 8.4.1.1.

8.4.3.2. Excel

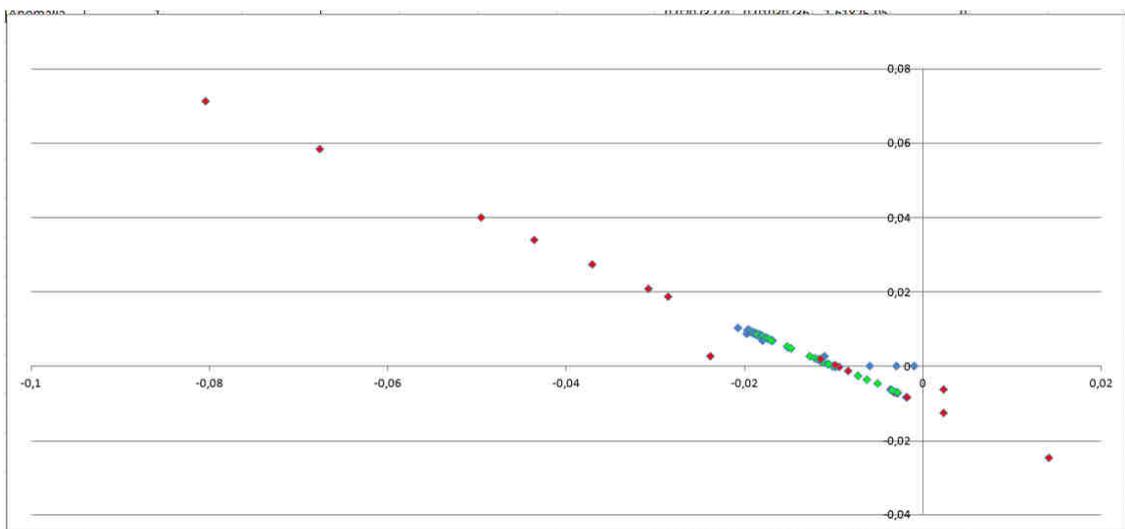


Figura 8.4.3.3 – Gráfica de Excel con datos de aprendizaje (azul), datos normales (en verde) y anomalías (en rojo)

Como ayuda al manejo de datos y como modo de almacenamiento y graficado de datos, se utiliza una macro de Excel programada para que permita:

- Obtención de datos de Vijeo Citect.
- Almacenamiento de datos con el paso del tiempo.
- Graficas instantáneas de datos.
- Distinción en las gráficas de datos de identificación (en azul), datos de detección con funcionamiento normal (en verde) y datos de detección anómalos (en rojo), como puede verse en la figura 8.4.3.3.

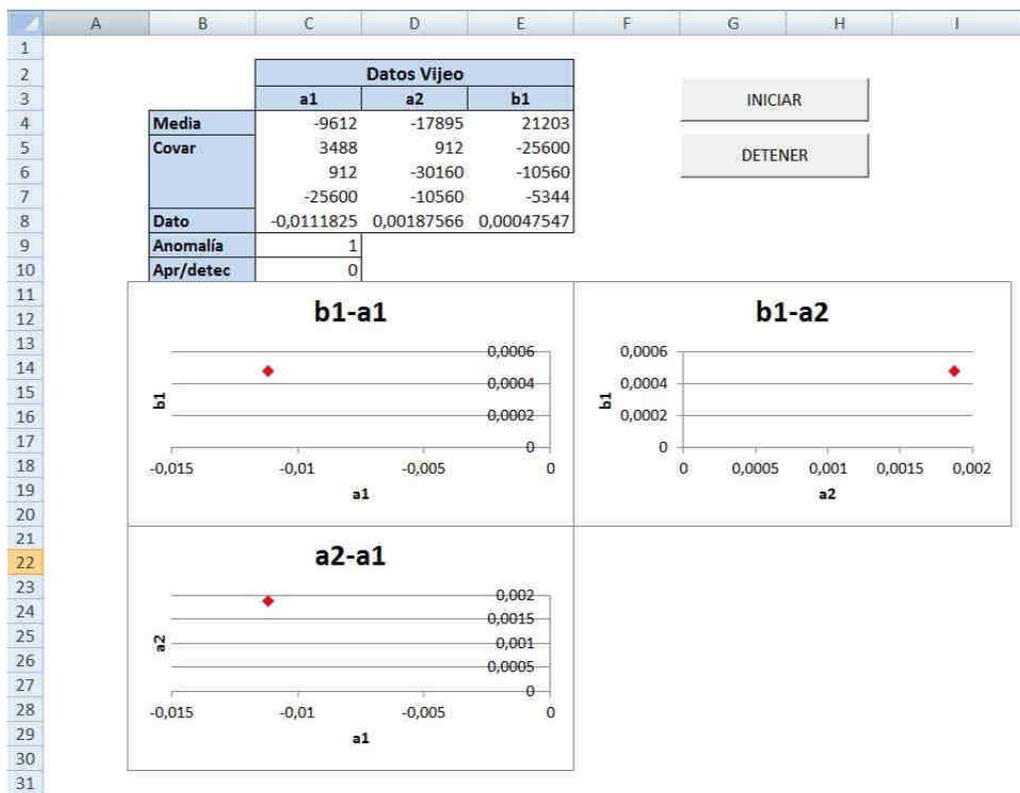


Figura 8.4.3.4 – Aplicación de Excel para graficar la detección de anomalías.

Como se muestra en la figura 8.4.3.4, la aplicación cuenta con dos pulsadores identificados como «INICIAR» y «DETENER». El primero de ellos elimina los datos anteriores, inicia la adquisición, crea las gráficas y clasifica los datos hasta que se pulse «DETENER».

El mayor problema de esta aplicación es que no permite graficar los datos en 3 dimensiones, pero las gráficas generadas permiten visualizar y comprender visualmente la distribución de los datos y la clasificación en normales y anómalos.

Esta aplicación debe funcionar en paralelo con Vijeo Citect, ya que lo utiliza como fuente de sus datos.

8.4.3.3. Matlab

Fuera de la monitorización en tiempo real de la planta, un posprocesado de los datos almacenados en Excel puede ser realizado para, entre otros objetivos, obtener gráficas en 3 dimensiones, y comprobar que en los resultados obtenidos las regiones de funcionamiento normal y anómalo están diferenciadas y no existen datos mal identificados.

Para ello se genera un breve script en MATLAB que permite graficar estos datos. Los resultados obtenidos son los mostrados en la figura 8.4.2.1.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2018/19

*IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL BASADO EN GAIN
SCHEDULING Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE
COMPUTACIONAL PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS.*

Máster en Ingeniería Industrial

Documento

ANEXOS

Índice del documento ANEXOS

9 Documentación de partida	85
9.1 Datos de partida	86
9.1.1 Identificación de la planta	86
9.1.1.1 Variables	86
9.1.1.2 Sección	90
9.1.2 PID SIMPLE	93
9.1.2.1 Variables	93
9.1.2.2 Sección	94
10 Cálculos	95
10.1 Media y covarianza	95
11 Programación	97
11.1 Lista de variables	98
11.2 Bloques de función derivados	104
11.2.1 Activ_detec	104
11.2.1.1 Variables	104
11.2.1.2 Sección	105
11.2.2 Calc_indice	106
11.2.2.1 Variables	106
11.2.2.2 Sección	106
11.2.3 Deteccion_estad	108
11.2.3.1 Variables	108
11.2.3.2 Sección	108
11.2.4 Deteccion_y_estim	111
11.2.4.1 Variables	111
11.2.4.2 Sección	111
11.2.5 Medias_elementos_G	113
11.2.5.1 Variables	113
11.2.5.2 Sección	113
11.2.6 Obt_param_Relay	115
11.2.6.1 Variables	115
11.2.6.2 Sección	115
11.2.7 Param_detec	118
11.2.7.1 Variables	118
11.2.7.2 Sección	118
11.2.8 PID_SIMPLE	120
11.2.8.1 Variables	120
11.2.8.2 Sección	121

11.2.9 Relay_Feedback	123
11.2.9.1 Variables	123
11.2.9.2 Sección	123
11.2.10RLS	123
11.3 Secciones	124
11.3.1 Seguridad	124
11.3.2 Mando	125
11.3.3 Funcionamiento	126
11.3.4 Acciones seguridad	127
11.3.5 IN_SCADA	128
11.3.6 Acciones funcionamiento	132
11.3.7 PID	134
12 Otros anexos	137
12.1 Guía de usuario	137
12.1.1 Inicio	139
12.1.2 Obtención de parámetros	140
12.1.3 Gain Scheduling	141
12.1.4 Aprendizaje	142
12.1.5 Detección de anomalías	142
12.1.6 Gráficas	143
12.1.7 Planta en fallo	144
12.2 Macro de Excel	146
12.3 Código de MATLAB	149

9 Documentación de partida

9.1. Datos de partida

9.1.1. Identificación de la planta

El bloque de función derivado de identificación de la planta mediante mínimos cuadrados para la obtención de una función de transferencia con 2 polos y una ganancia, según la ecuación 7.3.1.1, que había sido implementado en el TFG [2], es el siguiente:

9.1.1.1. 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	Nº	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	Nº	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	Nº	Tipo	Comentario
I		INT	
J		INT	
flag		BOOL	
AUX_E		REAL	
<secciones>			
RLS_2_POLOS_sec		<ST>	

9.1.1.2. 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:

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

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 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:

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

*)

(* 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:

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

*)

```
for i:=1 to 3 do
  K[i]:=AUX.A[i]/(F.OLVIDO+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 3 do
  AUX.E:=M[i]*G.ANTES[i]+AUX.E;
end_for;

for i:=1 to 3 do
  G[i]:=G.ANTES[i]+K[i]*(Y-AUX.E);
end_for;

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

U.ANTES:=U;
Y.ANTES:=Y;
```

9.1.2. PID SIMPLE

9.1.2.1. 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>	

9.1.2.2. 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;
```

10 Cálculos

10.1. Media y covarianza

La media y la covarianza se pueden calcular de forma recursiva, es decir, utilizando los valores de la media y la covarianza del instante anterior y los datos del nuevo instante de tiempo. Las ecuaciones de pueden obtener de las originales como se demuestra en los desarrollos 10.1.0.1 y 10.1.0.2.

$$\mu^{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i\right) + x_n}{n} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i\right) \frac{n-1}{n-1} + x_n}{n} = \frac{\mu^{(n-1)}(n-1) + x_n}{n} \quad (10.1.0.1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{x_i x_j}^{(n)} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i x_j}{n} - \mu_{x_i}^{(n)} \mu_{x_j}^{(n)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i x_j\right) + x_i x_j}{n} - \mu_{x_i}^{(n)} \mu_{x_j}^{(n)} = \\ &= \frac{\left(\sigma_{x_i x_j}^{(n-1)} + \mu_{x_i}^{(n-1)} \mu_{x_j}^{(n-1)}\right) (n-1) + x_i x_j}{n} - \mu_{x_i}^{(n)} \mu_{x_j}^{(n)} \end{aligned} \quad (10.1.0.2)$$

11 Programación

11.1. Lista de variables

Nombre	Tipo	Dirección	Descripción
AUX_1seg	EBOOL	%M0	Variable auxiliar activa cada segundo
AUX_100ms	EBOOL	%M1	Variable auxiliar activa cada 100ms
AUX_EBOOL	EBOOL		Variable auxiliar para conversión tipo
AUX_EBOOL_2	EBOOL		Variable auxiliar para conversión de tipo
AUX_EBOOL_3	EBOOL		Variable auxiliar para conversión de tipo
AUX_EBOOL_ OBT_PARAM	EBOOL		Variable auxiliar para conversión de tipo
AUX_flag_1s	EBOOL		Flag de 1 segundo.
IN_Caudal_FT21	INT		Caudal a la salida de la bomba
CH_FT21_ Caudal_Entrada	T_ANA_IN_GEN	%CH0.4.5	Medidor de caudal
IN_Conf_Marcha_ Bomba_P02	EBOOL	%I0.2.12	Confirmación de relé de la bomba (NA)
IN_Conf_Marcha_ Calent_D01	EBOOL	%I0.2.13	Confirmación de relé del calentador (NA)
IN_Conf_Marcha_ Circ_P01	EBOOL	%I0.2.14	Confirmación de relé de la circuladora (NA)
IN_D01_H_LSH2	EBOOL	%I0.2.4	Nivel alto en el depósito 1 (NA)
IN_D01_L_LSL2	EBOOL	%I0.2.3	Nivel bajo en el depósito 1 (NA)
IN_D02_H_LSH1	EBOOL	%I0.2.1	Nivel alto en el depósito 2 (NA)
IN_D02_L_LSL1	EBOOL	%I0.2.0	Nivel bajo en el depósito 2 (NA)
IN_D03_H_LSH3	EBOOL	%I0.2.15	Nivel alto en el depósito 3 (NA)
IN_Fallo_Term_ Bomba_P02	EBOOL	%I0.2.8	Fallo térmico de la bomba (NA)
IN_Fallo_Term_ Calent_D01	EBOOL	%I0.2.9	Fallo térmico del calentador (NA)
IN_Fallo_Term_ Circ_P01	EBOOL	%I0.2.10	Fallo térmico de la bomba circuladora (NA)

Nombre	Tipo	Dirección	Descripción
IN_Nivel_D03_LT01	INT		Entrada del sensor de presión que mide el nivel de DEP3
CH_LT01_Nivel_D03_Entrada.0	T_ANA_IN_GEN	%CH0.4.6	Medidor de nivel del depósito 3
IN_Presion_PT21	INT		Entrada del sensor de que mide la presión a la salida de la bomba
CH_PT21_Presion_Entrada	T_ANA_IN_GEN	%CH0.4.3	Medidor de presión a la salida de la bomba
IN_Presostato_PT21	EBOOL	%I0.2.2	Presión superior a la límite de funcionamiento (NC)
IN_Selector_Auto_Calent_D01	EBOOL	%I0.2.6	Selector del depósito calentador en automático.
IN_Selector_Auto_Circ_P01	EBOOL	%I0.2.5	Selector de la bomba recirculadora en automático
IN_Stop_Emergencia	EBOOL	%I0.2.11	Seta de emergencia (NC)
IN_Temp_Caliente_TT11	INT		Temperatura del agua del circuito calentador en centésimas de grado
CH_TT11_Temp_ACaliente_Entrada	T_ANA_IN_GEN	%CH0.4.0	Medidor de temperatura del circuito de agua caliente
IN_Temp_Fria_TT31	INT		Temperatura del agua del circuito enfriador en centésimas de grado
CH_TT31_Temp_AguaFria_Entrada	T_ANA_IN_GEN	%CH0.4.2	Medidor de temperatura del circuito de agua fría
IN_Temp_Proceso_TT21	INT		Temperatura del agua de proceso en centésimas de grado
CH_TT21_Temp_AProceso_Entrada	T_ANA_IN_GEN	%CH0.4.1	Medidor de temperatura del agua del proceso
OUT_Apertura_FV11	INT		Apertura de la válvula de agua caliente al intercambiador de calor
CH_FV11_Valvula_ACaliente_Salida	T_ANA_OUT_GEN	%CH0.5.3	Medidor de apertura de la válvula del circuito de calentamiento
OUT_Apertura_FV21	INT		Apertura de la válvula de vaciado del Dep. 3
CH_FV21_Valvula_D03_Salida	T_ANA_OUT_GEN	%CH0.5.1	Medidor de apertura de la válvula de vaciado del depósito 3
OUT_Apertura_FV22	INT		Apertura de válvula de entrada de agua al Dep. 3

Nombre	Tipo	Dirección	Descripción
CH_FV22_Valvula_Caudal_Salida	T_ANA_OUT_GEN	%CH0.5.2	Medidor de apertura de la válvula de llenado del depósito 3
OUT_Apertura_FV31	INT		Apertura de la válvula de entrada de agua fría
CH_FV31_Valvula_AFria	T_ANA_OUT_GEN	%CH0.5.0	Medidor de apertura de la válvula del circuito de enfriamiento
OUT_Arranque_Calent_D01	EBOOL	%Q0.3.0	Pone en marcha el calentador
OUT_Arranque_Circ_P01	EBOOL	%Q0.3.1	Pone en marcha la circuladora
OUT_Electrovalvula_FY22	EBOOL	%Q0.3.2	Electroválvula (se abre al activarla)
OUT_Variador_Frec_Marcha_P02	EBOOL	%Q0.3.4	Marcha del variador de frecuencia
OUT_Variador_Frec_On_P02	EBOOL	%Q0.3.3	Encendido del variador de frecuencia
OUT_Velocidad_Variador_P02	INT		Velocidad al variador de la bomba
CH_P02_Variador_Salida_0	T_ANA_OUT_GEN	%CH0.5.4	Velocidad del variador de frecuencia
SCD_a1	REAL	%MW54	Parámetro a1 de la función de transferencia
SCD_a2	REAL	%MW56	Parámetro a2 de la función de transferencia
SCD_Anomalia	EBOOL	%M37	Variable que indica si se ha encontrado una anomalía.
SCD_Aprend_Detec	EBOOL	%M32	Selector entre aprendizaje o detección de anomalías.
SCD_b1	REAL	%MW58	Parámetro b1 de la función de transferencia
SCD_Carga_PID	EBOOL	%M36	Variable de carga de los datos del PID desde el SCADA
SCD_Caudal	REAL	%MW0	Valor real del caudal en el Scada
SCD_Caudal_INT	INT	%MW50	Valor entero del caudal en el Scada
SCD_Consigna_FV11	REAL	%MW4	Consigna de apertura de la válvula del circuito de agua caliente en % en Scada
SCD_Consigna_FV21	REAL	%MW6	Consigna de apertura de la válvula de salida del depósito 3 en % en Scada
SCD_Consigna_FV22	REAL	%MW8	Consigna de apertura de la válvula de entrada al depósito 3 en % en Scada
SCD_Consigna_FV31	REAL	%MW10	Consigna de apertura de la válvula del circuito de agua fría en % en Scada

Nombre	Tipo	Dirección	Descripción
SCD_Consigna_Nivel	REAL	%MW2	Valor de consigna de nivel deseado introducido
SCD_cont	INT	%MW1760	Contador del número de elementos del aprendizaje
SCD_Covar	ARRAY [1..3,1..3] OF REAL	%MW246	Covarianza de los datos de aprendizaje para detección estadística.
SCD_Dep1_H	EBOOL	%M2	Indicador de nivel alto del Dep 1 en Scada
SCD_Dep1_L	EBOOL	%M3	Indicador de nivel bajo del Dep 1 en Scada
SCD_Dep2_H	EBOOL	%M4	Indicador de nivel alto del Dep 2 en Scada
SCD_Dep2_L	EBOOL	%M5	Indicador de nivel bajo del Dep 2 en Scada
SCD_Dep3_H	EBOOL	%M6	Indicador de nivel alto del Dep 3 en Scada
SCD_Dep3_Nivel Nivel	REAL	%MW12	Muestra el nivel del depósito de control en % en Scada
SCD_DepositoVacio	EBOOL	%M7	Indicador de depósito de cebado vacío en Scada
SCD_Detec_estadistica	EBOOL	%M39	Detección de anomalías estadística activa.
SCD_Detec_y_estim	EBOOL	%M38	Detección de anomalías por y estimada activa
SCD_Deteccion	EBOOL	%M35	Activación del proceso de detección de anomalías.
SCD_E	REAL	%MW1762	Ajuste de la zona que determina la detección
SCD_Electrovalvula	EBOOL	%M25	Activación de la electroválvula desde el Scada
SCD_Error_Canal	EBOOL	%M8	Indicador de fallo de comunicación del autómatas en Scada
SCD_Estado_FV11	REAL	%MW14	Apertura real en % de la válvula del circuito de calentamiento
SCD_Estado_FV21	REAL	%MW16	Apertura real en % de la válvula de vaciado del Dep3
SCD_Estado_FV22	REAL	%MW18	Apertura real en % de la válvula de llenado del Dep3
SCD_Estado_FV31	REAL	%MW20	Apertura real en % de la válvula del circuito de enfriamiento
SCD_Fallo_Arranque_Bomba	EBOOL	%M9	Indicador de fallo en el arranque de la bomba en Scada
SCD_Fallo_Arranque_Calentador	EBOOL	%M10	Indicador de fallo en el arranque del calentador en Scada
SCD_Fallo_Arranque_Circuladora	EBOOL	%M11	Indicador de fallo en el arranque de la circuladora en Scada

Nombre	Tipo	Dirección	Descripción
SCD_Gain_Scheduling	EBOOL	%M33	Variable de selección de modo PID en Gain Scheduling en Scada
SCD_Index	INT	%MW1768	Índice de almacenamiento de parámetros de PID p
SCD_KC_relay	REAL	%MW1764	Ganancia crítica del lazo de control de nivel
SCD_Kp	REAL	%MW22	Constante proporcional del regulador PID simple
SCD_Lambda	REAL	%MW42	Factor de olvido del método RLS
SCD_Marcha_Bomba	EBOOL	%M12	Botón de arranque de la bomba desde el Scada
SCD_Marcha_Calentador	EBOOL	%M13	Botón de arranque del calentador desde el Scada
SCD_Marcha_Circuladora	EBOOL	%M14	Botón de arranque de la circuladora desde el Scada
SCD_Media	ARRAY[1..3] OF REAL	%MW240	Media de los valores de aprendizaje
SCD_OBT_Param	EBOOL	%M34	Variable de selección de obtención de parámetros de PID en Scada
SCD_Param_PID	ARRAY [1..3,1..30] OF REAL	%MW1440	Almacén de los parámetros de control optimizados
SCD_PID	EBOOL	%M28	Variable de selección de modo PID en Auto en Scada
SCD_Presion	REAL	%MW24	Lectura de presión mostrada en el Scada
SCD_Presostato	EBOOL	%M15	Indicador de salto del presostato en Scada (NC)
SCD_Sel.Modos	INT	%MW1900	Selector de modo de cálculo de parámetros
SCD_Selec_Auto_Calent	EBOOL	%M16	Selector del calentador del panel de mando
SCD_Selec_Auto_Circ	EBOOL	%M17	Selector de la circuladora del panel de mando
SCD_Seta_Emergencia	EBOOL	%M20	Indicador de activación de la seta de emergencia en el Scada (NC)
SCD_Sobrenivel	EBOOL	%M21	Indicador de llenado de alguno de los depósitos en Scada
SCD_TC_relay	REAL	%MW1766	Tiempo de oscilación natural del lazo de control de nivel
SCD_Td	REAL	%MW26	Constante derivativa del PID simple
SCD_Temp_Caliente	REAL	%MW28	Indicador de la temperatura del circuito de agua caliente en Scada

Nombre	Tipo	Dirección	Descripción
SCD_Temp_ Fria	REAL	%MW30	Indicador de la temperatura del circuito de agua fría en Scada
SCD_Temp_ Proceso	REAL	%MW32	Indicador de la temperatura del circuito de agua de proceso en Scada
SCD_Term_ Bomba	EBOOL	%M22	Indicador de activación del térmico de la bomba en Scada
SCD_Term_ Calentador	EBOOL	%M23	Indicador de activación del térmico del calentador en Scada
SCD_Term_ Circuladora	EBOOL	%M24	Indicador de activación del térmico de la circuladora en Scada
SCD_Ti	REAL	%MW34	Constante integral del PID simple
SCD_Velocidad_ Variador	INT	%MW46	Valor entero de la consigna del variador
SCD_y_estimada	REAL	%MW264	Valor de nivel estimado.
UXL_G	ARRAY[1..3] OF REAL		Parámetros obtenidos para el ajuste por polos
UXL_G_inicial	ARRAY[1..3] OF REAL		Parámetros iniciales de control por polos
UXL_P	ARRAY [1..3,1..3] OF REAL		Matriz de cálculo de parámetros obtenida
UXL_P_inicial	ARRAY [1..3,1..3] OF REAL		Valor inicial de la matriz de cálculo de parámetros por polos
UXL_Salida_ Variador	REAL		Valor real de velocidad al variador

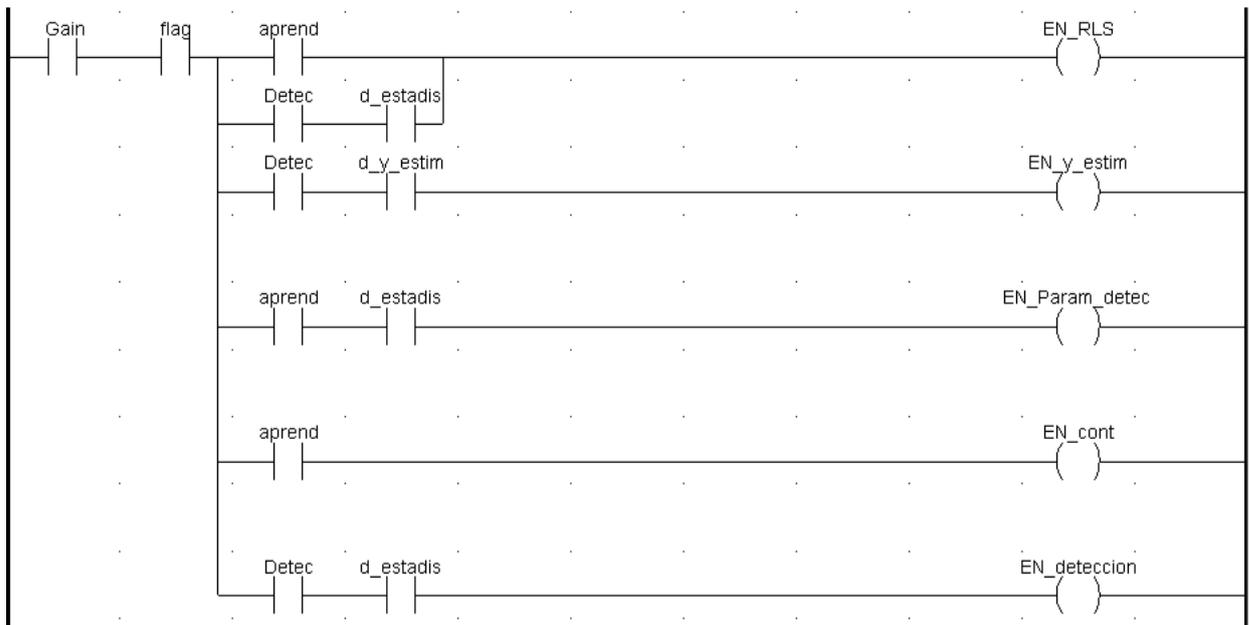
11.2. Bloques de función derivados

11.2.1. Activ_detec

Este es un bloque de función auxiliar que indica la activación de cada función de detección en función del tipo de detección seleccionada y de la fase de detección. Se utiliza para simplificar la visualización de la programación en la sección «PID».

11.2.1.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Activ_Detec		<DFB>	
<entradas>			
aprend	1	EBOOL	Aprendizaje
detec	2	EBOOL	Detección
d_y_estim	3	EBOOL	Detección y estimada
d_estadis	4	EBOOL	Detección estadística
flag	5	EBOOL	Flag de tiempo
Gain	6	EBOOL	Activado Gain Scheduling
<salidas>			
EN_RLS	1	EBOOL	Identificación
EN_y_estim	2	EBOOL	Detec. y estimada
EN_cont	3	EBOOL	Contador
EN_Param_detec	4	EBOOL	Aprend. estadístico
EN_deteccion	5	EBOOL	Detección estadística
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
<secciones>			
Activ_Detec		<LD>	

11.2.1.2. Sección

11.2.2. Calc_indice

Calcula el índice de la región para el control mediante Gain Scheduling en función de 3 valores de entrada.

11.2.2.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Calc_indice		<DFB>	
<entradas>			
EV	1	EBOOL	Electroválvula
FV21	2	REAL	Válvula descarga
Nivel	3	REAL	Consigna nivel
<salidas>			
OUT_index	1	INT	Índice de región
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
j		INT	Contador
<secciones>			
Calc_indice		<ST>	

11.2.2.2. Sección

```

j:=0;
IF Nivel<20.0 then
  j:=1;
ELSIF Nivel<40.0 then
  j:=2;
ELSIF Nivel<60.0 then
  j:=3;
ELSIF Nivel<80.0 then
  j:=4;
ELSE
  j:=5;
END_IF;

IF FV21<33.3 then
  j:=j+0;
ELSIF FV21<66.66 then
  j:=j+5;
ELSE

```

```
    j:=j+10;  
END_IF;  
  
IF EV=0 then  
    j:=j+0;  
ELSE  
    j:=j+15;  
END_IF;  
  
OUT_Index:=j;
```

11.2.3. Deteccion_estad

Calcula la distancia de Mahalanobis de un grupo de datos con respecto a la media y la covarianza de una muestra previa y la compara con un valor determinado. Si la distancia es mayor que este valor, se establece la salida «Anom» a verdadero.

11.2.3.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Deteccion_estad		<DFB>	
<entradas>			
MEAN_in	1	ARRAY [1..3] OF REAL	Media
Covar_in	2	ARRAY [1..3,1..3] OF REAL	Covarianza
a1	3	REAL	Identificación a1
a2	4	REAL	Identificación a2
b1	5	REAL	Identificación b1
E	6	REAL	Umbral
Ind	7	INT	Índice de región
Cont	8	INT	Num datos aprend.
<salidas>			
Anom	1	EBOOL	Anomalía
p_x_out	2	REAL	Distancia
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
i		INT	
j		INT	
INV		ARRAY [1..3,1..3] OF REAL	Inversa 3x3
det		REAL	Determinante
PARAM		ARRAY [1..3] OF REAL	Datos escalados
EXP		REAL	Auxiliar
P_X		REAL	Distancia
ind_1		INT	Región previa
<secciones>			
Deteccion_estad		<ST>	

11.2.3.2. Sección

(*Función de detección de anomalías. Se calcula la distancia de Mahalanobis de un dato con respecto a la media y la covarianza de una muestra. Si esta es superior a un valor dado, los datos se corresponden con una anomalía.*)

EXP:=0.0;

PARAM[1]:=-100.0*a1;

PARAM[2]:=100.0*a2;

PARAM[3]:=100000.0*b1;

AUX[1]:=0.0;

AUX[2]:=0.0;

AUX[3]:=0.0;

signo:=-1.0;

(*Sólo se calculan determinante y matriz una vez para cada región*)

IF ind<>ind_1 then

(*Cálculo del determinante de la covarianza*)

det:=COVAR.IN[1,1]*COVAR.IN[2,2]*COVAR.IN[3,3]+COVAR.IN[1,2]*COVAR.IN[2,3]*COVAR.IN[3,1]*2.0;

det:=det-COVAR.IN[1,1]*(COVAR.IN[2,3]**2.0)-COVAR.IN[2,2]*(COVAR.IN[1,3]**2.0)-COVAR.IN[3,3]*(COVAR.IN[1,2]**2.0);

(*Matriz inversa de la covarianza*)

INV[1,1]:=(COVAR.IN[2,2]*COVAR.IN[3,3]-COVAR.IN[3,2]*COVAR.IN[2,3])/det;

INV[1,2]:=(-COVAR.IN[1,2]*COVAR.IN[3,3]+COVAR.IN[1,3]*COVAR.IN[3,2])/det;

INV[1,3]:=(COVAR.IN[1,2]*COVAR.IN[2,3]-COVAR.IN[1,3]*COVAR.IN[2,2])/det;

INV[2,1]:= INV[1,2];

INV[2,2]:=(COVAR.IN[1,1]*COVAR.IN[3,3]-COVAR.IN[1,3]*COVAR.IN[3,1])/det;

INV[2,3]:=(-COVAR.IN[1,1]*COVAR.IN[2,3]+COVAR.IN[1,3]*COVAR.IN[2,1])/det;

INV[3,1]:= INV[1,3];

INV[3,2]:= INV[2,3];

INV[3,3]:=(COVAR.IN[1,1]*COVAR.IN[2,2]-COVAR.IN[1,2]*COVAR.IN[2,1])/det;

ind_1:=ind;

end_if;

FOR i:=1 to 3 do

 for j:=1 to 3 do

 EXP:=EXP+INV[i,j]*(PARAM[i]-MEAN.IN[i])*(PARAM[j]-MEAN.IN[j]);

 End_for;

End_for;

IF (EXP<0.0) THEN

 P_X:=E+1.0;

ELSE

 P_X:=SQRT(EXP); (*Distancia de Mahalanobis*)

END_IF;

IF P_X>E THEN

 Anom:=TRUE;

ELSE

 Anom:=FALSE;

```
END.IF;  
p_x_out:=p_x;
```

11.2.4. Deteccion_y_estim

Calcula el valor estimado de la salida en función de los valores de identificación de la planta, y de los valores de «y» y «u». También compara el valor estimado en el paso de tiempo anterior con el valor real de «y», y si la diferencia en valor absoluto supera un valor máximo determinado («E»), se establece la salida «Anomalia» a verdadero.

11.2.4.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Deteccion_y_estim		<DFB>	
<entradas>			
y	1	REAL	Valor real
G_in	2	ARRAY [1..3] OF REAL	Identificación
E	3	REAL	Umbral
y_estim_in	4	REAL	Y estimada
u	5	REAL	Actuación
<salidas>			
Anomalia	1	EBOOL	Anomalia
y_estim_out	2	REAL	Y estimada
error_out	3	REAL	Error
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
y_1		REAL	Y anterior
<secciones>			
Deteccion_y_estim		<ST>	

11.2.4.2. Sección

(*Función de detección de anomalías basado en la comparación entre la salida real y la esperada*)

```

IF (y_1 <> 0.0) THEN
  y_estim_out := G_in[1]*100.0*(-y)+G_in[2]*(-y_1)+G_in[3]*u;
  (*Detección de anomalías*)
  IF (abs((y_estim_in-y)*100.0/y)>E) THEN
    anomalia:= true;
  ELSE
    anomalia:= false;
  END_IF;
  error_out:=abs((y_estim_in-y)*100.0/y);
ELSE

```

```
    y_estim_out:=y;  
    anomalia:=false;  
END_IF;  
y_1:=100.0*y;
```

11.2.5. Medias_elementos_G

Calcula la media de los 10 últimos elementos de un vector de 3 dimensiones que se introduce por pantalla si la variable «ON_OFF» es verdadera. Si no es así, devuelve los mismos valores de entrada.

11.2.5.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Medias_elementos_G		<DFB>	
<entradas>			
G_in	1	ARRAY [1..3] OF REAL	Identificación
ON_OFF	2	EBOOL	Activación
<salidas>			
G_media	1	ARRAY [1..3] OF REAL	
a1	2	REAL	Identificación a1
a2	3	REAL	Identificación a2
b1	4	REAL	Identificación b1
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
AUX		ARRAY [1..10] OF REAL	Auxiliar
i		INT	
j		INT	
Sum		ARRAY [1..3] OF REAL	Suma
<secciones>			
Seccion_medias		<ST>	

11.2.5.2. Sección

(* Cálculo de valores medios de parámetros a y b *)

(* La matriz AUX acumula los últimos 10 valores *)

```

IF ON_OFF =1 THEN
  (* Actualización de la matriz *)
  for j:=1 to 9 do
    for i:=1 to 3 do
      AUX[i , j ]:=AUX[i , j +1];
    end_for;
  end_for;

```

```
for i:=1 to 3 do
  AUX[i,10]:=G_in[i];
  Sum[i]:=0.0;
end_for;

(*Suma de los 10 términos*)
for j:=1 to 10 do
  for i:=1 to 3 do
    Sum[i]:=AUX[i,j]+Sum[i];
  end_for;
end_for;

(*Cálculo de media*)

for i:=1 to 3 do
  G_media[i]:=Sum[i]/10.0;
end_for;
ELSE
  for i:=1 to 3 do
    G_media[i]:=G_in[i];
  end_for;
END_IF;

a1:=G_media[1];
a2:=G_media[2];
b1:=G_media[3];
```

11.2.6. Obt_param_Relay

Calcula la ganancia crítica y el periodo crítico de la planta durante un proceso de control mediante el método Relay-Feedback. Este bloque también devuelve los parámetros de PID calculados a partir de la ganancia y período críticos calculados y del valor de la variable «SEL.MODO», que permite actualizar los parámetros del PID en función del tipo de respuesta deseada.

11.2.6.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Obt_Param_Relay		<DFB>	
<entradas>			
clear	1	EBOOL	Borrar
AUX_100ms	2	EBOOL	Flag de tiempo
SP	3	REAL	Consigna
PV	4	REAL	Valor real
SEL.MOD	5	INT	Selector de modo
<salidas>			
OUT_Tc	1	REAL	Período crítico
OUT_Kc	2	REAL	Ganancia crítica
OUT_Kp	3	REAL	Ganancia proporcional
OUT_Ti	4	REAL	Constante integral
OUT_Td	5	REAL	Constante derivativa
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
Cont		REAL	Contador
START		EBOOL	Inicio contaje
STOP		EBOOL	Parada contaje
Max		REAL	Máximo
Min		REAL	Mínimo
<secciones>			
Obt_Param_Relay		<ST>	

11.2.6.2. Sección

(*Bloque de función de cálculo de parámetros de PID mediante Relay-Feedback*)
 IF (CLEAR=1) THEN

```
START:=0;
STOP:=0;
CONT:=0.0;
END_IF;

if RE(AUX_100ms) then

IF (PV>SP+5.0) THEN
  IF (STOP=0) THEN
    START:=1;
    CONT:=0.0;
  ELSE
    START:=0;
  END_IF;
ELSIF (PV<SP-5.0) THEN
  IF (START=1) THEN
    STOP:=1;
  END_IF;
END_IF;

(* Contador de tiempo *)
IF START=1 THEN
  CONT:=CONT+0.1;
END_IF;

(* Cálculo de máximos y mínimos para cálculo de amplitud *)
IF (PV>Max) THEN
  Max:=PV;
ELSIF (PV<Min) THEN
  Min:=PV;
END_IF;

(* Cálculo de parámetros finales *)
IF START=0 AND STOP=1 THEN
  OUT_TC:=CONT;
  OUT_KC:=4.0*5000.0/(3.1416*100.0*sqrt((Max-Min)**2-(5.0)**2));
  CASE SEL_MOD OF
    0: OUT_KP:=OUT_KC*0.6;
      OUT_TI:=OUT_TC*0.5;
      OUT_TD:=OUT_TC*0.125;

    1: OUT_KP:=OUT_KC*0.33;
      OUT_TI:=OUT_TC*0.5;
      OUT_TD:=OUT_TC*0.333;

    2: OUT_KP:=OUT_KC*0.2;
      OUT_TI:=OUT_TC*1.0;
      OUT_TD:=OUT_TC*0.333;

    3: OUT_KP:=OUT_KC*2.9;
```

```
    OUT_TI:=OUT.TC*2.25;  
    OUT_TD:=OUT.TC/10.0;  
  END.CASE;  
END.IF;  
END.IF;
```

11.2.7. Param_detec

Bloque de función derivado que calcula la media y la covarianza en cada instante de tiempo de los valores introducidos en «a1», «a2» y «b1».

11.2.7.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Param_detec		<DFB>	
<entradas>			
a1	1		Identificación a1
a2	2		Identificación a2
b1	3		Identificación b1
Mean_in	4	ARRAY [1..3] OF REAL	Media
Covar_in	5	ARRAY [1..3,1..3] OF REAL	Covarianza
Cont	6	INT	Contador
<salidas>			
Mean_out	1	ARRAY [1..3] OF REAL	Media
Covar_out	2	ARRAY [1..3,1..3] OF REAL	Covarianza
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
Mean		ARRAY [1..3] OF REAL	Media
Covar		ARRAY [1..3,1..3] OF REAL	Covarianza
p_a1	1		Escalado a1
p_a2	1		Escalado a2
p_b1	1		Escalado b1
<secciones>			
Param_detec		<ST>	

11.2.7.2. Sección

(* Cálculo de la media de los valores de aprendizaje *)

```
p_a1 := -100.0 * a1;
```

```
p_a2 := 100.0 * a2;
```

```
p_b1 := 100000.0 * b1;
```

```
if (Cont=1) then
```

```
    Mean_out[1] := p_a1;
```

```
    Mean_out[2] := p_a2;
```

```
    Mean_out[3] := p_b1;
```

```
    FOR i := 1 TO 3 DO
```

```
FOR j:=1 TO 3 DO
    Covar_out[i , j]:=0.0;
END.FOR;
END.FOR;
ELSE
Mean[1]:=(p_a1+Mean_in[1]*int_to_real(Cont-1))/int_to_real(Cont);
Mean[2]:=(p_a2+Mean_in[2]*int_to_real(Cont-1))/int_to_real(Cont);
Mean[3]:=(p_b1+Mean_in[3]*int_to_real(Cont-1))/int_to_real(Cont);

(* Cálculo de la covarianza de los datos *)
Covar[1 , 1]:=(p_a1**2)+(Covar_in[1 , 1]+Mean_in[1]**2)*int_to_real(Cont-1);
Covar[1 , 2]:=(p_a1*p_a2)+(Covar_in[1 , 2]+Mean_in[1]*Mean_in[2])*int_to_real(Cont-1);
Covar[1 , 3]:=(p_a1*p_b1)+(Covar_in[1 , 3]+Mean_in[1]*Mean_in[3])*int_to_real(Cont-1);
Covar[2 , 1]:=Covar[1 , 2];
Covar[2 , 2]:=(p_a2**2)+(Covar_in[2 , 2]+Mean_in[2]**2)*int_to_real(Cont-1);
Covar[2 , 3]:=(p_a2*p_b1)+(Covar_in[2 , 3]+Mean_in[2]*Mean_in[3])*int_to_real(Cont-1);
Covar[3 , 1]:=Covar[1 , 3];
Covar[3 , 2]:=Covar[2 , 3];
Covar[3 , 3]:=(p_b1**2)+(Covar_in[3 , 3]+Mean_in[3]**2)*int_to_real(Cont-1);

FOR i:=1 TO 3 DO
    FOR j:=1 TO 3 DO
        Covar_out[i , j]:=Covar[i , j]/int_to_real(Cont)-Mean[i]*Mean[j];
    END.FOR;
    Mean_out[i]:=Mean[i];
END.FOR;
END.IF;
```

11.2.8. PID_SIMPLE

Bloque de función para el control de una variable «y» con un controlador PID actuando sobre una salida «u».

11.2.8.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
PID_SIMPLE		<DFB>	
<entradas>			
SP	1	REAL	Consigna
IN_Nivel	2	REAL	Valor real
AUX_100ms	3	EBOOL	Flag de tiempo
Kp	4	REAL	Constante proporcional
Ti	5	REAL	Constante integral
Td	6	REAL	Constante derivativa
Ts	7	REAL	Intervalo de tiempo
clear	8	EBOOL	Borrar
N	9	REAL	Límite derivativo
Lim_int	10	REAL	Anti-windup
<salidas>			
OUT	1	REAL	Salida a actuador
INTEG	2	REAL	Acumulación integral
DERIV	3	REAL	Acumulación derivativa
ERR	4	REAL	Error
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
e		REAL	Error
e_1		REAL	Error anterior
u		REAL	Salida
u_1		REAL	Salida anterior
i		REAL	Acumulación integral
i_1		REAL	Acum. integral anterior
d		REAL	Acumulación derivativa
d_1		REAL	Acum. derivativa anterior
c1		REAL	Constante c1
c2		REAL	Constante c2
c3		REAL	Constante c3

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
<secciones>			
PID_SIMPLE		<ST>	

11.2.8.2. Sección

```

IF CLEAR THEN
    e:=0.0;
    i:=0.0;
    d:=0.0;
    OUT:=0.0;
elsif RE(AUX_100ms) then
if SP=0.0 then
u:=0.0;
else

e_1:=e;
i_1:=i;
d_1:=d;

e:=SP*(100.0) – IN_Nivel*(100.0);
(* Control y cálculo de parámetros*)
IF (Ti>0.0)THEN
    c1:=Ts/(2.0*Ti);
ELSE
    c1:=0.0;
    i_1:=0.0;
END_IF;
IF (Td>0.0)THEN
    c2:=(2.0*Td)/((2.0*Td/N)+Ts);
    c3:=((2.0*Td/N)–Ts)/((2.0*Td/N)+Ts);
ELSE
    c2:=0.0;
    c3:=0.0;
END_IF;

i:=c1*(e+e_1)+i_1;
d:=c2*(e–e_1)+c3*d_1;

(* Control de saturación de parte integral*)
if i>lim_int then
    i:=lim_int;
elsif i<–10.0 then
    i:=–10.0;
end_if;

u:=Kp*(e+i+d);

```

```
end_if;
```

```
(*Limitaciones de protección de la bomba*)
```

```
if u<0.0 then
```

```
    u:=0.0;
```

```
elseif u>10000.0 then
```

```
    u:=10000.0;
```

```
end_if;
```

```
OUT:=u;
```

```
u_1:=u;
```

```
INTEG:=i_1;
```

```
DERIV:=d_1;
```

```
ERR:=e_1;
```

```
end_if;
```

11.2.9. Relay_Feedback

Bloque de control de variable «y» con un controlador de tipo relé con histéresis actuando sobre una salida «u».

11.2.9.1. Variables

Nombre	Nº	Tipo	Comentario
Relay_Feedback		<DFB>	
<entradas>			
Consigna	1	REAL	Consigna
IN	2	REAL	Valor real
<salidas>			
Variador	1		Salida a actuador
<entradas/salidas>			
<publico>			
<privado>			
h1		REAL	Histéresis 1
h2		REAL	Histéresis 2
<secciones>			
Relay_Feedback		<ST>	

11.2.9.2. Sección

```
(*Bloque de realización del método Relay-Feedback*)
h1:=Consigna-5.0; (*Valor inferior de histéresis*)
h2:=Consigna+5.0; (*Valor superior de histéresis*)
```

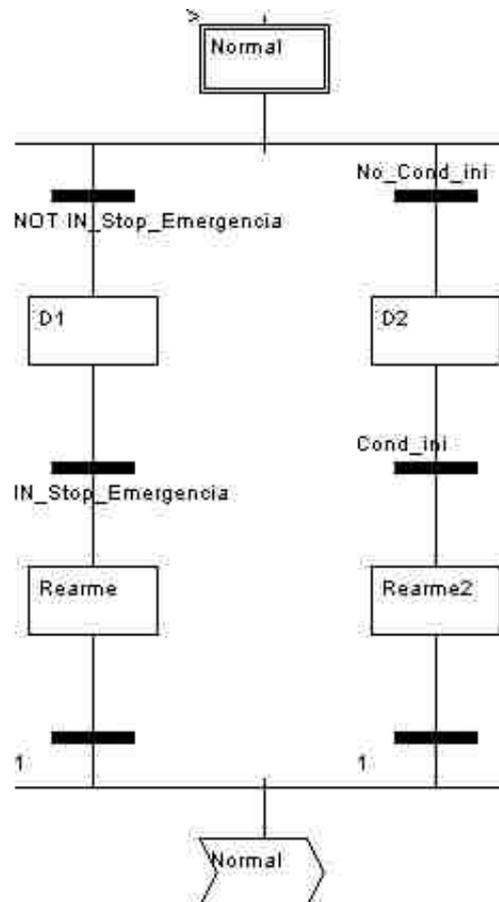
```
if IN<h1 then
    Variador:=10000;
elsif IN>h2 then
    Variador:=0;
end_if;
```

11.2.10. RLS

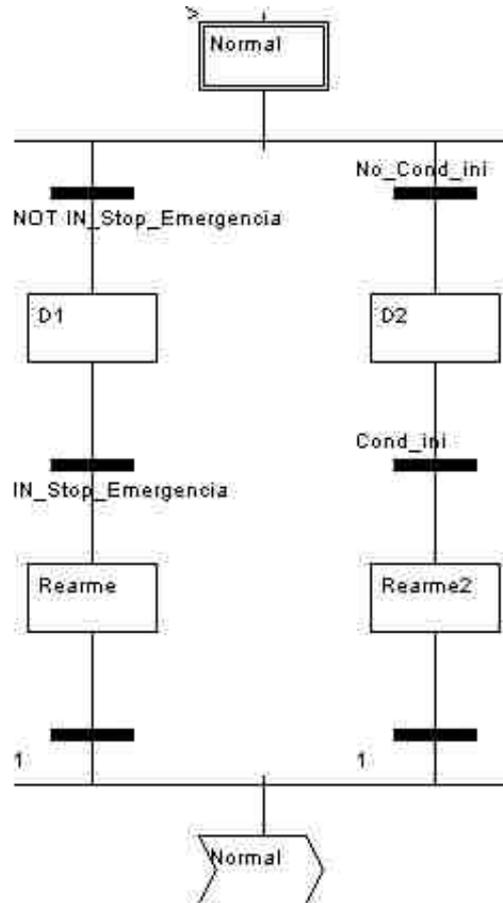
Este bloque se incluye en la programación sin modificaciones con respecto a la implementación previa, y ya ha sido comentado en la sección 9.1.1.

11.3. Secciones

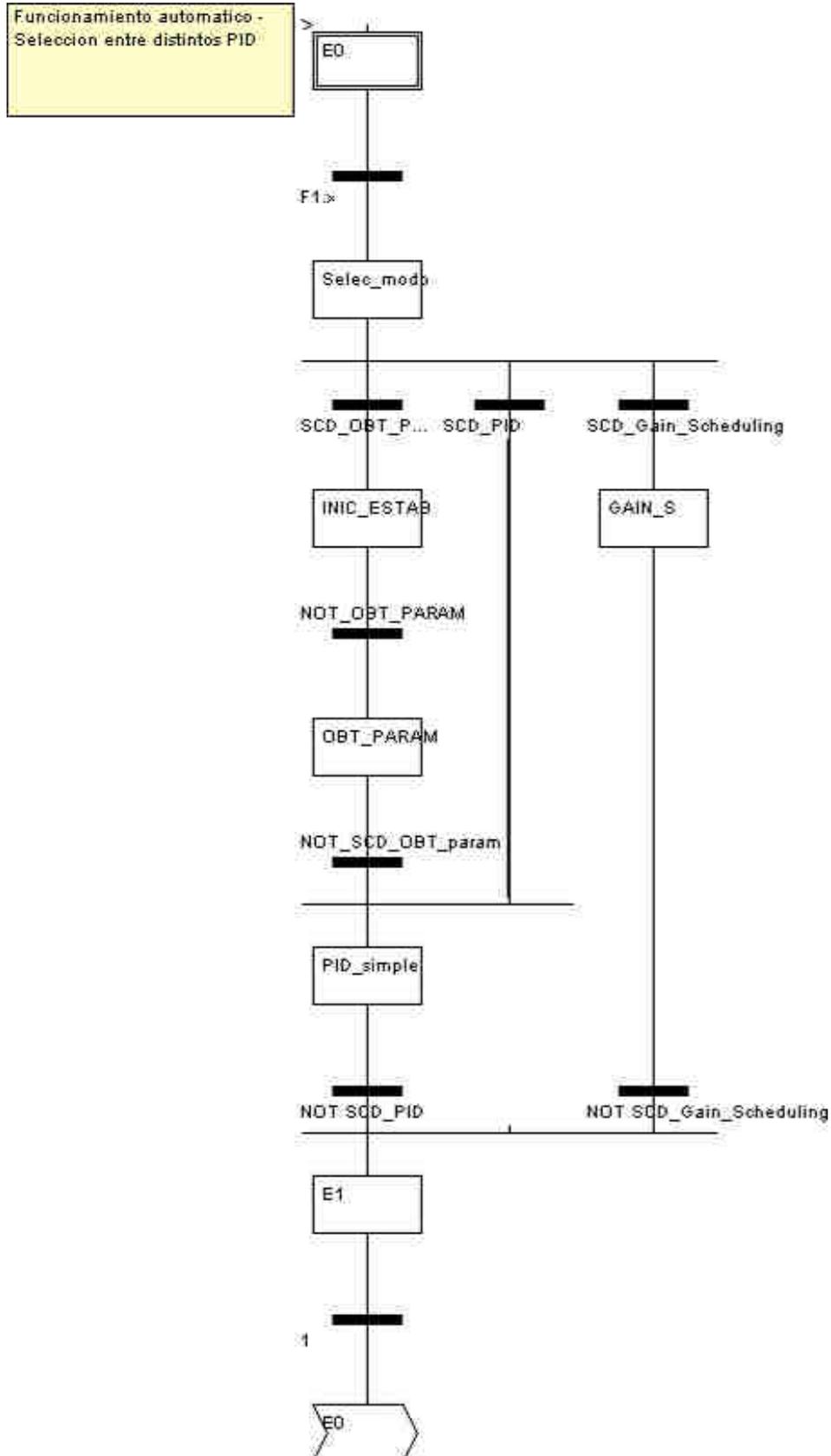
11.3.1. Seguridad



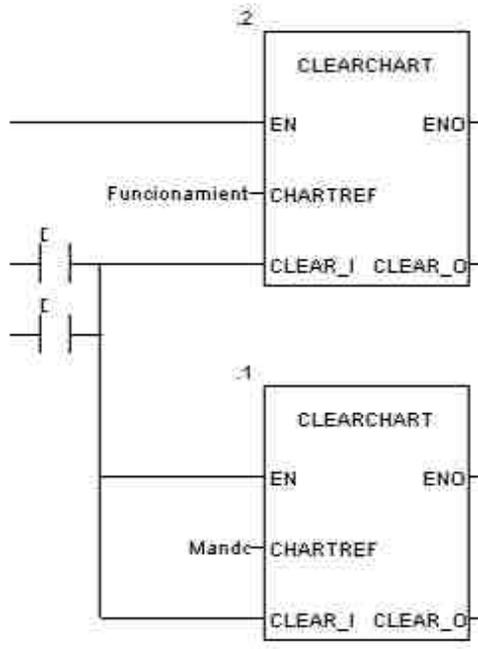
11.3.2. Mando



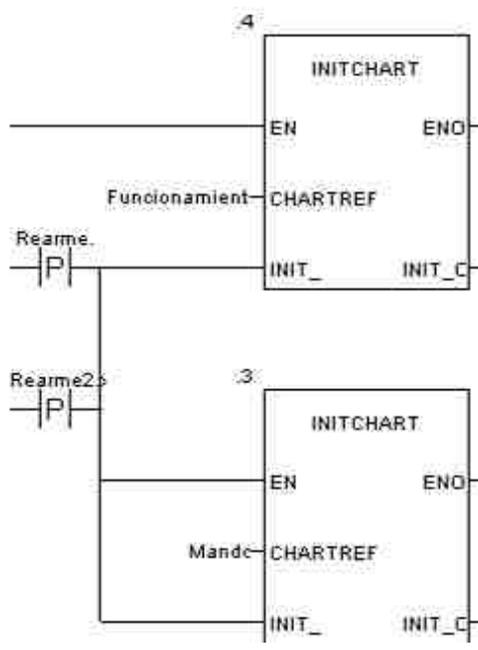
11.3.3. Funcionamiento



11.3.4. Acciones seguridad



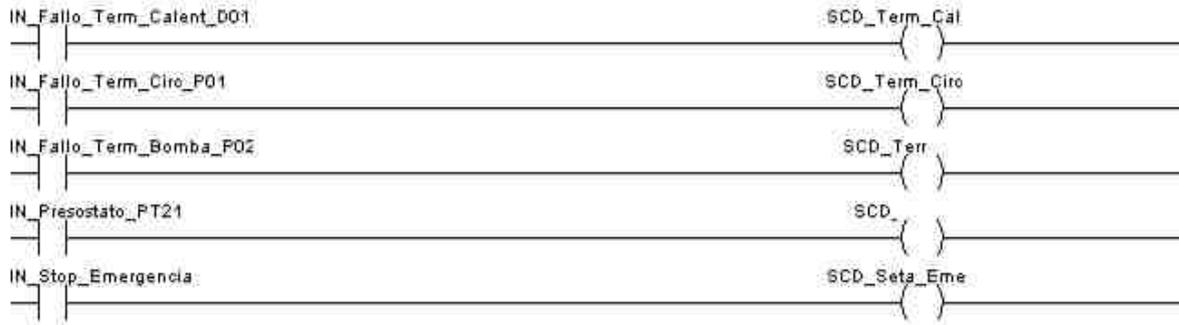
Desactivación de los gráficos de funcionamiento y mando en caso de pulsar la seta de emergencia.



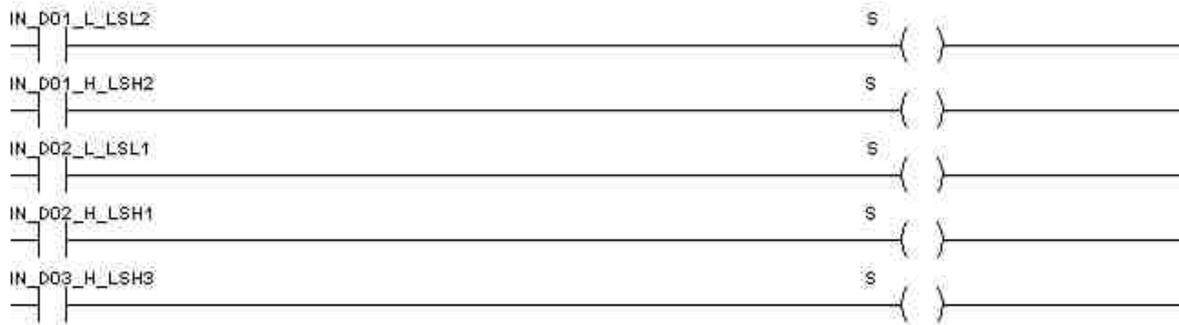
Tras el rearme se inicia el proceso normal en funcionamiento y en mando.

11.3.5. IN_SCADA

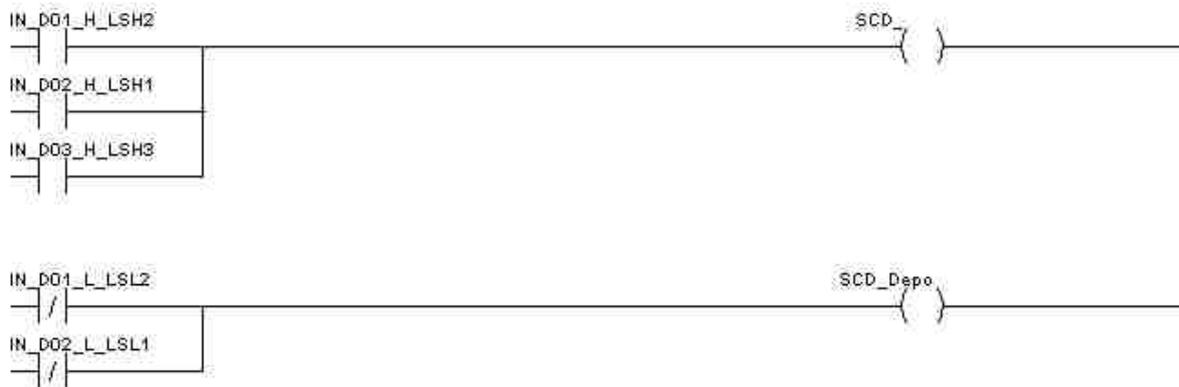
Protecciones



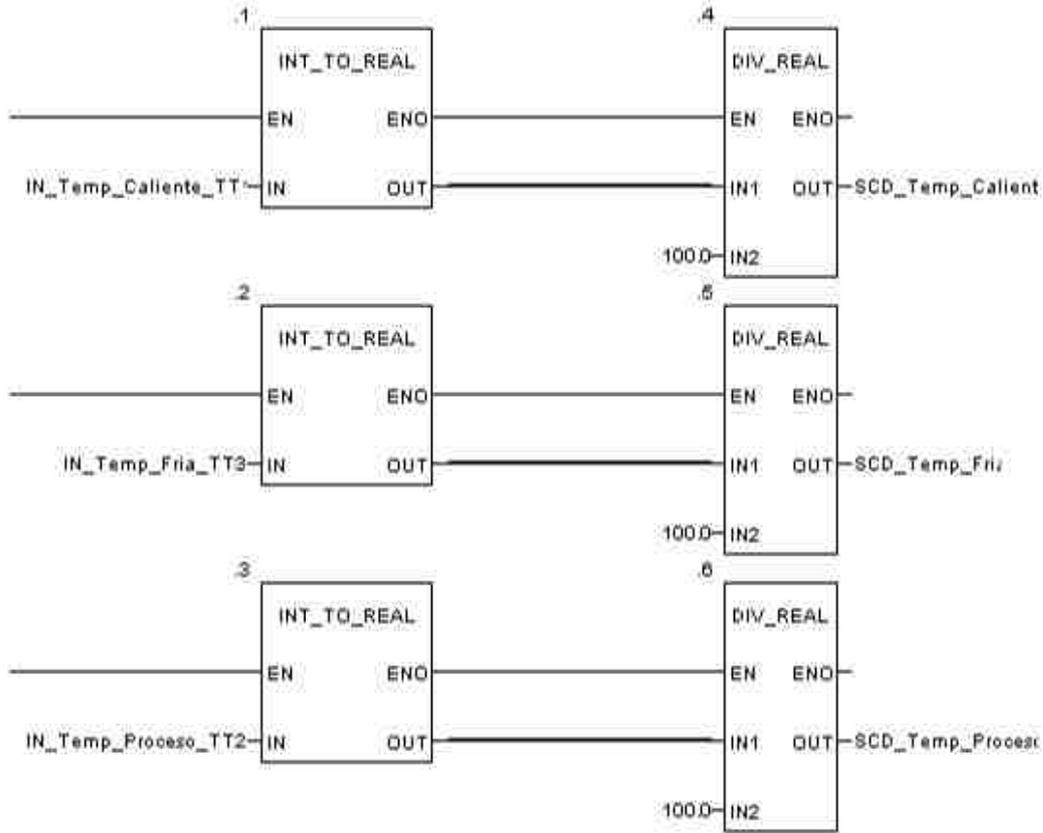
Sensores de nivel de depósitos



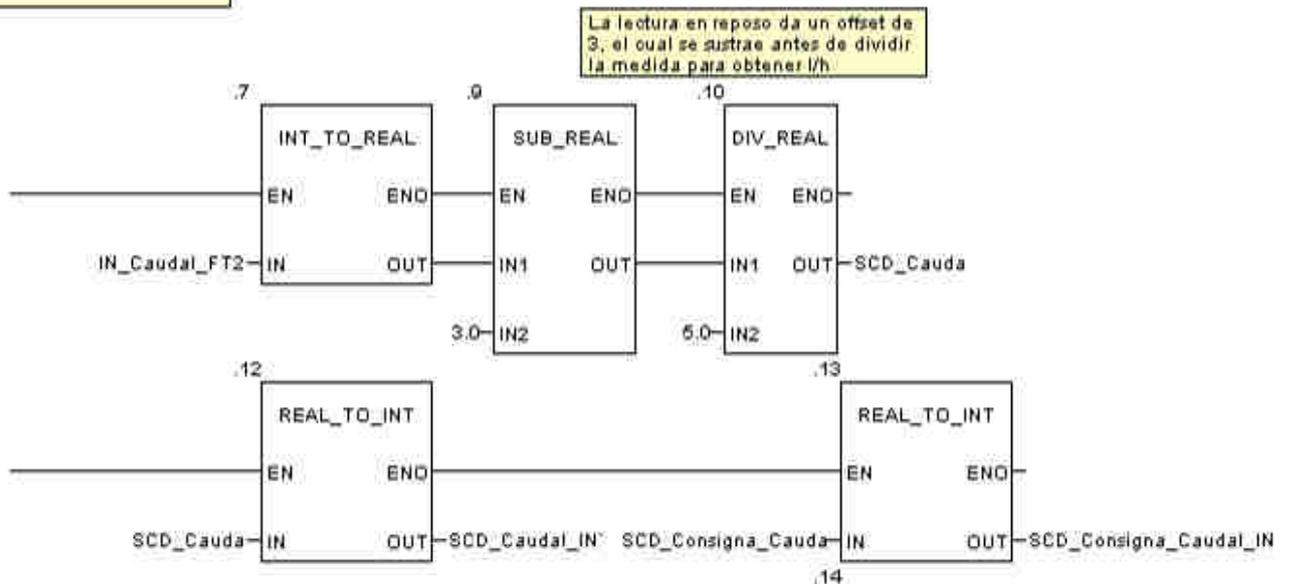
Avisos de nivel de depósitos

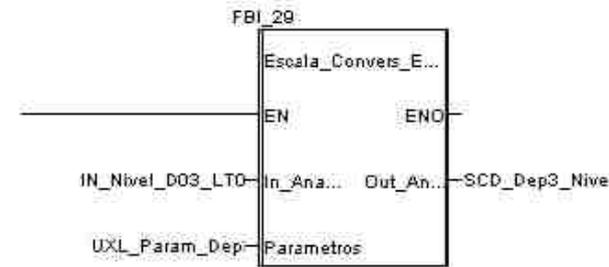
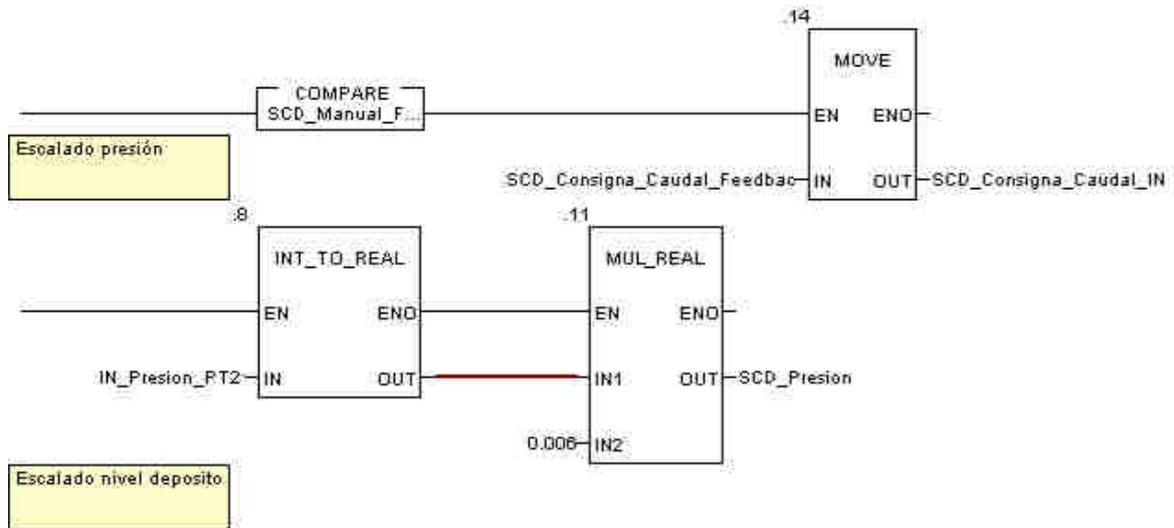


Escalado temperaturas

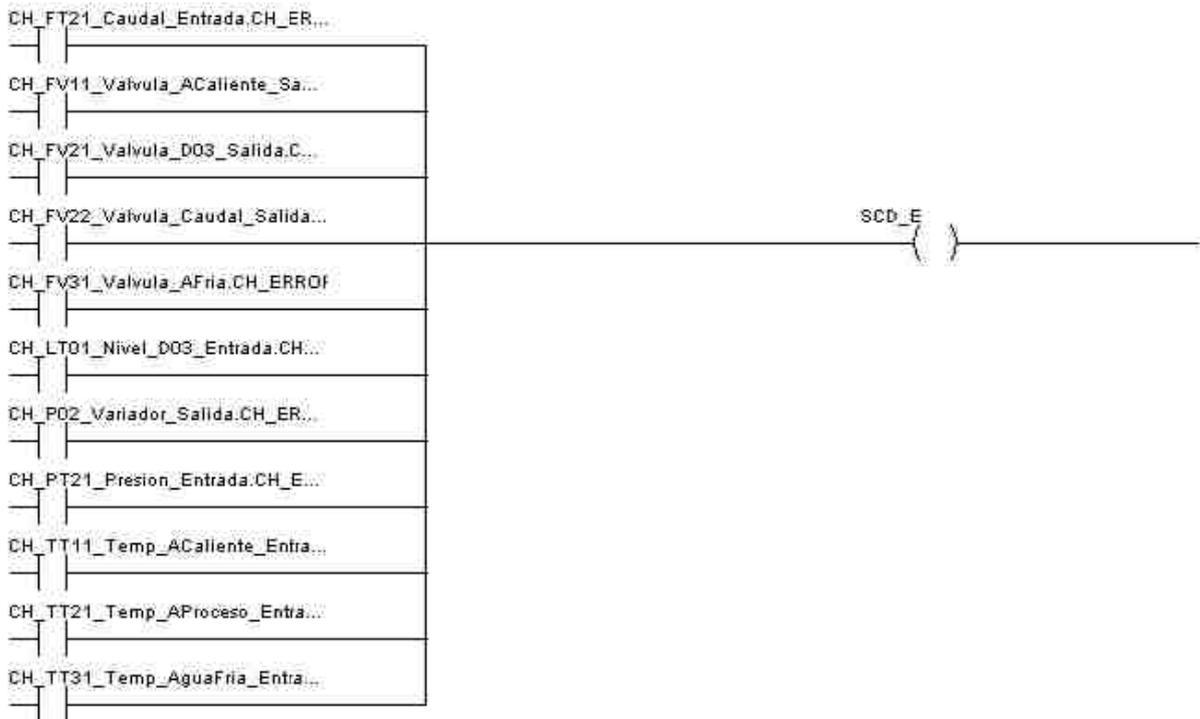


Escalado caudal

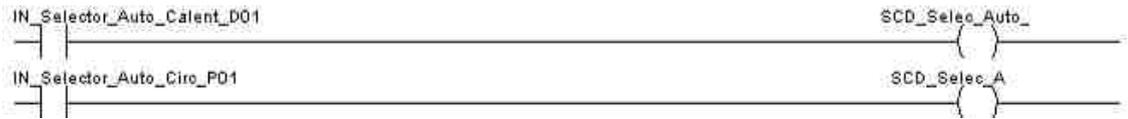




Control de error de comunicación en canales de sensores



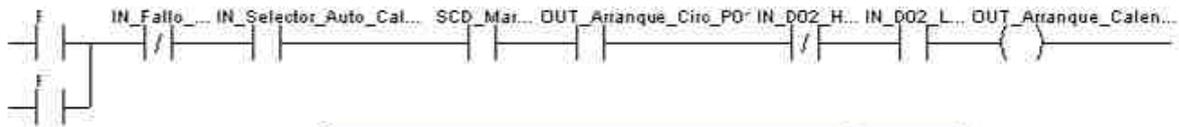
Selectores panel de mando



11.3.6. Acciones funcionamiento

Activación calentador

El calentador funcionará siempre que el depósito no esté con un nivel intermedio de agua y no haya fallo en el térmico y el selector de la planta esté en automático



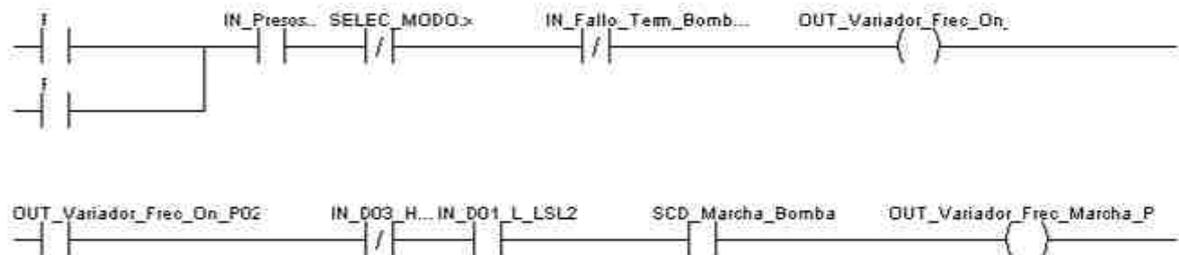
Protecciones de funcionamiento del calentador. Este no podrá funcionar sin circuladora activada, por lo que el interruptor activa ambos a la vez.

Activación circuladora



La circuladora se activará siempre que el térmico esté apagado y el selector de funcionamiento en automático

Activación bomba

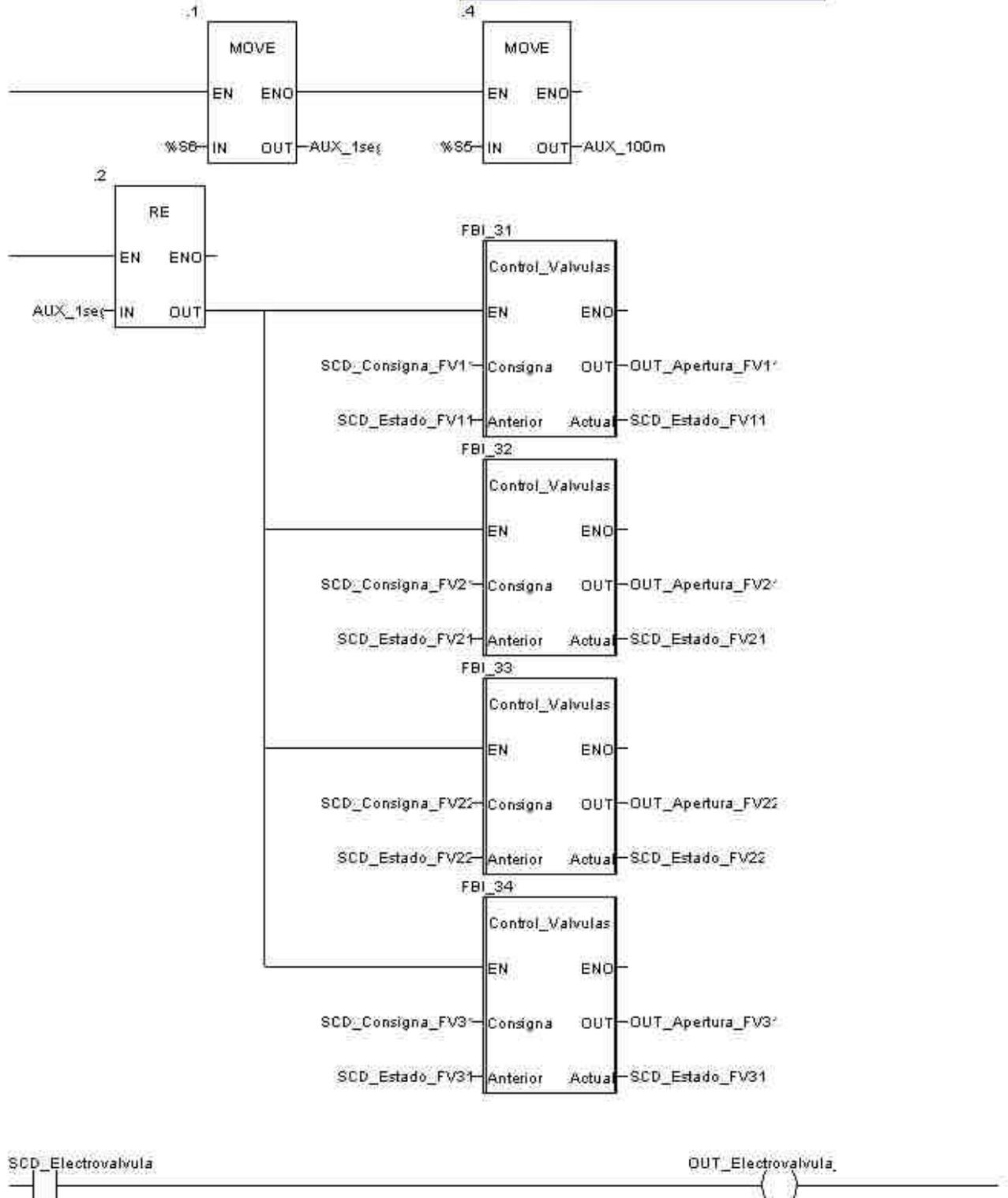


Confirmación funcionamiento actuadores

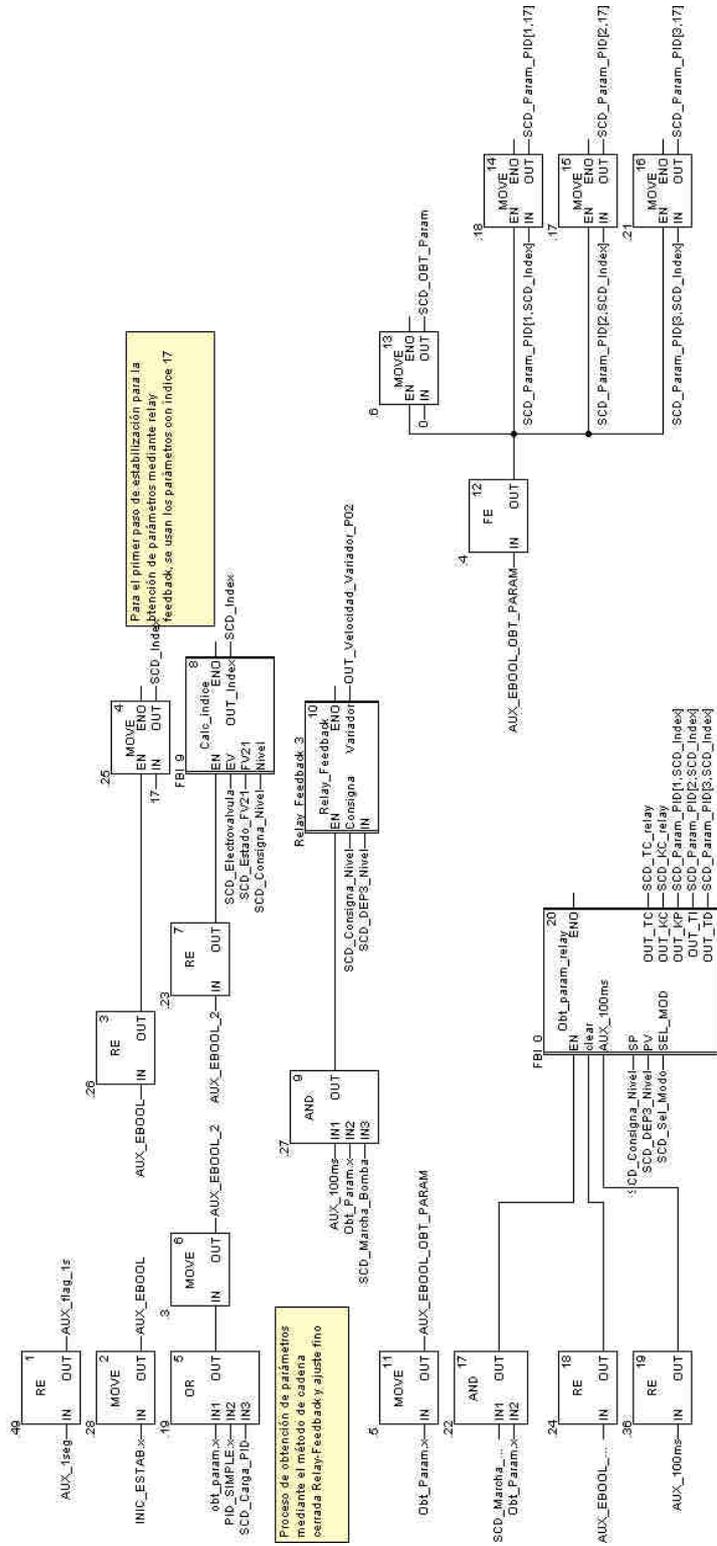


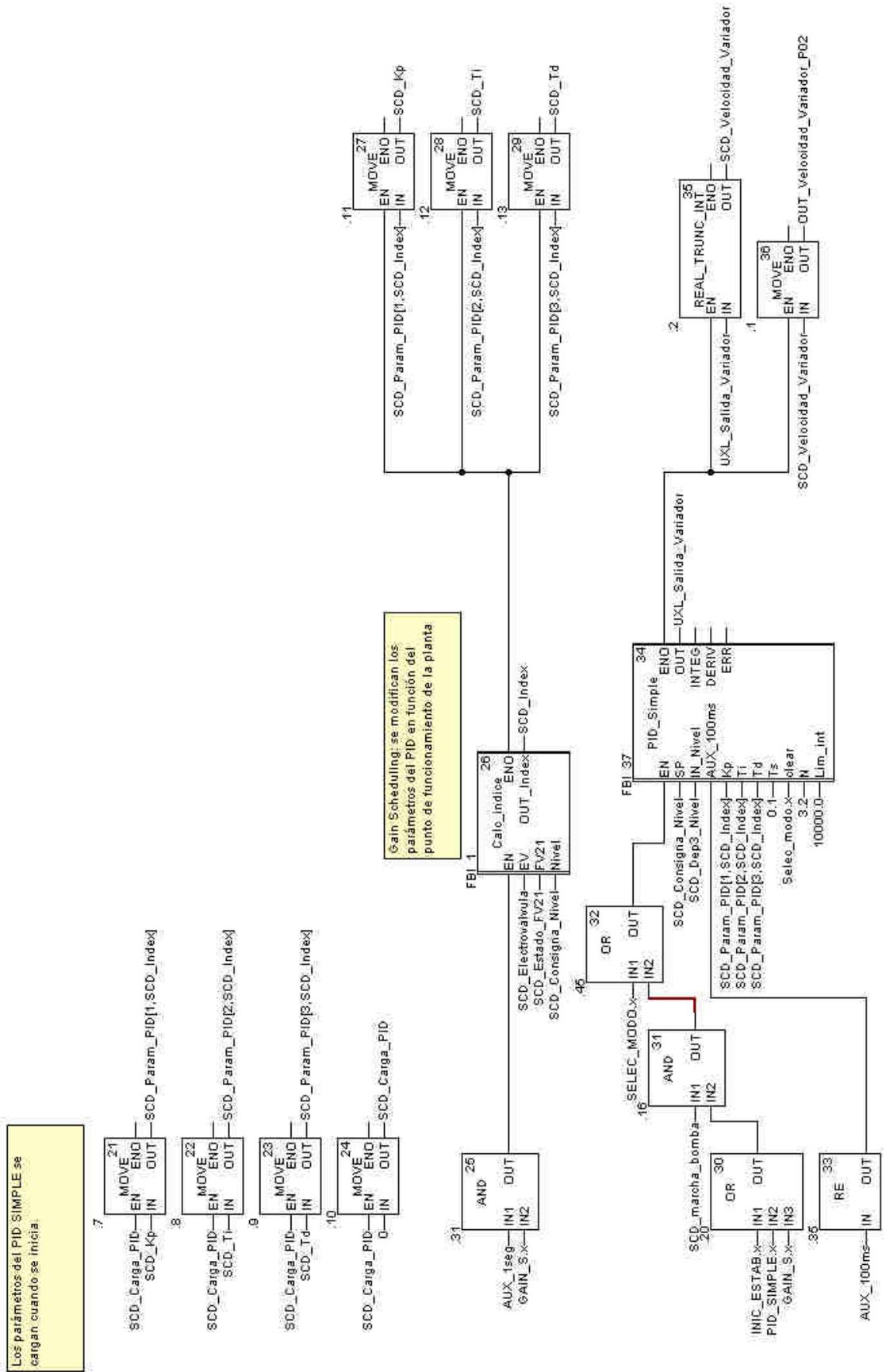
Control de apertura de las válvulas y lectura de estado

Las válvulas tardan un minuto en recorrer el rango completo de acción, así que cada segundo se actualiza su valor



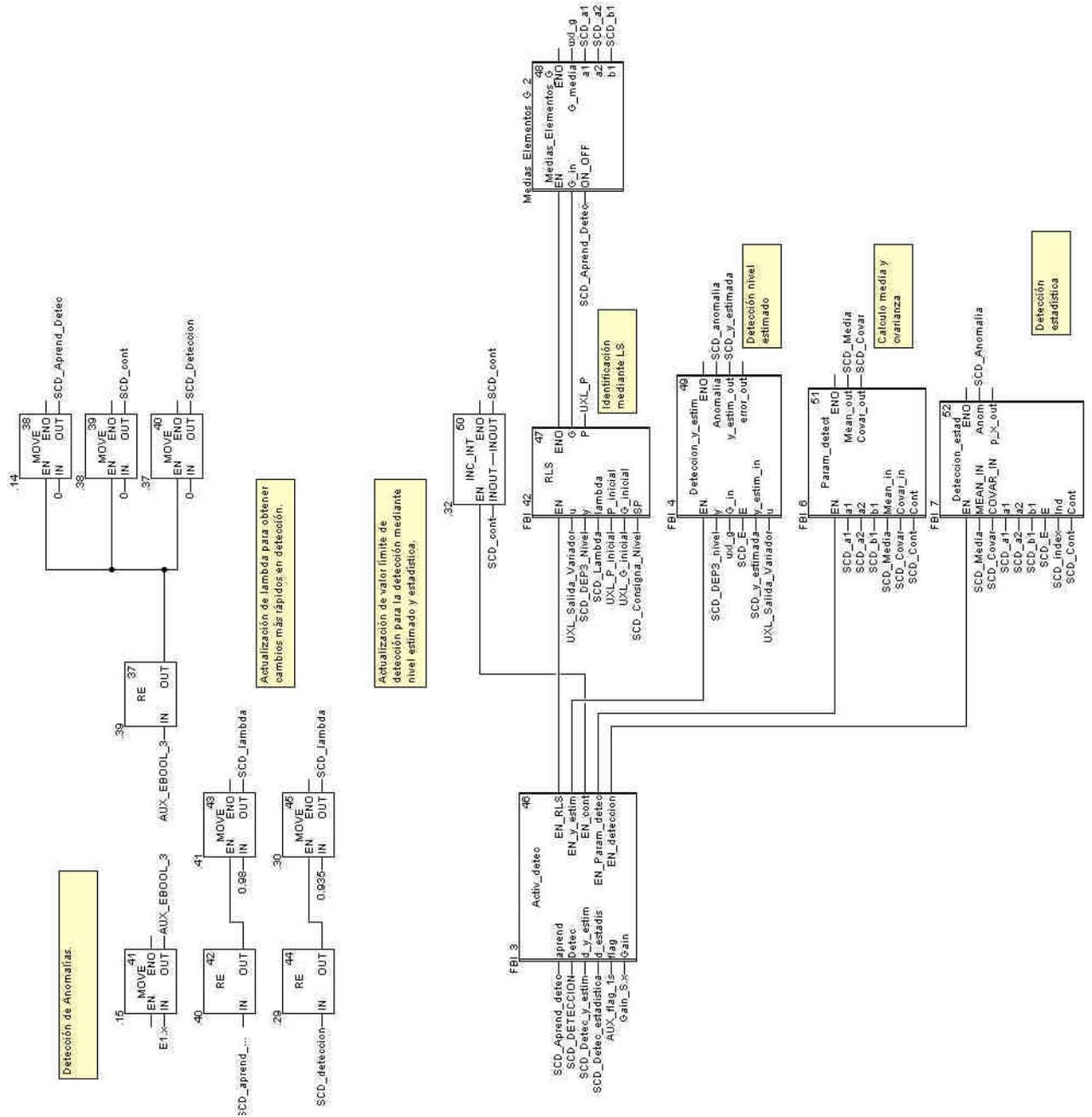
11.3.7. PID





Los parámetros del PID SIMPLE se cargan cuando se inicia.

Gain Scheduling: se modifican los parámetros del PID en función del punto de funcionamiento de la planta



12 Otros anexos

12.1. Guía de usuario

En la presente guía se detallarán las principales funcionalidades y opciones del programa SCADA para el control mediante Gain Scheduling y detección de anomalías de la Planta de Controles Varios situada en el laboratorio de Optimización y Control de la Escuela Universitaria Politécnica de Serantes.



Figura 12.1.0.1 – Planta de Controles Varios.

En primer lugar, antes de iniciar el programa de supervisión, es necesario realizar las siguientes comprobaciones:

1. Asegurarse de que la planta tiene agua suficiente en el depósito de suministro. El nivel de agua debería ser en torno a $3/4$ partes del tanque aproximadamente. En ningún caso el nivel con la planta parada deberá ser tal que active el detector de nivel de sobrellenado en dicho tanque.

2. La planta deberá estar conectada a la red eléctrica, y el interruptor general del cuadro de control deberá estar en posición vertical (planta energizada). Se puede comprobar su estado en el indicador luminoso anejo al interruptor.
3. Deberá existir conexión de red entre la planta y el ordenador de control. Se deberá comprobar si existe algún cable de red conectado al módulo de comunicación del PLC, y si no es así, será necesario conectarlo. La comunicación se puede realizar de modo puntual conectando directamente la planta y el ordenador de supervisión, o bien conectando la planta y el PC a través de una red local.

Una vez realizadas las comprobaciones iniciales, es posible iniciar el programa de supervisión y control. El programa está diseñado sobre el software de desarrollo de Schneider Electric llamado Vijeo Citect, en concreto con su versión v.7.2, por lo que es preciso abrir el explorador de Citect y seleccionar el proyecto correspondiente NOMBRE. Tras seleccionarlo, es posible arrancarlo pulsando la tecla F5 o clicando el en icono con una pantalla, como se puede ver en la figura 12.1.0.2:



Figura 12.1.0.2 – Icono de inicio de aplicación.

Tras unos segundos de inicio, ya es posible manejar la planta desde el PC. Es preciso destacar que es durante el proceso de arranque cuando se establece la comunicación entre el PLC y el PC, y cualquier fallo de comunicación se detectará en este paso y dará un mensaje de error por pantalla.

12.1.1. Inicio

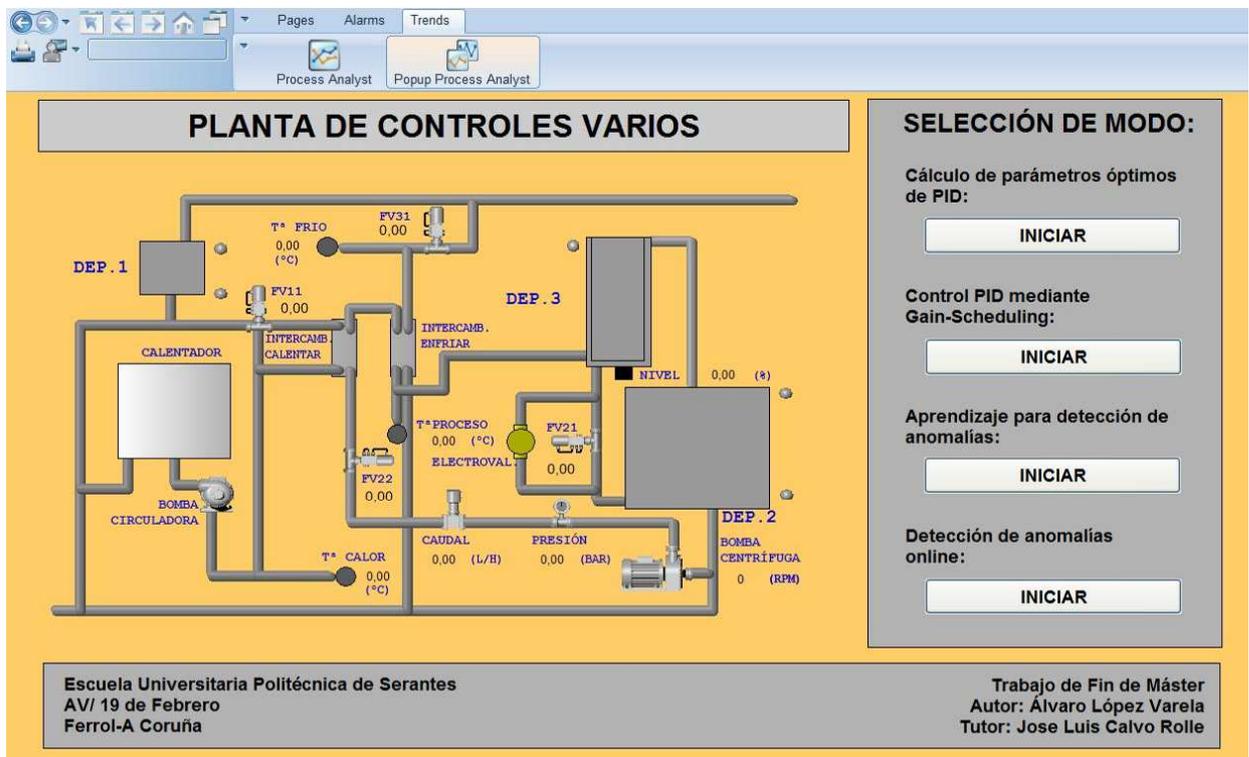


Figura 12.1.1.1 – Página de inicio.

La página inicial 12.1.1.1, denominada «INICIO», permite de un vistazo tener un conocimiento del estado general de la planta y de los valores de temperatura, caudal, nivel y presión de los circuitos hidráulicos que la componen. En su parte izquierda, existe un menú en el que se pueden seleccionar cada una de las funcionalidades implementadas en el proyecto. Las opciones son:

- Obtención de parámetros de PID optimizados:
- Control mediante Gain Scheduling
- Fase de Aprendizaje para detección de anomalías.
- Detección de anomalías.

12.1.2. Obtención de parámetros

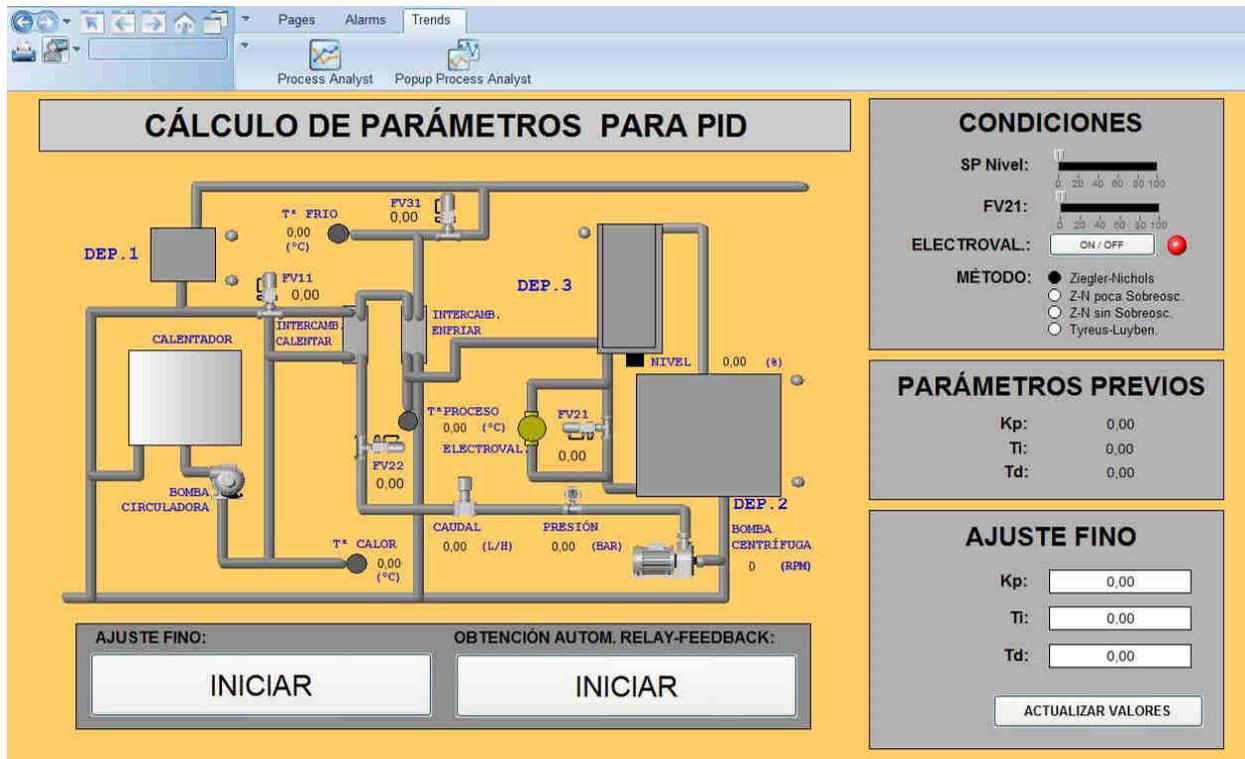


Figura 12.1.2.1 – Página de obtención de parámetros.

A través del botón «Iniciar» de la sección de «Obtención de parámetros» de la página de inicio, se accede a esta página. En ella se pueden distinguir 5 secciones. En primer lugar, tenemos el esquema de la planta con la indicación de los estados y medidas de los principales instrumentos y equipos.

Al pie del esquema de la planta, están los botones de inicio para arrancar o bien un PID con parámetros constantes (en el que se pueden ir probando varios parámetros de PID manualmente), o bien un sistema de obtención de parámetros automático mediante el método «Relay-Feedback». Este último método consta de una fase de estabilización inicial con un PID clásico de 1 minuto de duración, y una fase de 45 segundos de obtención de parámetros, en los que el nivel se controlará a través de un relé con histéresis.

Una vez se pulse cualquiera de los botones de «INICIAR», en su lugar aparecerán otros botones con el indicador «DETENER», mediante los cuales se podrá detener la planta en cualquier momento.

Por otro lado, en la parte superior derecha aparece el menú «CONDICIONES», en el cual se puede establecer la consigna de nivel mediante una barra deslizante, así como el régimen en que trabajará, determinado por la posición de la válvula motorizada y la electroválvula de salidas del tanque de control de nivel. A mayores aparece un menú de selección, que permite

seleccionar tipo de cálculo de parámetros de PID que se realiza mediante el método «Relay-Feedback».

En su parte inferior, otros dos menús, llamados «PARÁMETROS PREVIOS» y «AJUSTE FINO», permiten visualizar los parámetros actuales del controlador, así como introducir nuevos parámetros, tanto con el control en marcha como parado. Al pulsar el botón «ACTUALIZAR VALORES», los valores de K_p , T_i y T_d introducidos se almacenarán en el PLC en la región de control en que esté funcionando en dicho instante el PID.

Es necesario comentar que las regiones de control para el control de nivel están determinadas por la consigna de nivel y por el grado de apertura de la válvula y electroválvula de descarga del tanque 3.

12.1.3. Gain Scheduling

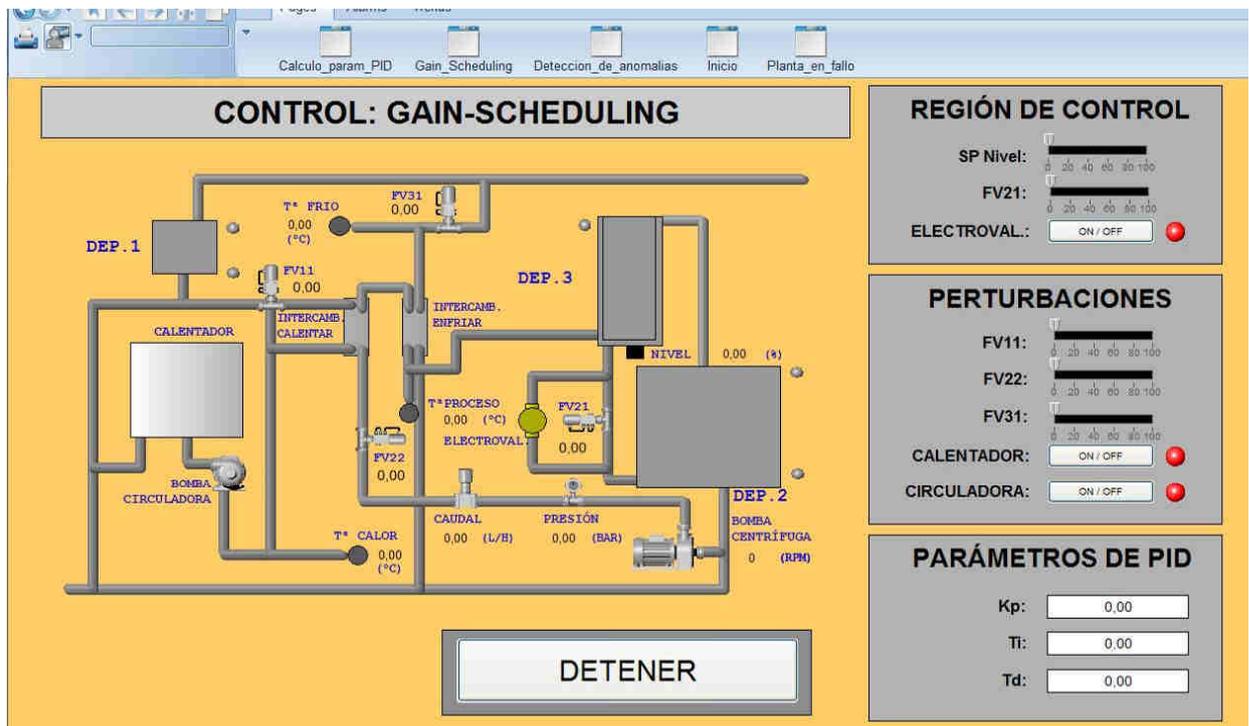


Figura 12.1.3.1 – Página de control PID mediante Gain Scheduling.

La pantalla de Gain Scheduling tiene una configuración muy similar a la de obtención de parámetros, por lo que sólo se comentarán las diferencias significativas.

El control se inicia y se detiene a través de los pulsadores «INICIAR» y «DETENER». En este caso, en el menú inferior derecho aparecen los parámetros utilizados en cada región, y se actualizan instantáneamente cuando se produce un cambio de región. No es posible modificarlos durante el funcionamiento del control mediante Gain Scheduling, ya que sólo la etapa de obtención de parámetros está pensada para esta opción.

12.1.4. Aprendizaje

Con la misma configuración que las pantallas anteriores, la pantalla de aprendizaje permite seleccionar el tipo de detección deseado en el menú inferior derecho (o bien basado en nivel estimado o detección estadística). Esta opción se debe seleccionar antes de iniciar el aprendizaje, ya que una vez iniciado se inhabilita la selección. Por defecto, la detección será la estadística.

En el mismo menú es posible ver en tiempo real los valores de identificación de la planta, ya que se utilizan para los dos tipos de detección.

Una vez iniciada la detección mediante el pulsador «INICIAR», aparecen 2 nuevos pulsadores: «INICIAR DETECCIÓN», que detiene el aprendizaje y abre la ventana de detección, y «DETENER CONTROL», que detiene tanto el aprendizaje como el control. Un aspecto importante a comentar es que el pulsador «INICIAR DETECCIÓN» no inicia la detección, sino que sólo muestra la pantalla de detección para que el usuario la inicie. Esto se programa de esta forma para poder modificar el punto de partida de la detección.

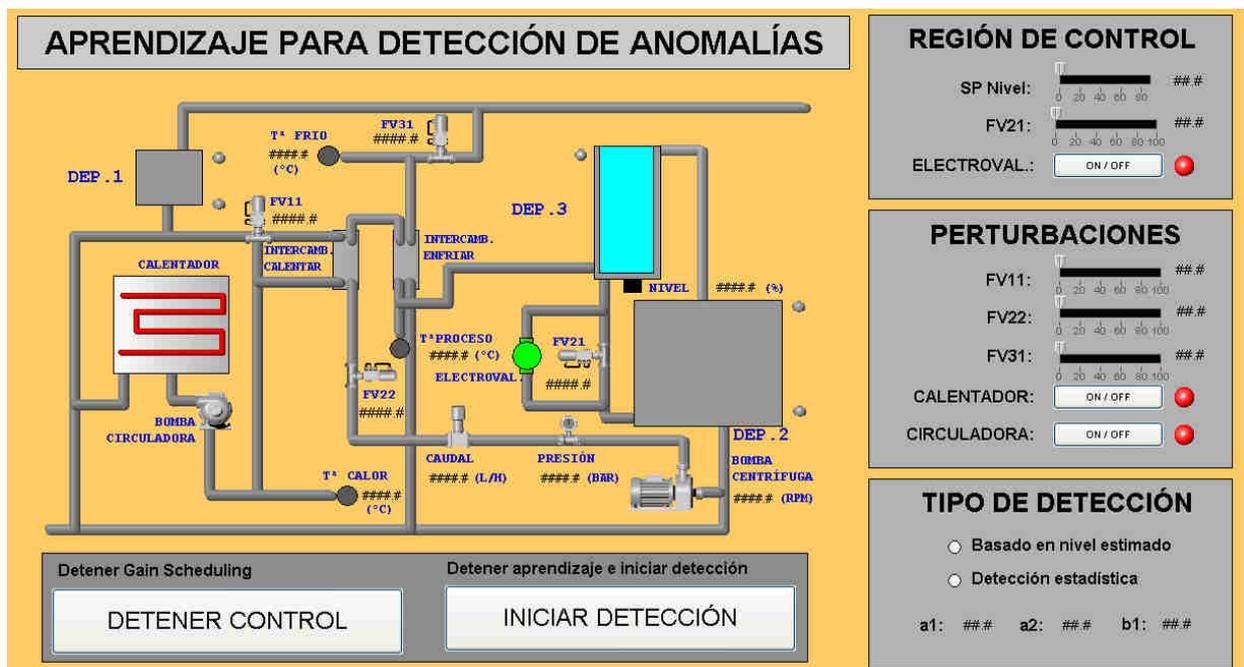


Figura 12.1.4.1 – Pantalla de aprendizaje.

12.1.5. Detección de anomalías

En el menú inferior derecho de la pantalla de detección, se muestran en tiempo real o bien el nivel estimado o bien los parámetros de identificación instantáneos, en función del tipo de detección seleccionado. También se muestran la media y la covarianza escalados, lo que aporta una idea de la medida de dispersión y correlación de los datos. Más abajo, es posible actualizar el valor de porcentaje máximo de error, para la detección mediante nivel estimado, o el valor de distancia máxima de Mahalanobis para la detección estadística. Para que este valor

se envíe al autómatas y se haga efectivo, es preciso activar el pulsador «ACTUALIZAR».

Por último, en la parte inferior, se muestra en cada instante si la planta se encuentra en funcionamiento normal o si se ha detectado alguna anomalía.

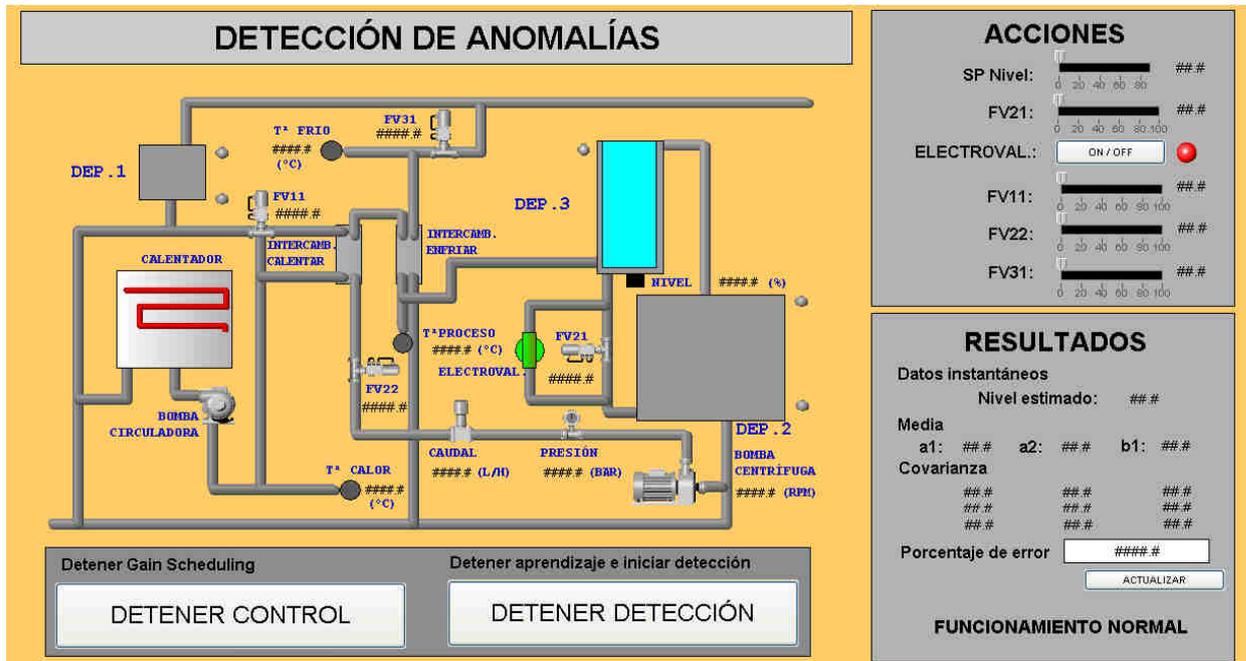


Figura 12.1.5.1 – Pantalla de detección de anomalías.

12.1.6. Gráficas

La pantalla de gráficas es de las más útiles para la visualización de resultados, tanto de control como de detección de anomalías. En ella existe un menú que permite cargar las variables de tendencia que se almacenan en Vijeo Citect, tales como el nivel real, el nivel estimado, la consigna de nivel, la consigna de la bomba, la apertura de la válvula motorizada de descarga FV21 o la detección de anomalías.

Para obtener dichas gráficas, es necesario pulsar sobre el icono del lápiz, y en el menú emergente pulsar en «SEARCH». En este punto se mostrarán todas las variables de tendencia que se pueden graficar, y el usuario puede seleccionar el conjunto que desee. Una vez seleccionadas, también es posible guardar una configuración de visualización con las tendencias seleccionadas, pulsando el botón de «GUARDAR».

Para más información del resto de opciones de las gráficas, se puede consultar la ayuda de Vijeo Citect.

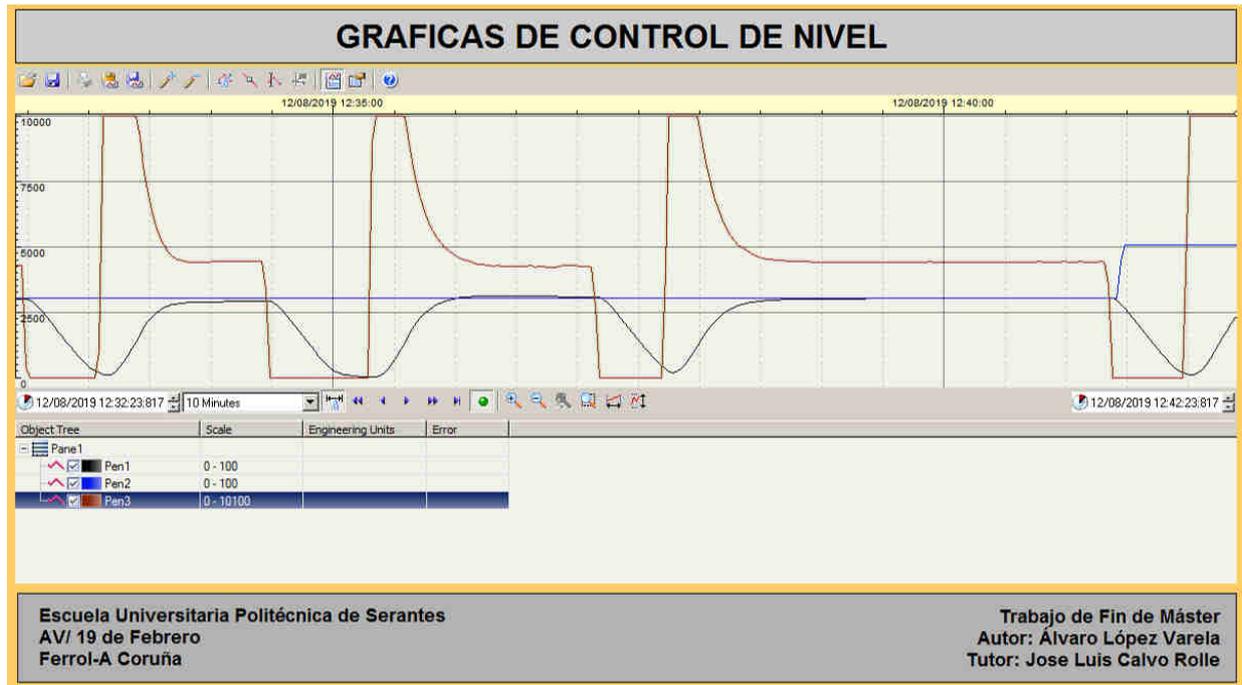


Figura 12.1.6.1 – Pantalla de gráficas.

12.1.7. Planta en fallo

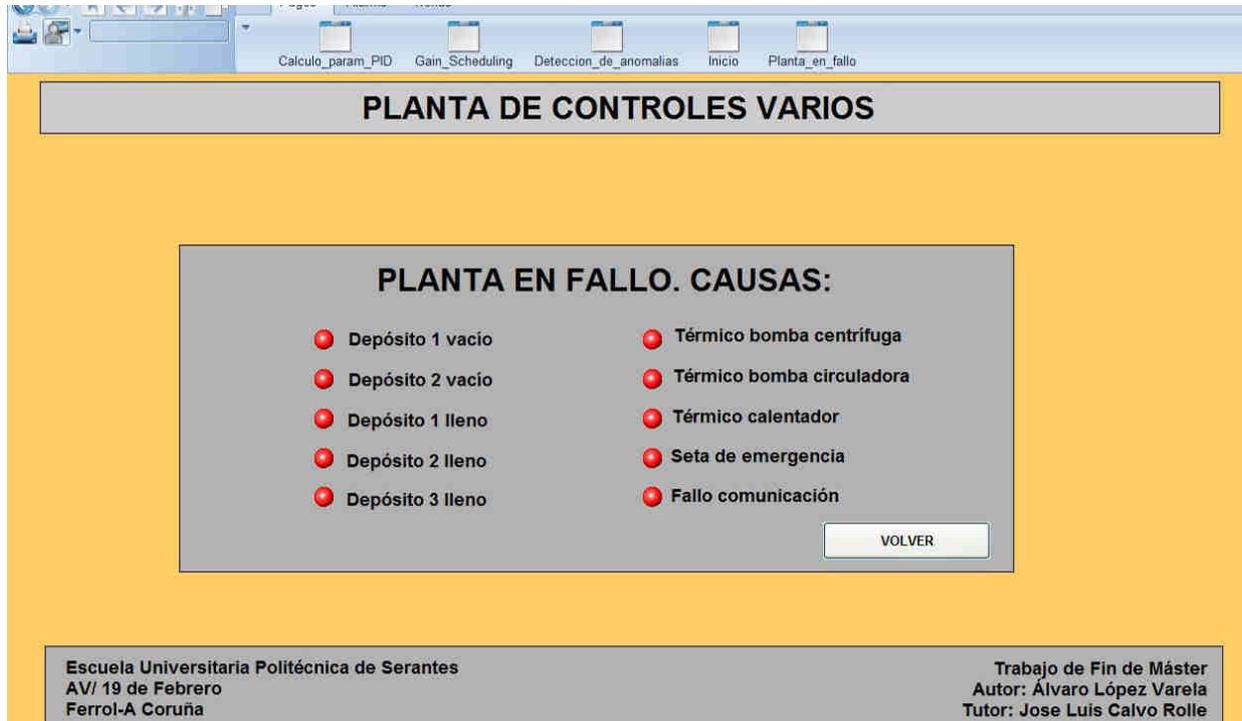


Figura 12.1.7.1 – Pantalla de fallos de planta.

Por último, existe una pantalla de visualización de posibles causas de fallo de la planta, donde a través de un simple vistazo es posible determinar cual es el origen del fallo. Aquellos

fallos que no están activos se muestran en gris, mientras que los activos se muestran en rojo. No se utiliza el color verde porque podría dar lugar a confusión.

Los fallos mostrados son por un lado los de sobrellenado, que no son fallos de seguridad, pero afectan al control, y por otro lado los de seguridad, como la activación de la seta de emergencia, entre otros.

La pantalla cuenta con un pulsador de «VOLVER» que muestra de nuevo la pantalla de inicio.

12.2. Macro de Excel

```
'Macro de Excel que grafica los datos de detección de anomalías obtenidos desde
Vijeo Citect
```

```
Dim paro As Boolean
```

```
Dim grafico1 , grafico2 , grafico3 As ChartObject
```

```
Dim wks As Worksheet
```

```
Sub Vijeo ()
```

```
    Dim Cont
```

```
        paro = False
```

```
        'Se borran los datos y los gráficos.
```

```
        ActiveWorkbook.Sheets(1).Range("J1:M501").Clear
```

```
        On Error Resume Next
```

```
        ActiveWorkbook.Sheets(1).ChartObjects.Delete
```

```
        'Se crean nuevos gráficos
```

```
        Call crear_grafico1
```

```
        Call crear_grafico2
```

```
        Call crear_grafico3
```

```
        Cont = 1
```

```
        'Se evalúa si los datos han cambiado, y si es así se añaden al final de la
        lista
```

```
        Do While paro = False
```

```
            If (Cells(8, 3).Value <> Cells(Cont, 10).Value) Or (Cells(8, 4).Value <>
                Cells(Cont, 11).Value) Or (Cells(8, 5).Value <> Cells(Cont, 12).Value)
```

```
                Then
```

```
                    Cont = Cont + 1
```

```
                    Cells(Cont, 10).Value = Cells(8, 3).Value
```

```
                    Cells(Cont, 11).Value = Cells(8, 4).Value
```

```
                    Cells(Cont, 12).Value = Cells(8, 5).Value
```

```
                    Cells(Cont, 13).Value = Cells(9, 3).Value
```

```
                    Cells(Cont, 20).Value = Cells(8, 3).Value
```

```
                    Cells(Cont, 21).Value = Cells(8, 5).Value
```

```
                    If (Cells(10, 3).Value = 0) Then 'Los datos de aprendizaje se muestran
                    en azul
```

```
                        If (Cells(9, 3).Value = 1) Then 'Si existe una anomalía, se grafica
                        en rojo.
```

```
                            grafico1.Chart.SeriesCollection(1).Points(Cont - 1).Format.Fill.
                            ForeColor.RGB = RGB(255, 0, 0)
```

```
                            grafico2.Chart.SeriesCollection(1).Points(Cont - 1).Format.Fill.
                            ForeColor.RGB = RGB(255, 0, 0)
```

```
                            grafico3.Chart.SeriesCollection(1).Points(Cont - 1).Format.Fill.
                            ForeColor.RGB = RGB(255, 0, 0)
```

```
                    Else 'Si el dato es de funcionamiento normal se grafica en verde
```

```
grafico1.Chart.SeriesCollection(1).Points(Cont - 1).Format.Fill.  
    ForeColor.RGB = RGB(0, 255, 0)  
grafico2.Chart.SeriesCollection(1).Points(Cont - 1).Format.Fill.  
    ForeColor.RGB = RGB(0, 255, 0)  
grafico3.Chart.SeriesCollection(1).Points(Cont - 1).Format.Fill.  
    ForeColor.RGB = RGB(0, 255, 0)  
    End If  
End If  
End If  
DoEvents ' Cambia a otros procesos.  
Loop  
End  
End Sub  
Sub detener()  
paro = True  
Close  
End Sub
```

```
Sub crear_grafico1()  
Set wks = ActiveWorkbook.Sheets(1)  
Set grafico1 = wks.ChartObjects.Add(Left:=50, Width:=250, Top:=300, Height:=150)  
grafico1.Name = "Grafico_1"  
With grafico1.Chart  
.ChartType = xlXYScatter  
.SetSourceData Source:=wks.Range("J1:K500")  
.Legend.Delete  
.HasTitle = True  
.ChartTitle.Text = "a2-a1"  
.Axes(xlCategory).HasTitle = True  
.Axes(xlCategory).AxisTitle.Text = "a1"  
.Axes(xlValue).HasTitle = True  
.Axes(xlValue).AxisTitle.Text = "a2"  
End With
```

```
End Sub
```

```
Sub crear_grafico2()  
Set wks = ActiveWorkbook.Sheets(1)  
Set grafico2 = wks.ChartObjects.Add(Left:=300, Width:=250, Top:=150, Height:=150)  
grafico2.Name = "Grafico_2"  
With grafico2.Chart  
.ChartType = xlXYScatter  
.SetSourceData Source:=wks.Range("K1:L500")  
.Legend.Delete  
.HasTitle = True  
.ChartTitle.Text = "b1-a2"  
.Axes(xlCategory).HasTitle = True  
.Axes(xlCategory).AxisTitle.Text = "a2"  
.Axes(xlValue).HasTitle = True
```

```
.Axes(xlValue).AxisTitle.Text = "b1"  
End With
```

```
End Sub
```

```
Sub crear_grafico3()  
Set wks = ActiveWorkbook.Sheets(1)  
Set grafico3 = wks.ChartObjects.Add(Left:=50, Width:=250, Top:=150, Height:=150)  
grafico3.Name = "Grafico_3"  
With grafico3.Chart  
.ChartType = xlXYScatter  
.SetSourceData Source:=wks.Range("T1:U500")  
.Legend.Delete  
.HasTitle = True  
.ChartTitle.Text = "b1-a1"  
.Axes(xlCategory).HasTitle = True  
.Axes(xlCategory).AxisTitle.Text = "a1"  
.Axes(xlValue).HasTitle = True  
.Axes(xlValue).AxisTitle.Text = "b1"  
End With  
End Sub
```

12.3. Código de MATLAB

!Función que realiza una gráfica en 3 dimensiones con los datos de
!un archivo de texto en el que las 3 primeras columnas son los datos
!y la cuarta indica si el dato correspondiente corresponde a una categoría
!o a otra.

```
function plot_txt()

fileID=fopen('I:\TFM\PROGRAMA\sd2.txt','r');
sizeA=[4 Inf];
A=fscanf(fileID,'%f %f %f %d',sizeA);
fclose(fileID);

for i=1:size(A,2)
    if(A(4,i)==1)
        plot3(A(1,i),A(2,i),A(3,i),'r*')
    else
        plot3(A(1,i),A(2,i),A(3,i),'g*')
    end
    hold on;
end

end
```




UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2018/19

*IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL BASADO EN GAIN
SCHEDULING Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE
COMPUTACIONAL PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS.*

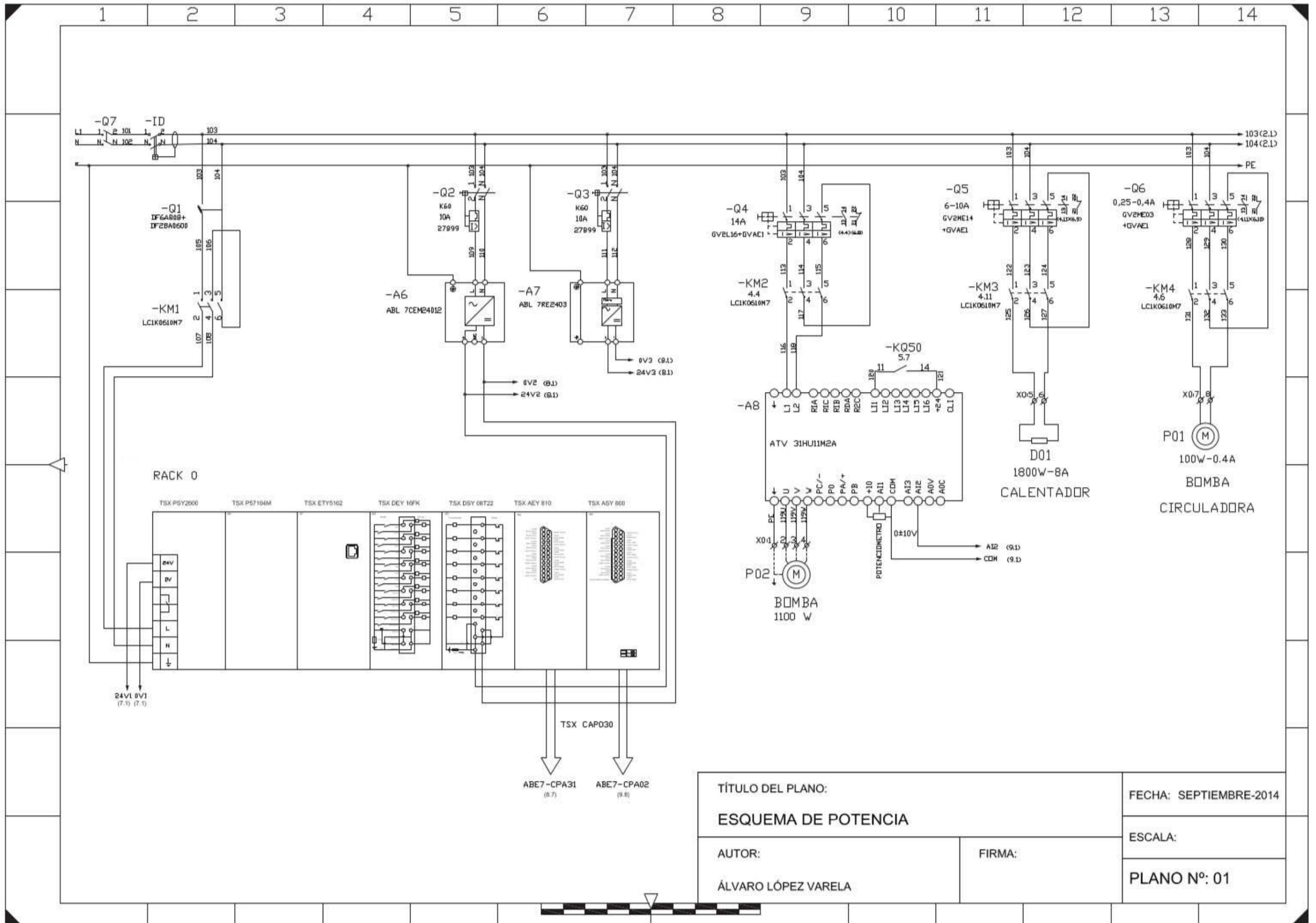
Máster en Ingeniería Industrial

Documento

PLANOS

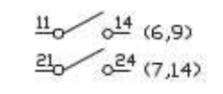
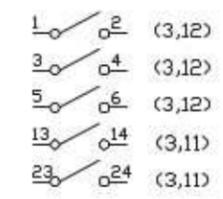
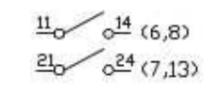
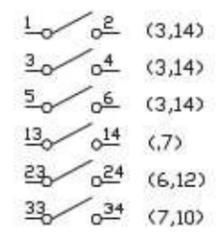
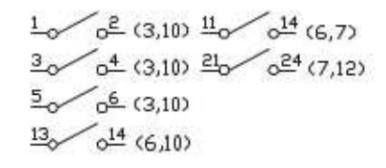
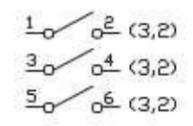
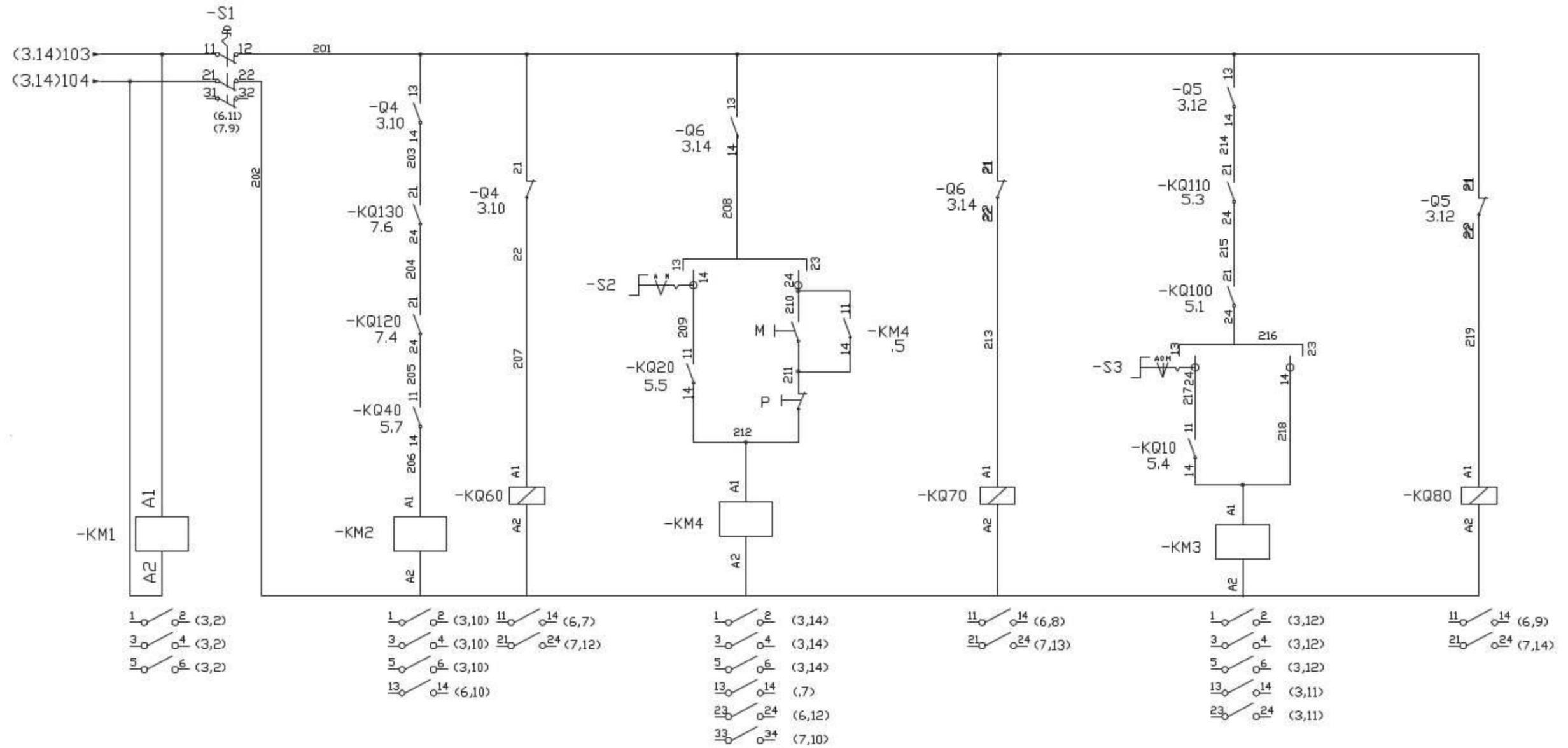
Índice de planos

1 Esquema de potencia	155
2 Esquema de control	157
3 Salidas digitales	159
4 Entradas digitales	161
5 Esquema de control 2	163
6 Entradas analógicas	165
7 Salidas analógicas	167



TÍTULO DEL PLANO: ESQUEMA DE POTENCIA		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		ESCALA:
FIRMA:		PLANO N°: 01

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

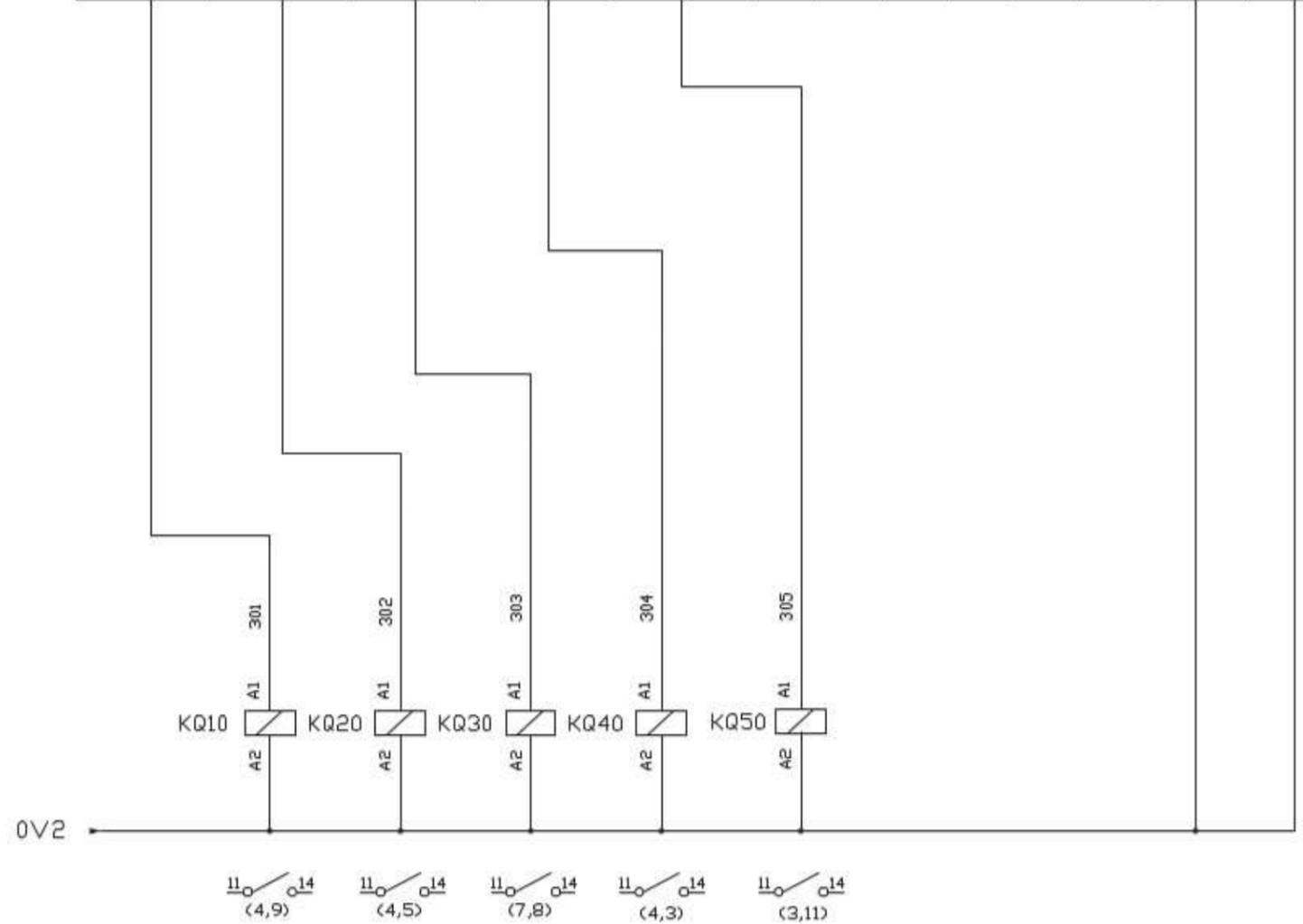


TÍTULO DEL PLANO: ESQUEMA DE CONTROL		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA	FIRMA:	ESCALA:
		PLANO N°: 02



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

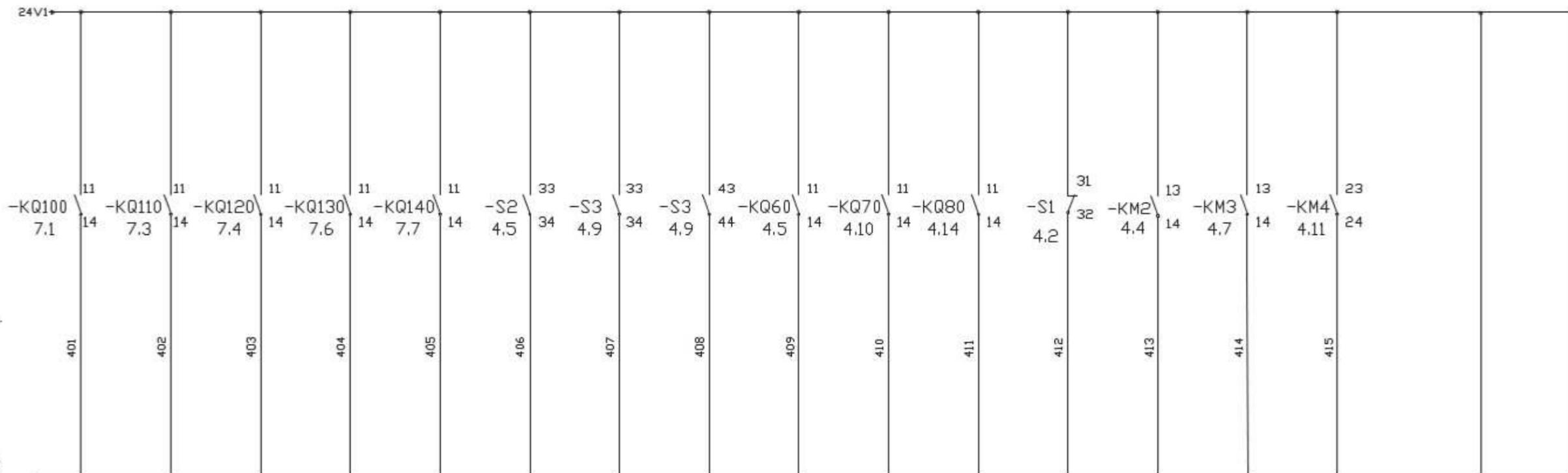
Salidas TSX DSY 08T2								
CALENTADOR D01 ON/OFF	B. CIRCULADORA P01 ON/OFF	ELECTROVALV. FY22 ON/OFF	VARIADOR FREQ. ON/OFF	VARIADOR FREQ. ORDEN MARCHA	RESERVA	RESERVA	RESERVA	ALIMENTACIÓN TARJETA
O0	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	0M 0L+ 1M 1L+



TÍTULO DEL PLANO: SALIDAS DIGITALES		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		ESCALA:
FIRMA:		PLANO N°: 03



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
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112	113	114	115	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 TERMICO BOMBA	FALLO TERMICO CIRCULADORA	FALLO TERMICO CALENTADOR	STOP EMERGENCIA	CONF. MARCHA BOMBA	CONF. MARCHA CIRCULADORA	CONF. MARCHA CALENTADOR	RESERVA								
24V	24V	0V	0V	Entradas ABE 7TES160																			

Sub-D 25 points

TSX CAP030

TSX DEY16FK

24V1

0V1

TÍTULO DEL PLANO:

ENTRADAS DIGITALES

FECHA: SEPTIEMBRE-2014

ESCALA:

AUTOR:

ÁLVARO LÓPEZ VARELA

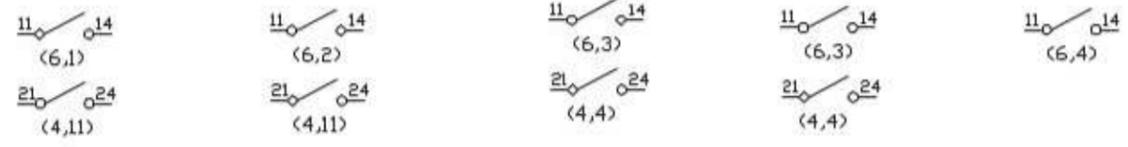
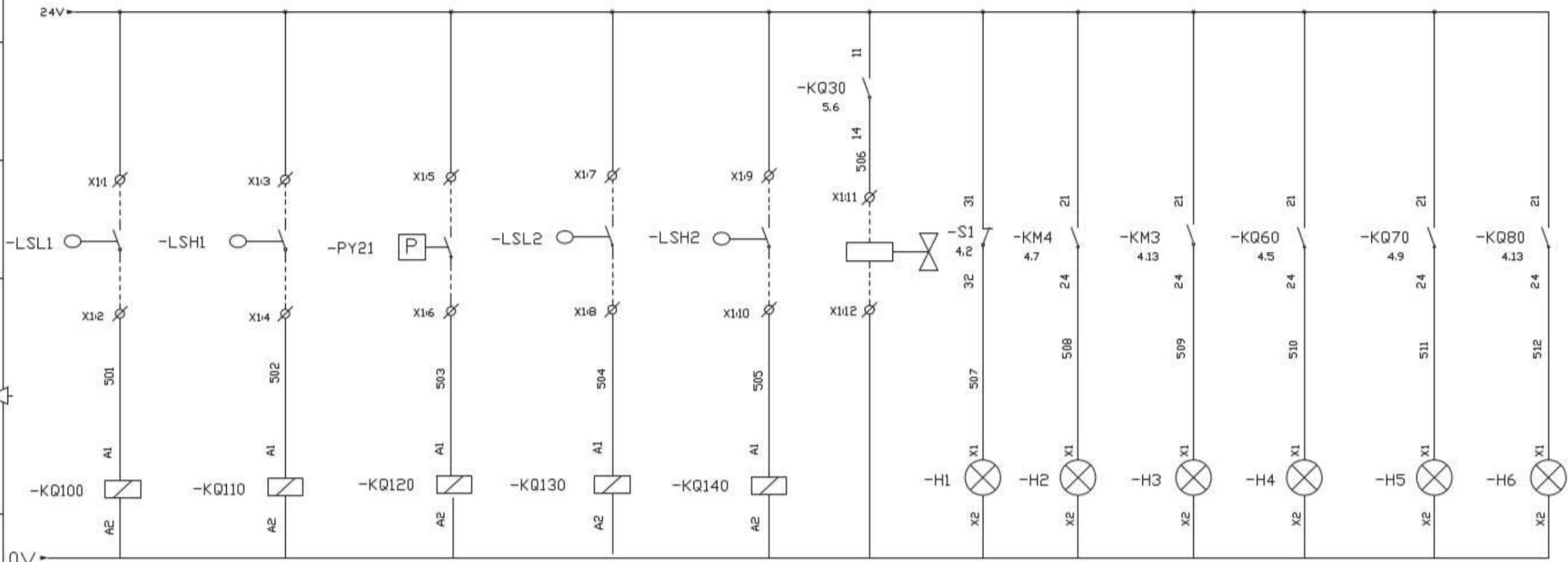
FIRMA:

PLANO N°: 04



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

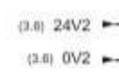
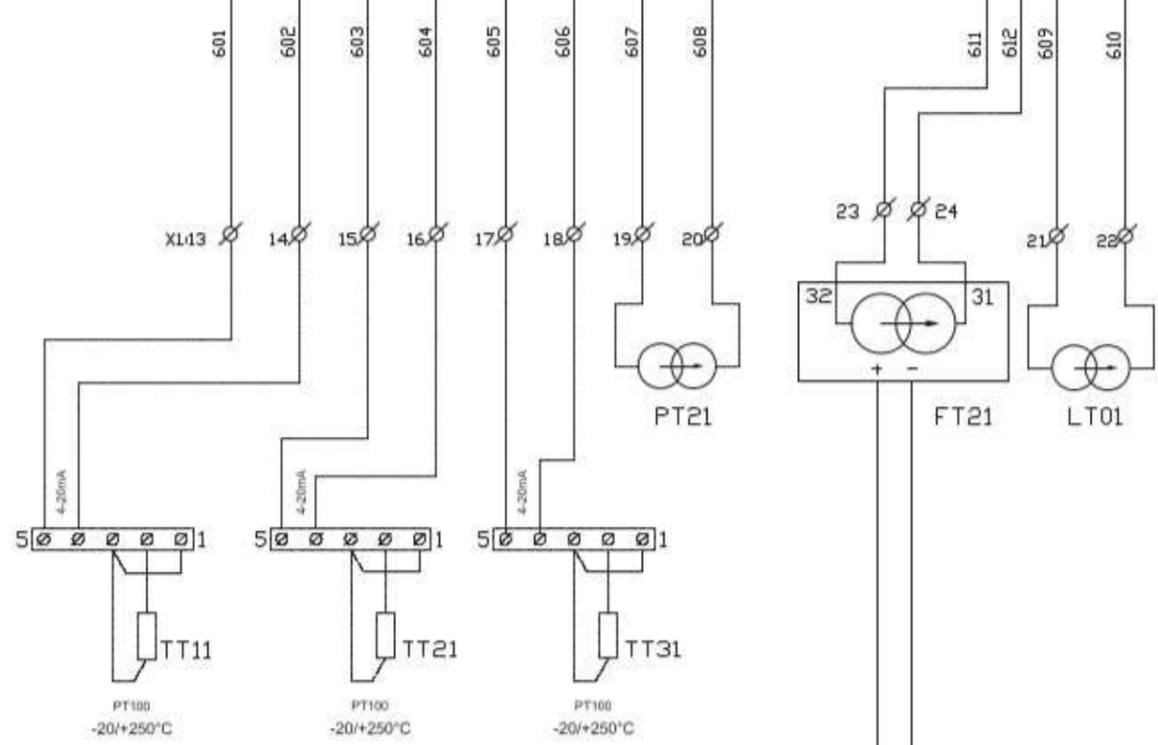
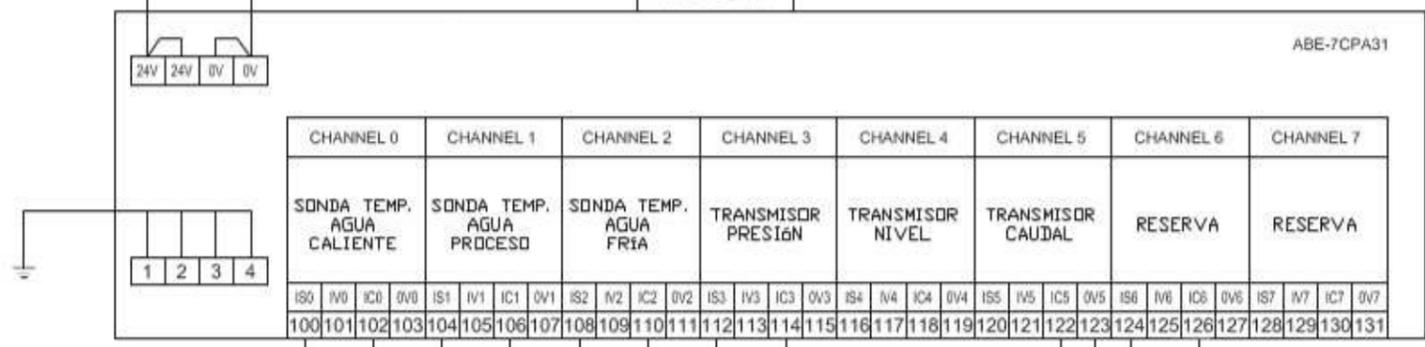
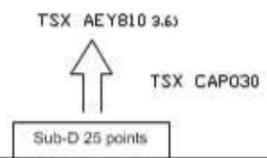
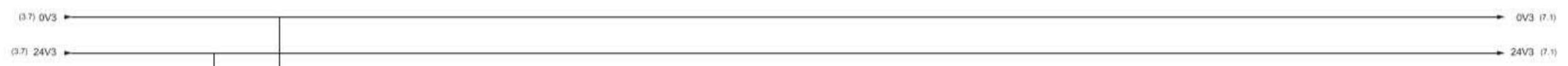
NIVEL BAJO DEPÓSITO 2	NIVEL ALTO DEPÓSITO 2	PRESOSTATO	NIVEL BAJO DEPÓSITO 4	NIVEL ALTO DEPÓSITO 4	FY22 ON/OFF	CONF. TENSIÓN	MARCHA CIRCULAD.	MARCHA CALENTADOR	FALLO TÉRMICO BOMBA	FALLO TÉRMICO CIRCULADORA	FALLO TÉRMICO CALENTADOR
-----------------------	-----------------------	------------	-----------------------	-----------------------	-------------	---------------	------------------	-------------------	---------------------	---------------------------	--------------------------



TÍTULO DEL PLANO: ESQUEMA DE CONTROL 2		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		ESCALA: PLANO N°:05
FIRMA:		



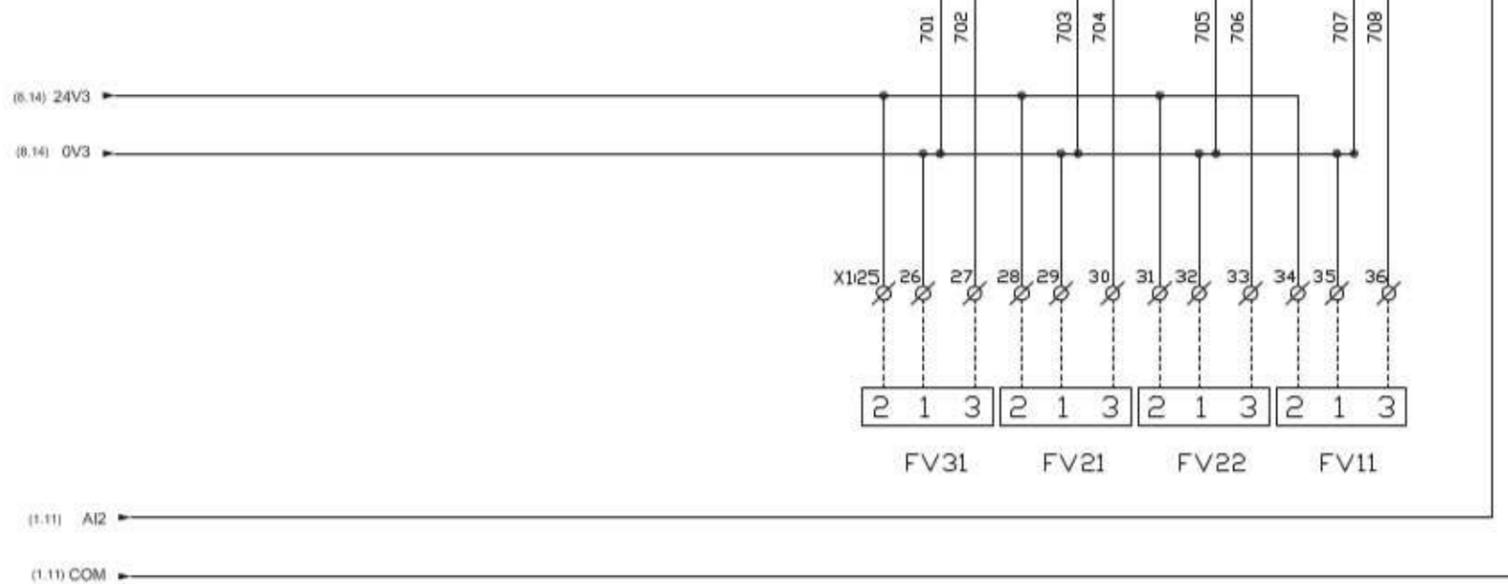
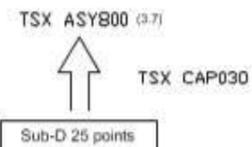
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14



TÍTULO DEL PLANO: ENTRADAS ANALÓGICAS		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		ESCALA:
FIRMA:		PLANO N°: 06



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



TÍTULO DEL PLANO: SALIDAS ANALÓGICAS		FECHA: SEPTIEMBRE-2014
AUTOR: ÁLVARO LÓPEZ VARELA		ESCALA:
FIRMA:		PLANO Nº: 07





UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2018/19

*IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL BASADO EN GAIN
SCHEDULING Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE
COMPUTACIONAL PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS.*

Máster en Ingeniería Industrial

Documento

PLIEGO DE CONDICIONES

Índice del documento PLIEGO DE CONDICIONES

13 Condiciones de funcionamiento	173
13.1 Colocación de la planta	173
13.2 Líquidos de la planta	173
13.3 Presión ambiental	173
13.4 Temperatura ambiente	173
13.5 Humedad y proyecciones de líquidos	173
13.6 Polvo	174
13.7 Alimentación	174
13.8 Comunicación con PC	174

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, estas 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 almacenaje 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 taparán 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.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2018/19

*IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL BASADO EN GAIN
SCHEDULING Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE
COMPUTACIONAL PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS.*

Máster en Ingeniería Industrial

Documento

PRESUPUESTO

Índice del documento PRESUPUESTO

14 Presupuesto

179

14 Presupuesto

Concepto	Ud medida	Precio / Ud	Unidades	Total
Gain Scheduling y obtención de parámetros optimizados	horas ingeniero	50.00 €	40 h	2000.00 €
Detección de anomalías	horas ingeniero	50.00 €	40 h	2000.00 €
Pruebas y puesta en marcha	horas ingeniero	50.00 €	24 h	1200.00 €
SCADA	horas ingeniero	50.00 €	12 h	600.00 €
Sistemas de monitorización auxiliar (Excel, Matlab)	horas ingeniero	50.00 €	2 h	100.00 €

TOTAL:

5900.00 €

