



Escuela  
Universitaria  
Ingeniería  
Técnica  
Industrial  
ZARAGOZA

# MEMORIA

## **PROYECTO FINAL DE CARRERA**

AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DEL TRAMO DE  
UN CANAL DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

## **AUTORES**

RAÚL MUÑOZ Y RICARDO LUIS

## **DIRECTOR**

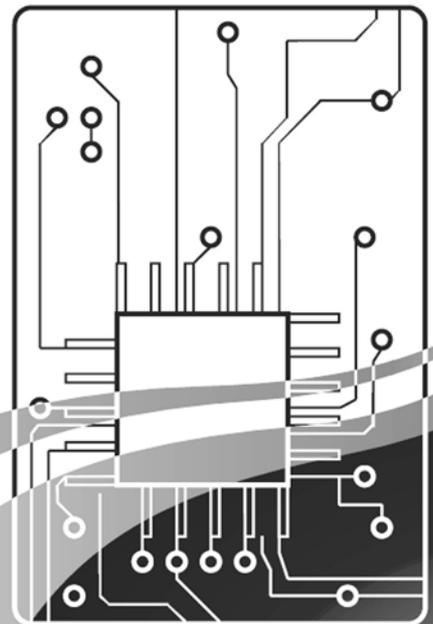
CARLOS ESTRADA

## **ESPECIALIDAD**

ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

## **CONVOCATORIA**

JUNIO 2011





## INDICE

<b>CAP 1</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO DEL PROYECTO.....	2
1.2	ANTECEDENTES.....	3
1.3	SOLUCION PROPUESTA.....	5
<b>CAP 2</b>	<b>DESCRIPCION INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA</b>	<b>9</b>
2.1.	ALMENARAS DE REGULACION .....	10
2.2.	COMPUERTAS.....	11
2.3.	ALIVIADEROS INTERNOS.....	13
2.4.	ARQUETAS DE MEDIDA PARA SENSORES.....	14
2.5.	TOMA.....	15
<b>CAP 3</b>	<b>DESCRIPCION INFRAESTRUCTURA ELECTRICA</b>	<b>17</b>
3.1.	ESTACIONES DE CONTROL.....	17
3.1.1.	CENTRO DE CONTROL.....	17
3.1.2.	ESTACIONES REMOTAS.....	20
3.2	DISPOSITIVOS ELECTRO-MECANICOS.....	23
3.2.1.	PLC.....	23
3.2.2.	ACTUADORES.....	30
3.2.3.	S.A.I.....	35
3.2.4.	TERMINAL DE VISUALIZACION PARA MANTENIMIENTO.....	36
3.3.	INSTRUMENTACION.....	37
3.3.1.	SENSOR DE NIVEL CERAMICO-CAPACITIVO.....	38
3.3.2.	SENSOR DE NIVEL POR ULTRASONIDOS.....	39
3.3.3.	CAUDALIMETRO EN TOMA.....	40
3.3.3.1	SENSOR SITRANS F M MAG 5100 W, DN 600.....	41
3.3.3.2	TRANSMISOR SITRANS F M MAG 6000.....	42
3.4.	EQUIPOS DE COMUNICACIONES.....	46
3.4.1.	MODULOS DE TELECONTROL TIM.....	46
3.4.2.	EQUIPOS INALAMBRICOS WIMAX.....	48
3.4.3.	MODEM GSM/GPRS.....	49
<b>CAP 4</b>	<b>REGULACION DEL SISTEMA</b>	<b>51</b>
4.1	SIMULACION DEL SISTEMA MEDIANTE HEC-RAS.....	53
4.2	CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA.....	58



4.3	CONTROL DEL SISTEMA MEDIANTE REGULADOR.....	67
4.3.1	CONTROL MEDIANTE LAMBDA-TUNING.....	75
4.3.2	OTROS CONTROLES ALTERNATIVOS.....	83
4.3.3	AJUSTE FINAL DE LOS PARÁMETROS DEL REGULADOR.....	87
<b>CAP 5</b>	<b>SISTEMA DE COMUNICACIONES</b>	<b>91</b>
5.1.	RED INALAMBRICA DE COMUNICACIONES WIMAX.....	93
5.1.1	ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LOS RADIOENLACES.....	96
5.2.	TELECONTROL.....	103
5.2.1.	SISTEMA DE TELECONTROL SINAUT ST7.....	104
5.2.2.	COMUNICACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES PUNTOS DE CONTROL.....	112
<b>CAP 6</b>	<b>DESCRIPCION FUNCIONAL DE PROGRAMACION</b>	<b>115</b>
6.1.	DIRECTRICES DE PROGRAMACION.....	116
6.2.	PROGRAMACIÓN DE ESTACIÓN REMOTA ALMENARA .....	122
6.2.1.	OB1, BLOQUE PRINCIPAL.....	122
6.2.2.	FC10, COMPROBACIÓN DE FALLOS, EMERGENCIAS E INTRUSISMO....	124
6.2.3.	FC20, COMPROBACIÓN DE SEÑALES.....	131
6.2.4.	FC30, LECTURA DE NIVELES .....	143
6.2.5.	FC40 COMUNICACIONES.....	146
6.2.6.	FC50, REGULADOR. ....	152
6.2.7.	FC60, RUTINA DE ACTUACIÓN.....	160
6.2.8.	FC70 ENVIOS SMS.....	164
6.2.9.	LISTADO DE SEÑALES.....	167
6.3.	PROGRAMACIÓN DE ESTACIÓN REMOTA TOMA.....	171
6.3.1.	OB1, BLOQUE PRINCIPAL.....	171
6.3.2.	FC10, COMPROBACIÓN DE FALLOS, EMERGENCIAS E INTRUSISMO....	173
6.3.3.	FC20, COMPROBACIÓN DE SEÑALES.....	179
6.3.4.	FC40 COMUNICACIONES.....	185
6.3.5.	FC50, REGULADOR. ....	190
6.3.6.	FC60, RUTINA DE ACTUACIÓN.....	193
6.3.7.	FC70 ENVIOS SMS.....	196
6.3.8.	LISTADO DE SEÑALES.....	199
<b>CAP 7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>203</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>205</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>DOCUMENTACION</b>	
<b>ANEXO B</b>	<b>PLANOS ELECTRICOS</b>	
<b>ANEXO C</b>	<b>SIMULACIONES</b>	



## CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de los capítulos que se expondrán a lo largo de la memoria se pretende abordar de forma integral el proceso de automatización, control y gestión de una infraestructura hidráulica tipo: el tramo de un canal de distribución de agua, planteando las correspondientes soluciones, debidamente explicadas y justificadas, desde el punto de vista de la infraestructura, la regulación del nivel en el tramo y el sistema de comunicaciones.

La memoria queda dividida en 6 capítulos, que pasamos a describir brevemente a continuación.

- Un primer capítulo donde se realiza una pequeña introducción y se indican los objetivos.
- Un segundo capítulo donde se describe la infraestructura hidráulica que se pretende automatizar, así como los diferentes puntos de control, desde el punto de vista hidráulico.
- Un tercer capítulo donde se realiza una descripción de los diferentes dispositivos, atendiendo a su naturaleza electro-mecánica, que se necesitan para gestionar, controlar y automatizar la infraestructura hidráulica, además de justificar la elección de cada uno de estos dispositivos.
- Un cuarto capítulo donde se desarrolla el sistema de regulación que hace posible el control automático del proceso.
- Un quinto capítulo donde se desarrolla un completo sistema de comunicaciones que hace posible la interacción entre los diferentes puntos de control de la infraestructura hidráulica.
- Un sexto capítulo donde se expone la programación que hace posible una correcta gestión de la infraestructura hidráulica, llevada a cabo por parte de los PLCs.
- Y por último, un séptimo capítulo dedicado a exponer las conclusiones extraídas de la realización de este proyecto.

## 1.1.- OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo principal del presente proyecto, es automatizar y controlar una infraestructura hidráulica, en este caso el tramo de un canal de distribución de agua. El tramo estará delimitado por dos almenaras, una aguas arriba y otra aguas abajo. El tramo dispondrá de una toma de derivación.

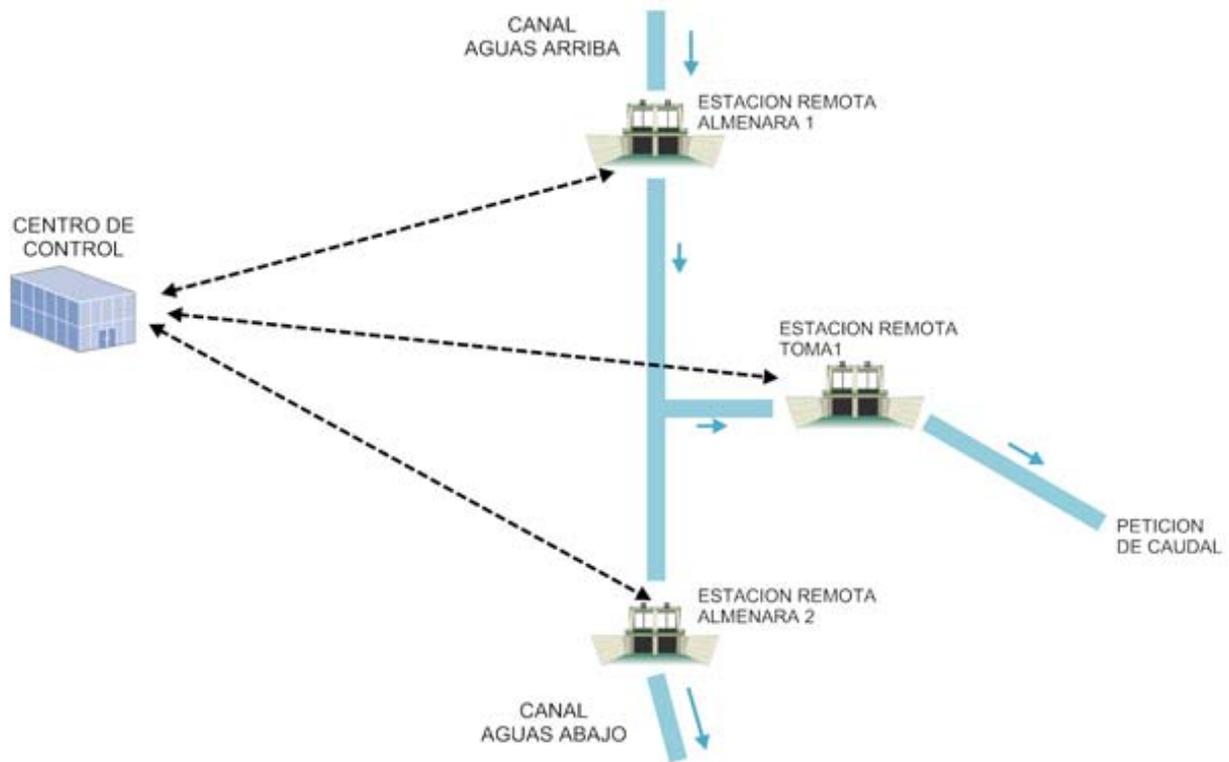


FIGURA 1.1-01  
- INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA A CONTROLAR CON LOS DIFERENTES PUNTOS DE CONTROL Y GESTIÓN.

Con la automatización se pretende:

- Hacer más eficaz los dos usos fundamentales del canal; el riego y el abastecimiento de agua.
- Eliminar vertidos y por lo tanto hacer más eficiente el sistema de conducción.
- Mantener un caudal constante de agua y limitar la velocidad de oscilación de la misma para alargar la vida del revestimiento.

## 1.2.- ANTECEDENTES

La escasez de lluvias y la irregular distribución de agua determinan la importancia que siempre ha tenido, desde la antigüedad, la captación y distribución de agua para el abastecimiento y el riego.

Estos problemas se han intentado solucionar desde siempre a través de infraestructuras hidráulicas que se encargan de captar y transportar el agua para una mejor y más eficiente distribución del agua.

La infraestructura hidráulica por excelencia, que se encarga de transportar los recursos hídricos para abastecimiento y regadío, es el canal de riego y distribución.

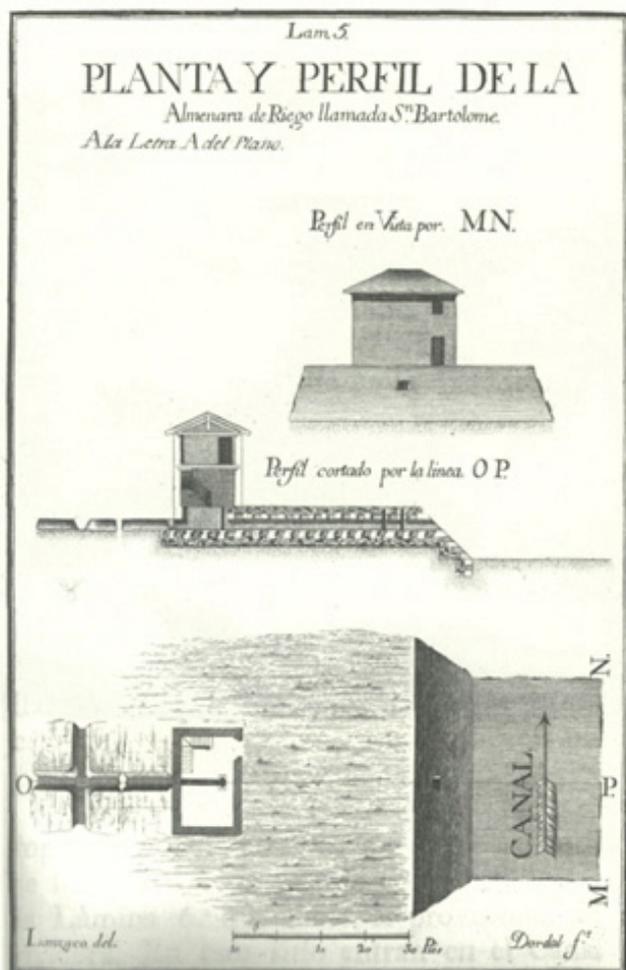


FIGURA 1.2-01  
- ANTIGUO DIBUJO EN PLANTA Y PERFIL DE UNA ALMENARA DE RIEGO DEL CANAL IMPERIAL DE ARAGÓN.

El conocimiento empírico del funcionamiento de los canales se remonta a varios milenios. En la antigua Mesopotamia ya se usaban canales de riego, en la Roma Imperial se abastecían de agua a través de canales construidos sobre inmensos acueductos, y los habitantes del antiguo Perú construyeron en algunos lugares de los Andes canales que aun funcionan. El conocimiento y estudio sistemático de los canales se remonta al siglo XVIII.

En España, por poner un ejemplo, el número de canales de riego y distribución de agua es elevadísimo. A continuación pasamos a enumerar algunos:

Canal del Bajo Guadalquivir, Canal de Bardenas, Canal de la Derecha del Ebro, Canal de Castilla, Canal del Duero, Canal del Henares, Canal Imperial de Aragón, Canal de Piñana, Canal Segarra-Garrigues, Canal de Tauste, Canal de Urgel, Canal de Vitoria. Debido a su elevado número, queda constancia de la importancia que tienen estas infraestructuras hidráulicas en el tejido fluvial. Por ello es de vital importancia, que las pérdidas de los recursos hídricos que transportan, así como la cantidad de energía empleada por sus instalaciones sean mínimas.

Los sistemas de regulación y control de caudal empleados en estas infraestructuras de conducción siempre se operaban de forma manual. A través de tajaderas, guillotinas o compuertas verticales, las cuales se accionaban manualmente en función de la demanda de agua solicitada.

Estas funciones eran realizadas por el “zabacequia” o acequero, que era el encargado de los riegos, cuidados y uso de estas redes de distribución de agua. Esta forma tan primitiva de manipular y regular estos caudales la podríamos definir como una solución no automática desde el punto de vista de la regulación de sistemas.

Unos de los primeros y más antiguos sistemas de regulación no automática de caudales se realizó a través de azudes (palabra de origen árabe que significa barrera). En un río o canal, se construía una barrera en el cauce con el fin de retener el agua para posteriormente derivarla a una acequia o toma de riego. Así se intentaba mantener un flujo de agua constante en el canal, independientemente de que se solicitase por los regantes, caudal para regadío.

Aparte de todo esto, se fueron introduciendo distintos sistemas de regulación en estos canales de conducción, tales como, aliviaderos y vertederos internos para regular el caudal. Estos sistemas de regulación tan rudimentarios tienen el inconveniente de ser muy costosos y poseer una baja eficiencia, pero se pueden catalogar como grandes avances desde el punto de vista de la regulación de sistemas.

Las confederaciones hidrográficas han sido las encargadas de modernizar, mejorar y gestionar estas infraestructuras, incorporando sistemas automáticos a las infraestructuras ya existentes, para así facilitar al personal de mantenimiento la gestión sus tareas.

Muchos de los sistemas automáticos que se han ido incorporando, no tenían en cuenta ningún tipo de regulación, simplemente facilitaban el manejo de algunas infraestructuras, como por ejemplo el accionamiento de las compuertas a través de motores eléctricos, pero nunca atendiendo a la regulación de los caudales, sino simplemente atendiendo a la mejora desde el punto de vista del manejo de los accionamientos,

La incorporación de sensores para la captación de medidas físicas y su posterior procesado para accionar de forma autónoma y automática los distintos elementos de control de caudal se podrían catalogar como el inicio de la regulación automática de los caudales en los canales de riego y distribución

Con este tipo de soluciones se intenta facilitar las tareas encomendadas a los operarios de las confederaciones hidrográficas, siendo solamente necesaria la presencia humana en tareas de supervisión y gestión.



**FIGURA 1.2-02**  
- SISTEMA DE REGULACIÓN NO AUTOMÁTICO EMPLEADO EN LA ANTIGÜEDAD. LA REGULACIÓN ERA LLEVADA A CABO POR EL ACEQUIERO.

### 1.3- SOLUCION PROPUESTA

En la actualidad, se tiende a automatizar todos los procesos de accionamiento, manipulación, transporte y regulación de caudal en canales de regadío y distribución, y gestionar los recursos hídricos en un centro de control desde el que se supervisan los distintos procesos para así facilitar las tareas de gestión de la infraestructura hidráulica. Para ello es necesario disponer de:

- Un sistema de supervisión, gestión y control fiable.
- Una infraestructura de comunicaciones, robusta y eficiente, que permita interactuar con los distintos elementos control.
- Un sólido sistema de captación de las distintas magnitudes físicas necesarias para el posterior accionamiento de los distintos elementos de control en función de los valores medidos.

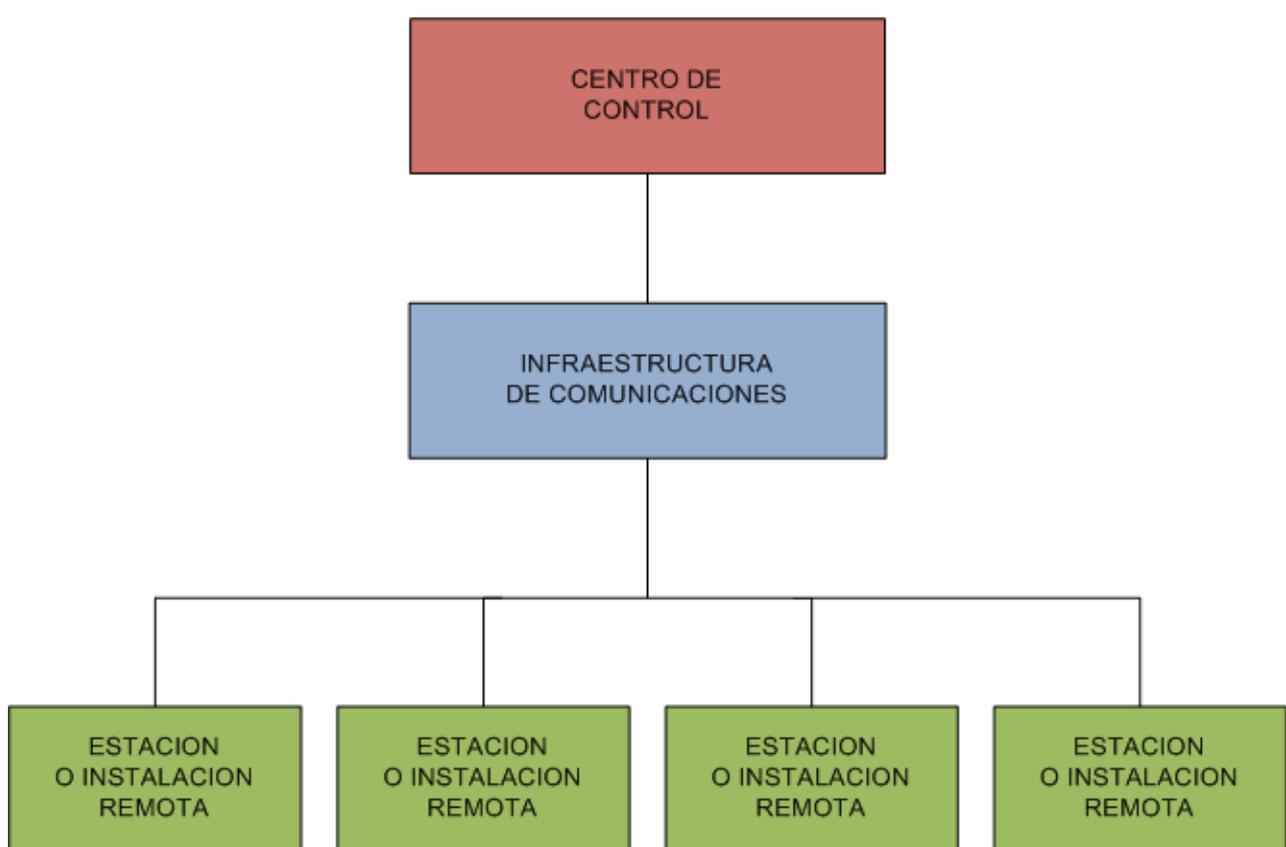


FIGURA 1.2-03  
- ESTRUCTURA DE LOS DISTINTOS NIVELES JERÁRQUICOS DEL SISTEMA.

A continuación, pasamos a hacer una pequeña descripción de los distintos niveles jerárquicos en los que se clasificarán los diferentes elementos que harán posible la correcta automatización de la infraestructura hidráulica y la posterior regulación del sistema.

**Centro de control.** Recibirá la información de todas las estaciones remotas y realizará un control y una supervisión del sistema en su conjunto.

**Infraestructura de Comunicaciones.** Permite comunicar todas las estaciones remotas con el centro de control de forma que se reciba en este la información del estado del sistema y se envíen desde el centro de control a las estaciones remotas las consignas a mantener para la regulación del canal

**Estaciones remotas de control (ER).** Reciben la información de los sensores, la tratan y procesan. Envían la información al centro de control y reciben las consignas que este genera. Estas estaciones remotas incluirán:



FIGURA 1.2-04  
- CANAL DE DISTRIBUCIÓN Y ABASTECIMIENTO DE AGUA RECIÉN REVESTIDO.

- **Equipos de medida (sensores).** Encargados de captar las magnitudes físicas necesarias para realizar el control del sistema (niveles, caudales, posiciones de compuertas, etc.) y convertirlas a señales interpretables por las estaciones remotas (señales 4-20mA, contactos libres de tensión, etc.)

- **Equipos de control.** Básicamente los cuadros de maniobra de las compuertas que son los encargados de trasladar a las mismas las consignas del sistema de control.

La solución que se propone consiste en dotar a cada estación remota de unos equipos de medida y control y unos equipos de comunicación de forma que éstas interactúen con el Centro de Control.

El sistema estará formado por un Centro de Control, Almenara 1, Almenara 2 y Toma 1. Desde el Centro de Control se asignaran las consignas y parámetros necesarios para el funcionamiento de dicho sistema.

El control de regulación se realizará de forma local (descentralizado), es decir, cada estación regulará su tramo partiendo de los datos de los equipos de medida y las consignas establecidas por el Centro de Control. De esta forma se libera al Centro de Control de la carga de cálculo que implica la regulación de todas las estaciones.

El tramo delimitado por Almenara 1 y Almenara 2 se controlará por nivel, es decir, el nivel en dicho tramo debe ser constante, independientemente de si existe o no consumo en la Toma 1. El nivel en el tramo estará consignado por el Centro de Control.

El consumo de la Toma 1 se establecerá mediante petición de volumen de agua desde el Centro de Control.

El desarrollo del Centro de Control no forma parte del presente proyecto, sin embargo, sí se utilizan y exponen partes de dicha estación, como son equipos de comunicaciones, variables, consignas, etc.

La solución particular presentada en esta memoria para un tramo genérico será extrapolable a una infraestructura hidráulica con múltiples tramos.



## CAPITULO 2.- DESCRIPCION INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA.

La infraestructura hidráulica que aquí tratamos es concebida como un "Canal con funcionamiento a la demanda, con sistema de regulación local, supervisado desde un centro de control". Para ello el canal de conducción cuenta con una serie de almenaras de regulación dotadas con sendas compuertas de sector tipo Taintor, accionadas mediante actuadores que serán gestionados por PLCs locales.

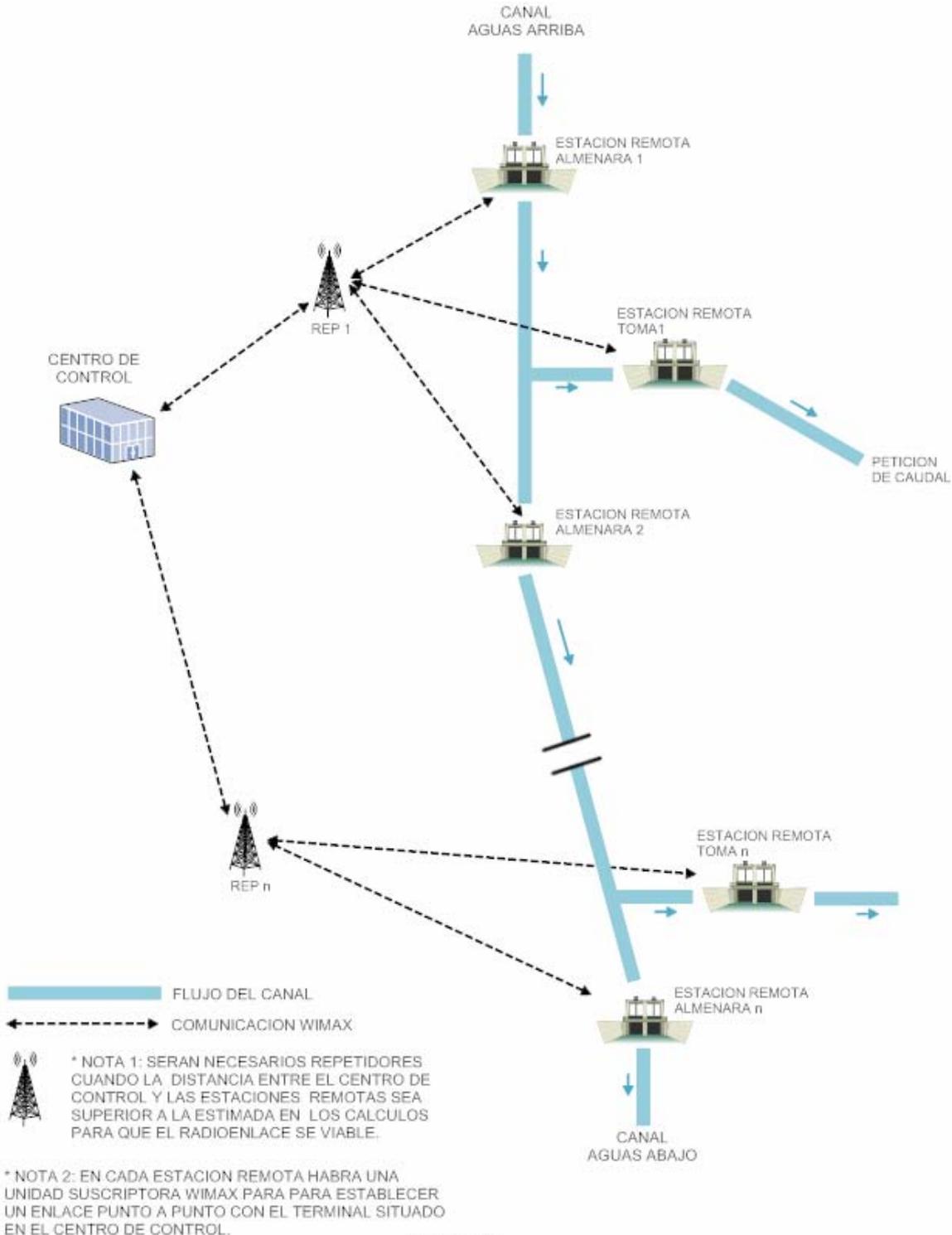


FIGURA 2-01  
- DISTRIBUCIÓN GENERAL DEL SISTEMA. SE MUESTRA UNA VISIÓN GENERAL DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA Y UBICACIÓN DE LOS DISTINTOS PUNTOS DE CONTROL.

En líneas generales, la infraestructura hidráulica proyectada aquí, responde al esquema en que el trazado del canal queda unido por tramos de conducción con un funcionamiento en lamina libre, que llevarán intercalados a lo largo de su desarrollo almenaras de regulación de doble compuerta dotadas de aliviaderos (by-Pass) espaciadas del orden de 10 Kms, que controlaran niveles localizados en el canal y que a su vez serán supervisadas y monitorizadas de forma centralizada por el Centro de Control. Todo lo dicho anteriormente se puede ver en la figura 2-01.

## 2.1. ALMENARAS DE REGULACIÓN

Se denomina almenara, a la obra singular en el canal que permite la colocación de compuertas móviles que sirvan de elementos de regulación de los caudales circulantes, incluyendo todas las obras complementarias para tal fin, como pueden ser vertederos internos (by-pass), arquetas de medida y caseta de control. En las siguientes figuras 2.1-01, 2.3-01 y 2.4-02 se pueden ver los elementos enumerados anteriormente.

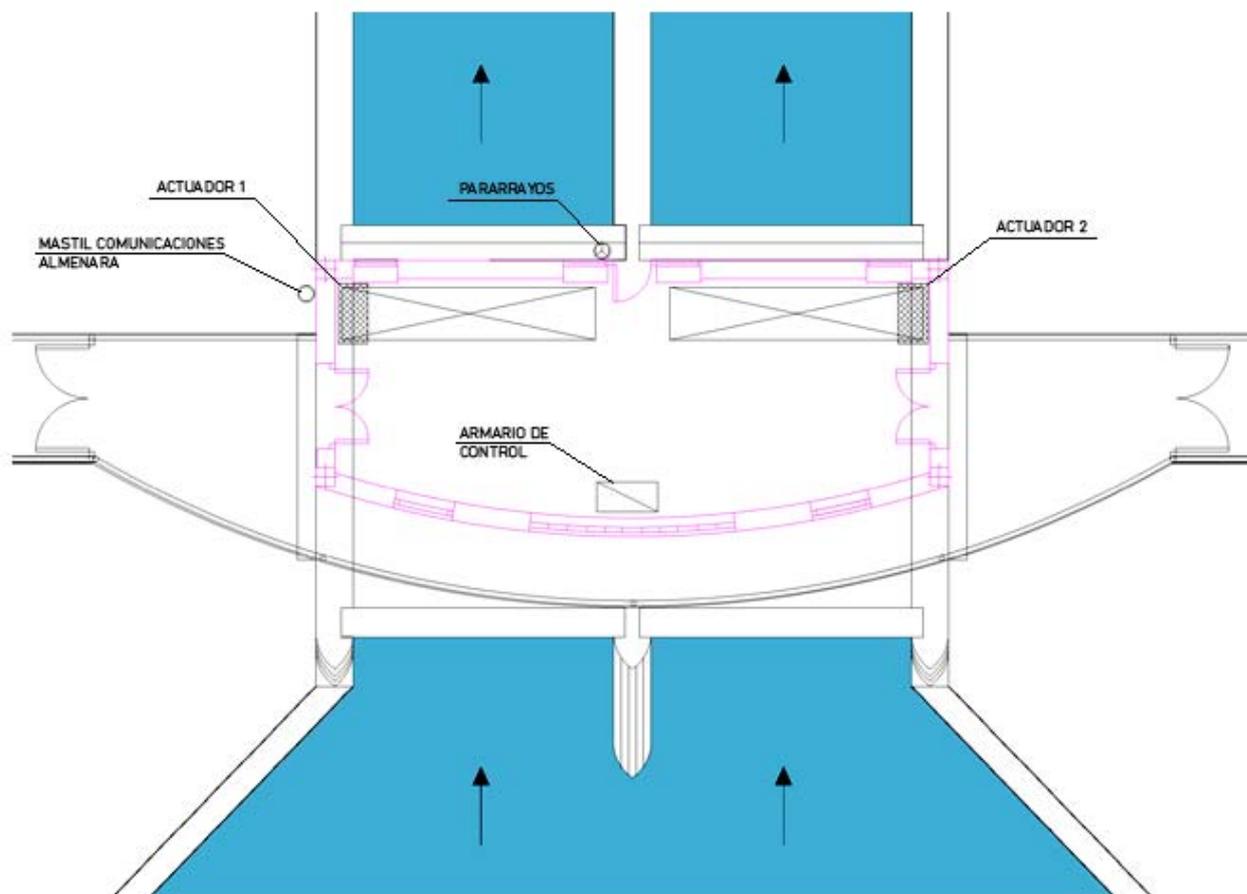


FIGURA 2.1-01 - DIBUJO EN PLANTA DE UNA ALMENARA DE REGULACIÓN.

## 2.2 COMPUERTAS

Cada almenara dispone de dos compuertas en paralelo, dotadas de accionamientos independientes, que impiden que se produzca de forma fortuita el corte del canal por avería de alguna compuerta. Las compuertas se accionarán mediante actuadores. La forma de la compuerta es de sector circular tipo Taintor, ver figuras 2.2-01 y 2.2-02.

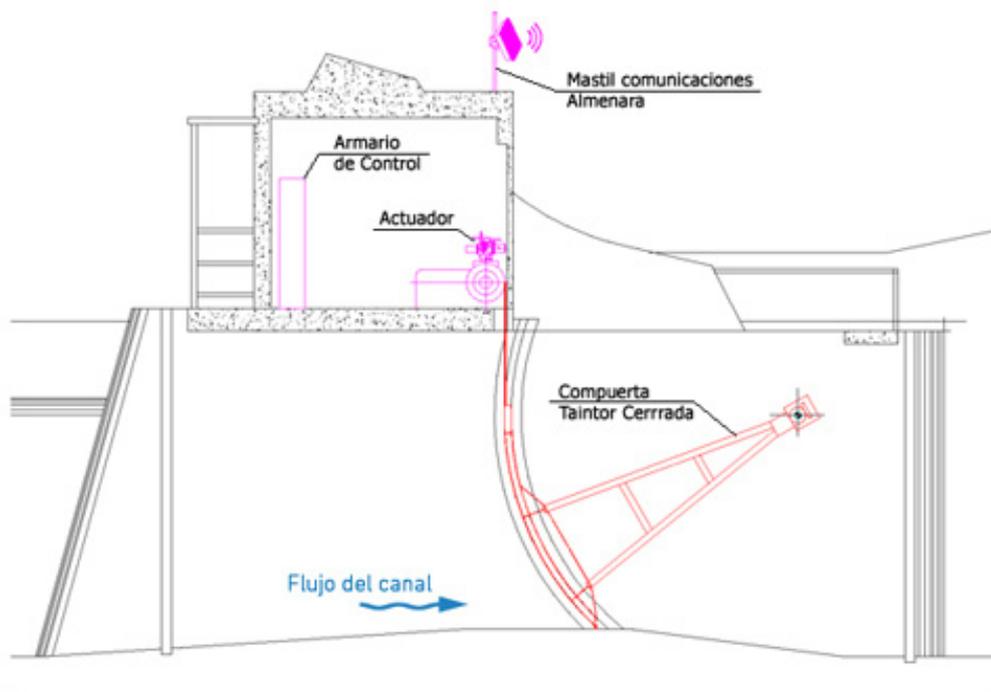


FIGURA 2.2-01  
- DIBUJO EN PERFIL DEL ACCIONAMIENTO DE UNA COMPUERTA DE SECTOR CIRCULAR TAINTOR

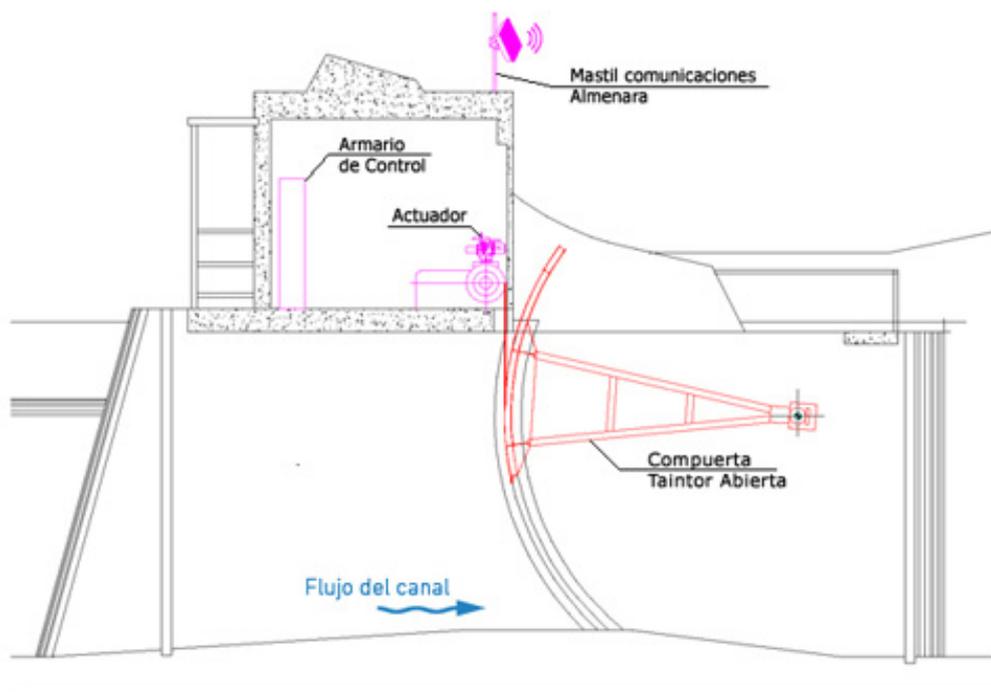


FIGURA 2.2-02  
- DIBUJO EN PERFIL DEL ACCIONAMIENTO DE UNA COMPUERTA DE SECTOR CIRCULAR TAINTOR (ABIERTA).

Las compuertas constan de tres partes diferenciadas.

- Tablero. Es la parte móvil de la compuerta. Cierra el paso del fluido al bajar y lo deja pasar al subir.
- Marco / Guía. Está anclado en el hormigón. Su utilidad es permitir que el tablero se deslice y se asiente en él para conseguir la estanqueidad.
- Accionamiento. Es el mecanismo que asegura la maniobrabilidad del tablero.

La principal ventaja de las compuertas de sector circular tipo Taintor frente a otro tipo de compuertas, como pueden ser las verticales, ver figura 2.2-03, es que la fuerza necesaria para maniobrarlas es relativamente inferior, con el consiguiente ahorro de energía.

También es conveniente resaltar las siguientes características de las compuertas tipo Taintor:

- Un buen funcionamiento hidráulico, debido a su pequeño coeficiente de contracción.
- Accionamiento simple y preciso, son movidas mediante energía eléctrica respondiendo a las consignas emitidas rápida y fiablemente.
- La disposición de juntas laterales y juntas inferiores permite conseguir una estanqueidad total.

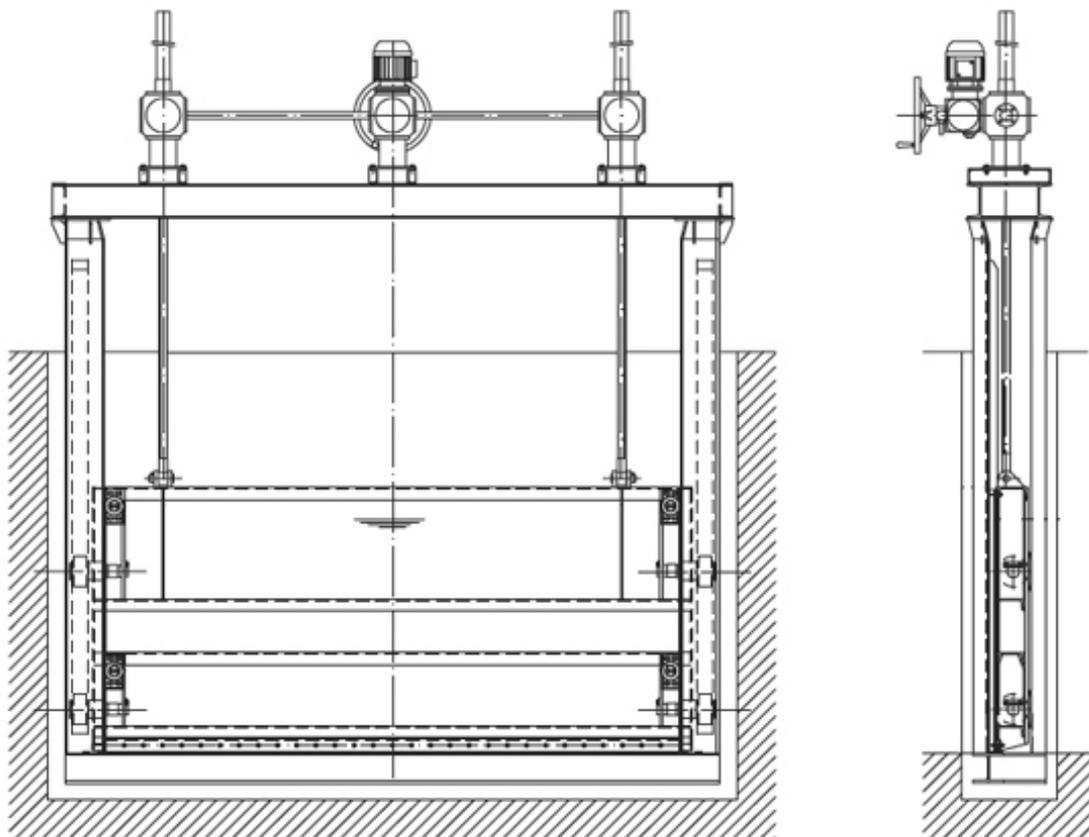


FIGURA 2.2-03

- DIBUJO DE UNA COMPUERTA VERTICAL TIPO VAGÓN PARA CANALES DE GRANDES DIMENSIONES, MARCA COUTEX.

## 2.3 ALVIADEROS INTERNOS (BY-PASS)

Al ser la almenara de compuertas un elemento que puede provocar un corte en el flujo del caudal circulante, se han dotado de vertederos internos que en caso de producirse una maniobra errónea eviten el desbordamiento del canal.

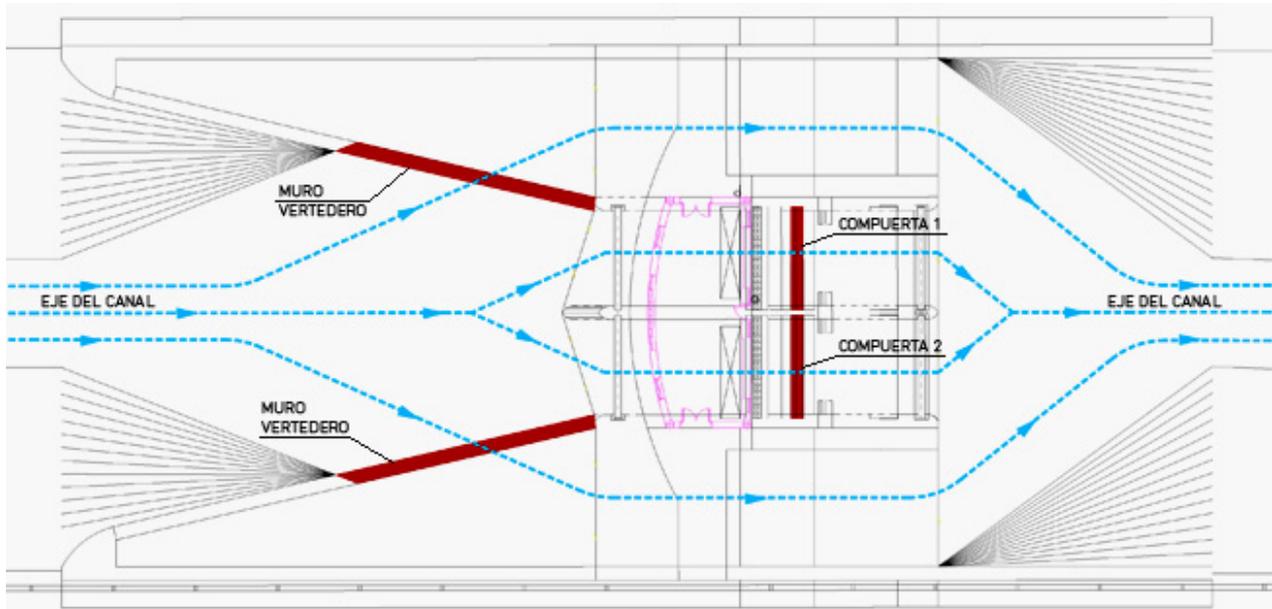


FIGURA 2.3-01  
- ALVIADEROS INTERNOS (BY-PASS). SE MUESTRA EL FLUJO DEL CANAL A TRAVÉS DEL MURO VERTEDERO Y A TRAVÉS DE LAS COMPUERTAS (BY-PASS).

La elección de los vertederos internos en lugar de la colocación de aliviaderos de emergencia evita la pérdida de agua hacia el exterior del canal, ya que el objetivo buscado por la regulación es conseguir el máximo ahorro de los recursos hidráulicos disponibles. Los vertederos internos permiten el paso del caudal por encima de ellos sin llegar a desbordar el canal. En caso de fallo del suministro eléctrico, las compuertas bajan hasta cerrarse, y el caudal que viene lanzado por el canal pasará por el vertedero y por encima de las compuertas que también pueden funcionar como vertederos. De esta forma se consigue que no se vierta al exterior caudal.

## 2.4 ARQUETAS DE MEDIDA PARA SENSORES

Los sensores de nivel irán montados en arquetas de medida, ver figura 2.4-01 y 2.4-02. Dichas arquetas estarán conectadas con el canal mediante una tubería a una cota muy cercana a la base del canal. Con esta solución es prácticamente imposible que se produzcan espumas o flotantes que afecten a la medida tomada por los sensores.

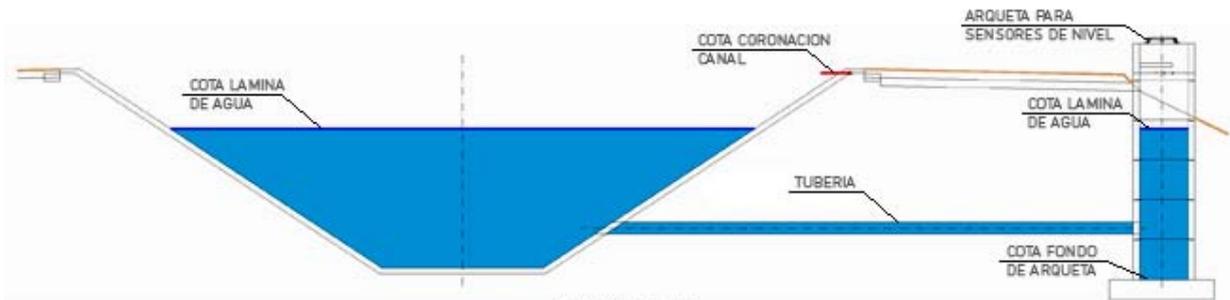


FIGURA 2.4-01  
- DIBUJO EN SECCIÓN DE UNA ARQUETA DE MEDIDA PARA SENSORES DE NIVEL Y SU PORTERIOR CONEXIÓN CON EL CANAL MEDIANTE TUBERÍA.

En la figura 2.4-02, se muestran la ubicación de las arquetas de medida, tanto aguas arriba como aguas debajo de la almenara de control.

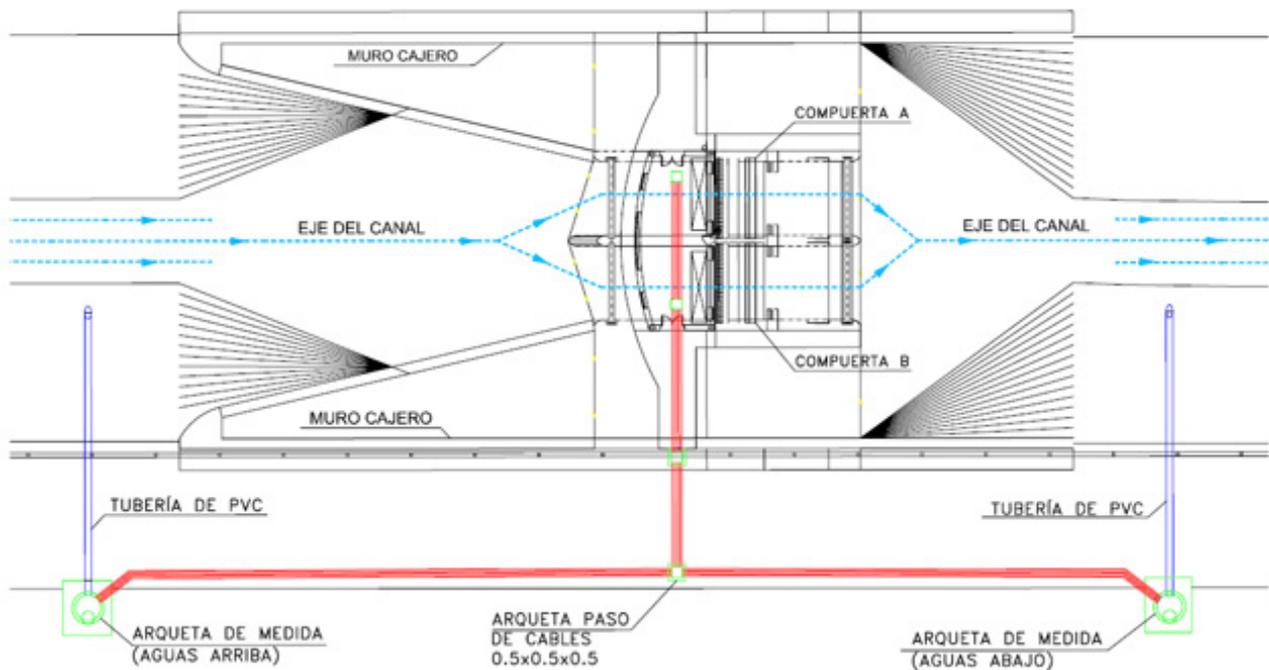


FIGURA 2.4-02  
- DIBUJO EN PLANTA DE LA UBICACIÓN DE LAS ARQUETAS DE MEDIDA EN ALMENARA.

## 2.5 TOMA

Mediante las tomas, se extrae caudal de forma controlada del flujo principal del canal para diversos usos, como regadío y abastecimiento.

Se solicita un volumen de agua determinado, y mediante los controles necesarios, se extrae ese caudal del flujo principal del canal. Para controlar que el caudal extraído sea el correcto se realizan medidas a través de caudalímetros y se regula la extracción a través de válvulas controladas automáticamente.

En la figura 2.5-01 podemos ver un dibujo en sección del punto de control de toma, situado entre las 2 almenaras de control. En el dibujo se muestran todos los elementos que gestionan la estación remota de toma.

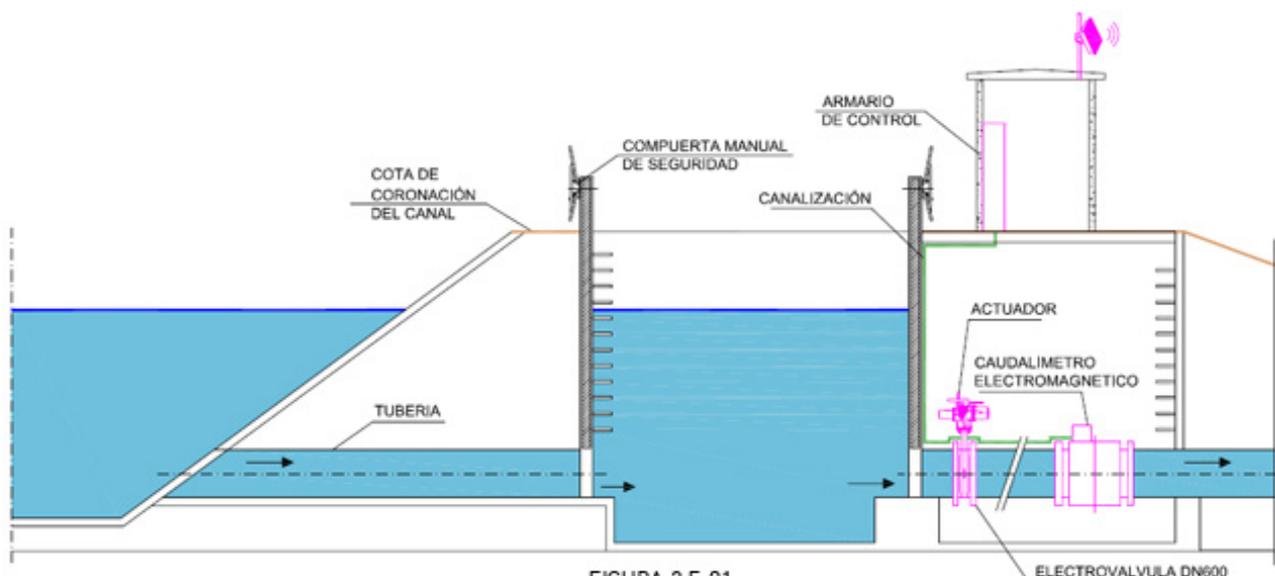


FIGURA 2.5-01  
- DIBUJO EN PERFIL DEL PUNTO DE CONTROL TOMA.

En el punto de control de toma, se ha optado por una válvula tipo mariposa con accionamiento automático mediante actuador.

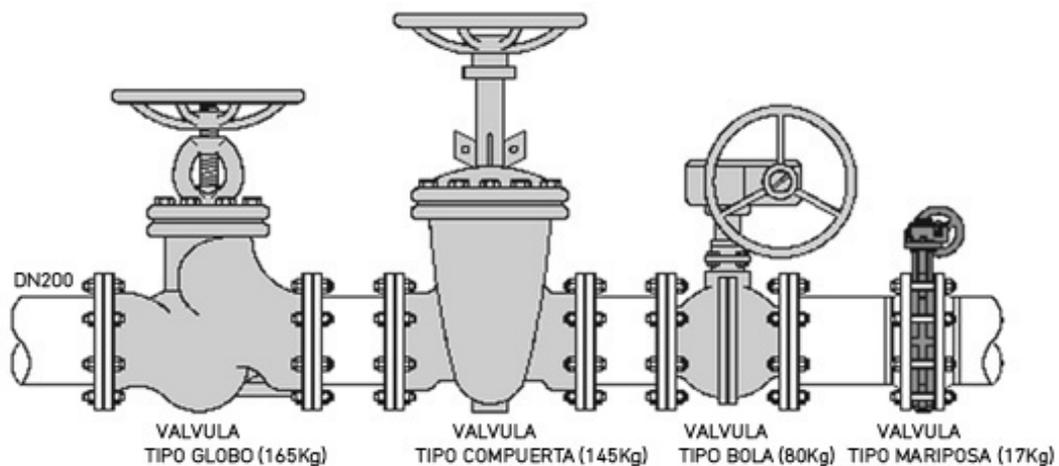


FIGURA 2.5-02 - DIFERENTES TIPOS DE VALVULAS.

Las ventajas de este tipo de válvulas frente a otras, como por ejemplo, las válvulas de tipo compuerta, bola o globo son las siguientes:

- Su peso es reducido. Ver figura 2.5-02.
- Su montaje y desmontaje se realiza con rapidez, debido a sus pequeñas dimensiones.
- Poseen una baja pérdida de carga.

## CAPITULO 3.- DESCRIPCION INFRAESTRUCTURA ELECTRICA.

Todos los procesos automáticos llevados a cabo en la infraestructura hidráulica se realizan mediante dispositivos electro-mecánicos.

A través de la automatización de la infraestructura, se suprimen total o parcialmente las tareas manuales realizadas por los operarios de mantenimiento. Este es el objetivo final de la implantación de estos sistemas en la infraestructura hidráulica, además de realizar un correcto, eficaz y fiable control del sistema.

A continuación pasaremos a describir el equipamiento necesario en los distintos puntos de control, para después, describir más detalladamente todos los dispositivos electro-mecánicos necesarios para llevar a cabo los procesos automáticos que hacen posible la regulación, el control y la gestión de la infraestructura.

### 3.1.- ESTACIONES DE CONTROL

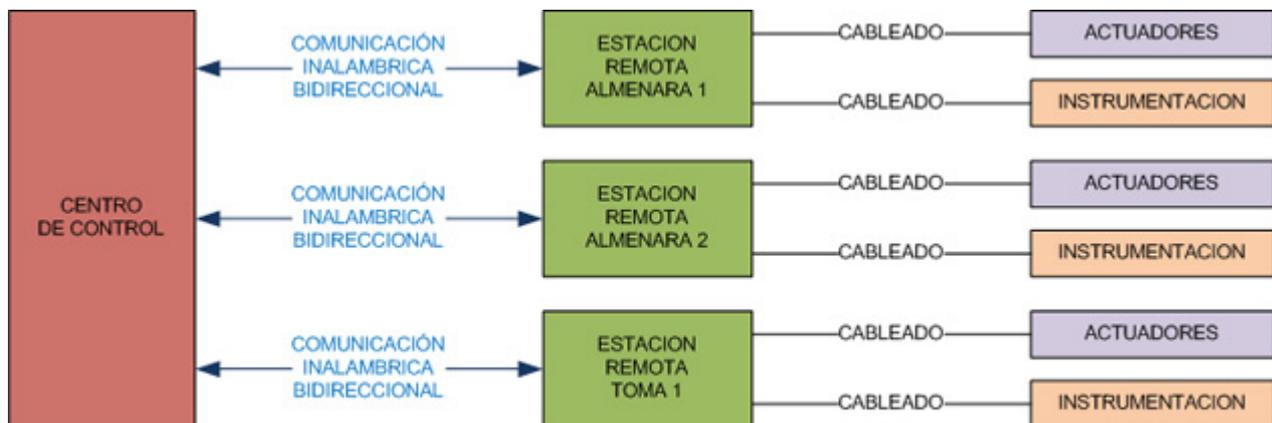


FIGURA 3.1-01  
ESTRUCTURA JERÁRQUICA DEL SISTEMA.

#### 3.1.1- CENTRO DE CONTROL

Es la estación principal y el encargado de recibir, almacenar y visualizar los datos de la infraestructura hidráulica, además de enviar consignas y parámetros, a través de la red inalámbrica de comunicaciones a las estaciones remotas. También, a través de monitores y un software SCADA, se encargará de supervisar el desarrollo de los procesos llevados a cabo en la infraestructura.

Como ya hemos señalado anteriormente, el desarrollo del Centro de Control en su totalidad no forma parte del cometido del proyecto, sin embargo, es necesario explicar sus partes principales y los equipos que lo conforman.

#### • Equipamiento del Centro de Control.

Dispondrá de:

- 1 PC INDUSTRIAL, SIMATIC PCS 7 BOX (SIEMENS), que incluirá:
  - SIMATIC Box PC 627, 24 V DC, with CPU WinAC Slot 416 V4.0

Este PC tendrá instalado el siguiente Software:

- STEP 7 V5.4 SP4 (Para configurar y programar los distintos controladores SIMATIC)
- SIMATIC WinCC V6.2 SP2 (Para visualizar y controlar los distintos procesos de la instalación)
- SINAUT ST7cc V2.7 (Software de supervisión en PC. Esta basado en SIMATIC WinCC y adaptado especialmente a la transmisión de datos, controlada por eventos y con etiqueta de fecha/hora, del sistema SINAUT.)
- SINAUT ST7 Software package 2007 (Para configurar, diagnosticar y operar el sistema SINAUT. Para ejecutarlo se necesita una versión instalada en el equipo del software STEP 7 V5.4 SP4)
- SIMATIC NET PC Software Edition 2006 (Software para establecer las conexiones de red)

El software anterior permitirá dotar al PC central con características de servidor, donde estará alojado el software SCADA y donde se podrá visualizar el estado de los distintos puntos de control.

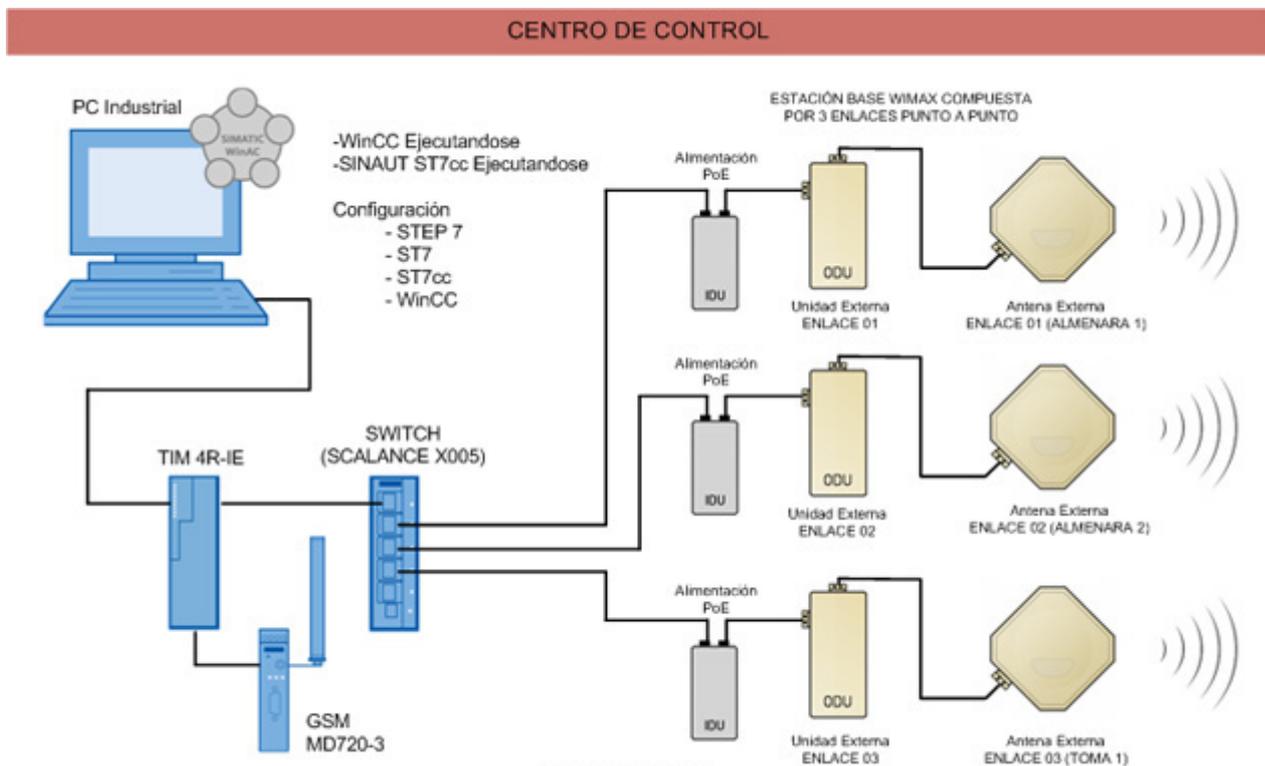


FIGURA 3.1.1-01  
- CONEXIONADO DEL CENTRO DE CONTROL.

Con respecto a la infraestructura de comunicaciones, dispondrá de:

- 1 estación Base WIMAX, compuesta por 3 enlaces (Punto a Punto) modelo BreezenetNET B100 (ALVARION), mediante la que se establecerá la red inalámbrica de comunicaciones.
- 1 Módulo de TELECONTROL TIM 4R-IE (SIEMENS), para gestionar eficientemente la comunicación con las distintas estaciones remotas y separar los datos de comunicaciones del resto de datos que circulan por la Red Ethernet.
- 1 Modem GSM/GPRS, Modelo MD720-3 (Siemens) para enviar SMS.

Como aclaración, decir que se ha optado por enlaces Punto a Punto, por ser más fiables que un enlace multipunto. Si la estación Base se avería, se pierden todas las conexiones, en cambio si todos los enlaces son punto a punto hacemos el sistema más robusto.

A parte, con los enlaces Punto a Punto se garantiza un ancho de banda fijo para cada enlace, lo que hace al sistema mucho más fiable.

### SOFTWARE SIEMENS ORIENTADO AL SCADA

Aunque no es el cometido del proyecto ni desarrollar ni implementar el software SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), sí que vamos a describir el software necesario en caso de utilizar una plataforma de supervisión, control y adquisición de Datos Siemens.

Existen dos software de supervisión y control en PC para la plataforma Siemens (SINAUT ST7cc y ST7sc).

#### - SINAUT ST7cc

Es un sistema de supervisión, basado en SIMATIC WinCC, para SINAUT ST7. Está adaptado especialmente a la transmisión de datos, controlada por eventos y con etiqueta de fecha/hora, del sistema SINAUT.

SINAUT ST7cc actúa tiene la capacidad de actuar como estación central de telecontrol o centro de control.

#### - SINAUT ST7sc

El software SCADA Connect SINAUT ST7sc permite conectar estaciones remotas SINAUT ST7 a sistemas de supervisión que pueden funcionar como cliente OPC.

OPC (OLE for Process Control) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos. Este estándar permite que diferentes fuentes envíen datos a un mismo servidor OPC, al que a su vez podrán conectarse para consultarlos diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos, basta que tengan un driver OPC.

Mediante SINAUT ST7sc otros fabricantes de sistemas de supervisión tienen la posibilidad de conectarse a SINAUT sin tener que integrar una interfaz SINAUT. La comunicación se realiza por OPC, SINAUT ST7sc crea como servidor OPC la interfaz entre el sistema SINAUT y el sistema de supervisión, que se conecta como cliente OPC.

Al tratarse de un Centro de control relativamente complejo se ha optado por configurar el Centro de control con SINAUT ST7cc integrado en PC y basado en WinCC, descartando la configuración con SINAUT ST7sc, ya que no es necesario interactuar con otros fabricantes.

### 3.1.2- ESTACIONES REMOTAS

Son las encargadas de realizar la adquisición de los distintos parámetros del canal para su posterior transmisión al Centro de Control, así como de accionar los distintos elementos que hacen posible el control y la regulación de la infraestructura.

#### • Estación remota ALMENARA.

Las estaciones remotas Almenara se encargan de accionar las compuertas que regulan el flujo del canal y medir el nivel existente en el canal.

A continuación vamos a enumerar los elementos que incorporará la estación remota Almenara, para su correcto funcionamiento.

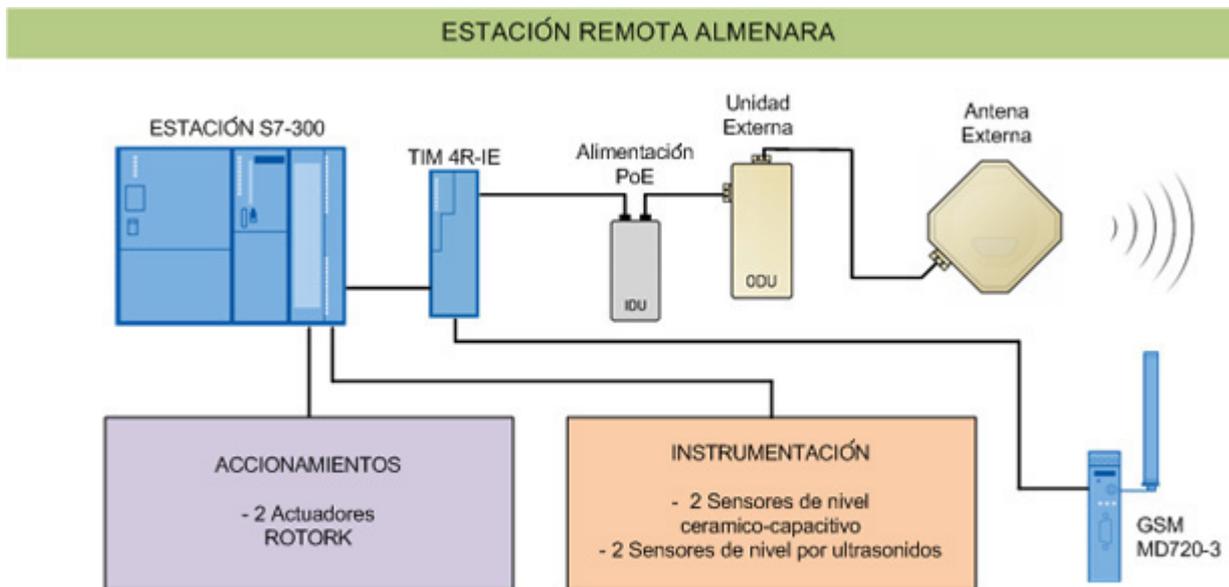


FIGURA 3.1.2-01  
- CONEXIONADO DE LA ESTACIÓN REMOTA ALMENARA.

#### EQUIPAMIENTO DE LA ESTACIÓN REMOTA ALMENARA

La estación S7-300 de Siemens incluirá

- 1 CPU 315-2 PN/DP, (Siemens).
- 1 Módulo de entradas digitales SM321 DI32 (Siemens)
- 1 Módulo de salidas digitales SM322 DO16 (Siemens)
- 1 Módulo de entradas analógicas SM331 AI8 (Siemens)
- 1 Módulo de salidas analógicas SM332 AO4 (Siemens)

- 2 Actuadores ROTORK, Modelo IQ 25, uno para cada compuerta, que se encargarán de accionarlas.

- 1 SAI DLP 150 (RIELLO UP), Sistema de Alimentación Interrumpida, que permitirá alimentar al sistema cuando se produzcan cortes de energía.

#### INSTRUMENTACION

En la arqueta de medida situada Aguas Arriba

- 1 SENSOR CERAMICO-CAPACITIVO (VEGAWELL 52, VEGA)

- 1 SENSOR DE NIVEL POR ULTRASONIDOS (VEGASON 61, VEGA)  
Que serán los encargados de medir el nivel en el canal.

En la arqueta de medida situada Aguas Abajo

- 1 SENSOR CERAMICO-CAPACITIVO (VEGAWELL 52, VEGA)
- 1 SENSOR DE NIVEL POR ULTRASONIDOS (VEGASON 61, VEGA)  
Que serán los encargados de medir el nivel en el canal.

#### INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES

- 1 UNIDAD SUSCRIPTORA WIMAX, MODELO BreezeNET B100 (ALVARION) para establecer un enlace Punto a Punto con la estación Base.
- 1 MODULO DE TELECONTROL TIM 4R-IE (SIEMENS) para poder comunicar de forma eficiente con el Centro de Control.
- 1 Modem GSM/GPRS, Modelo MD720-3 (Siemens) para enviar SMS.

#### OTROS

1 ARMARIO ELECTRICO ELDON MCS18085 R5 (1800x800x500) en el cual se fijaran mediante racks todos los equipos. Ver Anexo B. Planos (Plano 101).

#### ● Estación remota TOMA.

La estación remota Toma se encarga de accionar la válvula que suministrará el flujo de caudal solicitado por demanda.

A continuación vamos a enumerar los elementos que incorporará la estación remota Toma, para su correcto funcionamiento.

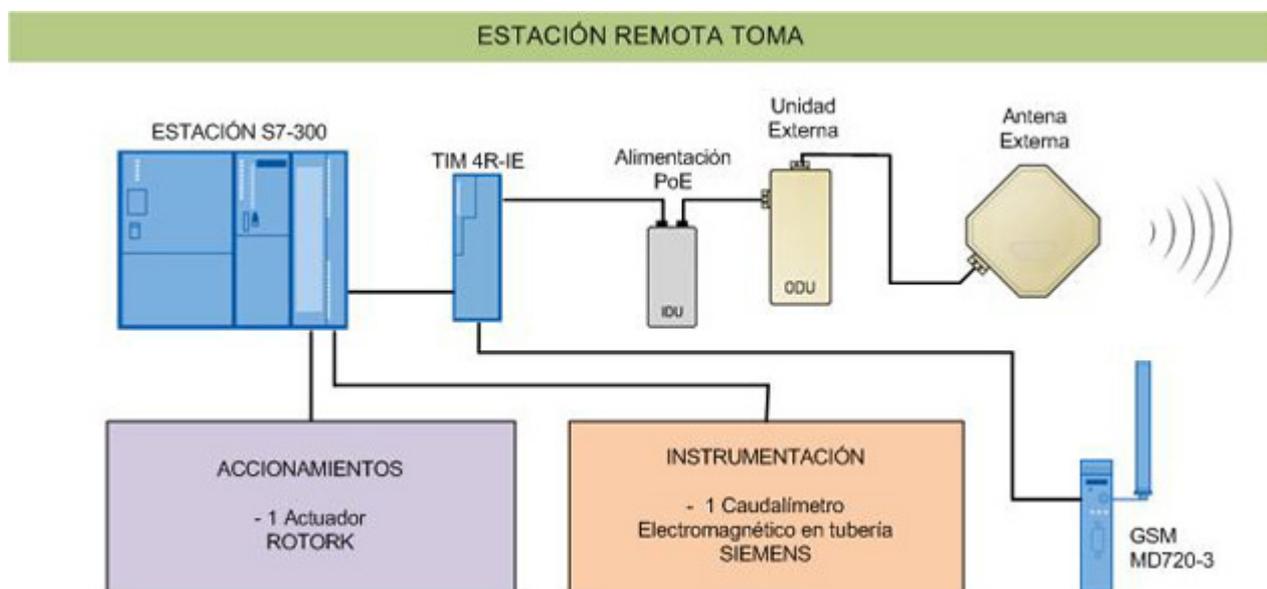


FIGURA 3.1.2-02  
- CONEXIONADO DE LA ESTACIÓN REMOTA TOMA.

#### EQUIPAMIENTO DE LA ESTACIÓN REMOTA TOMA

La estación S7-300 de Siemens incluirá

- 1 CPU 315-2 PN/DP, (Siemens).
- 1 Módulo de entradas digitales SM321 DI32 (Siemens)

- 1 Módulo de salidas digitales SM322 DO16 (Siemens)
- 1 Módulo de entradas analógicas SM331 AI8 (Siemens)
- 1 Módulo de salidas analógicas SM332 AO4 (Siemens)
  
- 1 Actuador ROTORK, Modelo IQ 25, que se encargará de accionar la válvula.
  
- 1 SAI DLP 150 (RIELLO UP), Sistema de Alimentación Interrumpida, que permitirá alimentar al sistema cuando se produzcan cortes de energía.

#### INSTRUMENTACIÓN

1 CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO Modelo Siemens compuesto por un sensor (Sitrans F M MAG 5100 W) y un transmisor (Sitrans F M MAG 6000)..

#### INFRAESTRUCTURA DE COMUNICACIONES

- 1 UNIDAD SUSCRIPTORA WIMAX, MODELO BreezeNET B100 (ALVARION) para establecer un enlace Punto a Punto con la estación Base.
- 1 MODULO DE TELECONTROL TIM 4R-IE (SIEMENS) para poder comunicar de forma eficiente con el Centro de Control.
- 1 Modem GSM/GPRS, Modelo MD720-3 (Siemens) para enviar SMS.

#### OTROS

1 ARMARIO ELÉCTRICO ELDON MCS18085 R5 (1800x800x500) en el cual se fijarán mediante racks todos los equipos. Ver Anexo B. Planos (Plano 201).

## 3.2- DISPOSITIVOS ELECTRO-MECANICOS

### 3.2.1- PLC (Programmable Logic Controller)

Los PLC son dispositivos lógicos programables utilizados para realizar el control de un proceso, por ejemplo, una impresora para imprimir los periódicos, un equipo de llenado para trasegar el cemento, el control de nivel y caudal de una infraestructura hidráulica, etc. El control del proceso responde a las directrices de un algoritmo (programa), situado en la memoria del PLC, comúnmente denominado autómatas programable.

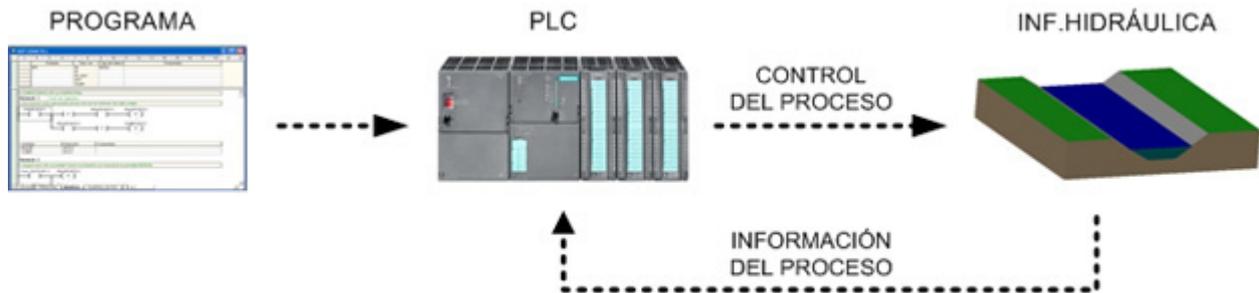


FIGURA 3.2.1-01  
- CONTROL DE UN PROCESO MEDIANTE PLC

#### • Principio de funcionamiento.

##### ESTRUCTURA DE UN PLC

Un PLC se puede definir como un sistema modular basado en un microcontrolador. Sus partes fundamentales son la Unidad Central de Proceso (CPU), la Memoria y el Sistema de Entradas y Salidas (E/S). La CPU se encarga de todo el control interno y externo del PLC y de la interpretación de las instrucciones del programa. En base a las instrucciones almacenadas en la memoria y en los datos que lee de las entradas, genera las señales de las salidas. La memoria se divide en dos, la memoria de solo lectura o ROM y la memoria de lectura y escritura o RAM. La memoria ROM almacena programas para el buen funcionamiento del sistema. La memoria RAM está conformada por la memoria de datos, en la que se almacena la información de las entradas, las salidas y las variables internas; y por la memoria de trabajo, en la que se procesa el código (programa) y los datos obtenidos. El sistema de Entradas y Salidas recopila la información del proceso (entradas) y genera las acciones de control del mismo (salidas). Los dispositivos conectados a las entradas pueden ser pulsadores, interruptores, finales de carrera, termostatos, presostatos, detectores de nivel, caudalímetros, etc. Los dispositivos de salida son también muy variados: Pilotos, relés, contactores, variadores de frecuencia, actuadores, válvulas, etc.

##### ENTRADAS Y SALIDAS (E/S)

Las entradas y salidas (E/S) de un PLC son digitales, analógicas o especiales. Las E/S *digitales* se identifican por presentar dos estados diferentes: on u off, presencia o ausencia de tensión, contacto abierto o cerrado, etc. Los niveles de tensión de las entradas más comunes son 5 VDC, 24 VDC, 48 VDC y 220 VAC. Los dispositivos de salida más frecuentes son los relés. A través de los contactos de estos relés se pueden conectar los pilotos, contactores, actuadores, etc. Las E/S *analógicas* se encargan de convertir una magnitud analógica (tensión o corriente) equivalente a una magnitud física (temperatura, flujo, presión,

etc.) en un dato binario. Esto se realiza mediante conversores analógico-digitales (ADC's) integrados en las tarjetas de E/S *analógicas*. Los valores más comunes de E/S *analógicas* son 0-10V y 4-20mA. Por último, las E/S *especiales* se utilizan en procesos en los que las anteriores E/S vistas son poco efectivas, bien porque es necesario un gran número de elementos adicionales, bien porque el programa necesita de muchas instrucciones o protocolos especiales de comunicación necesarios para poder obtener el dato requerido por el PLC (comunicaciones, Buses de campo, Salidas de trenes de impulso, Control de motores paso a paso)

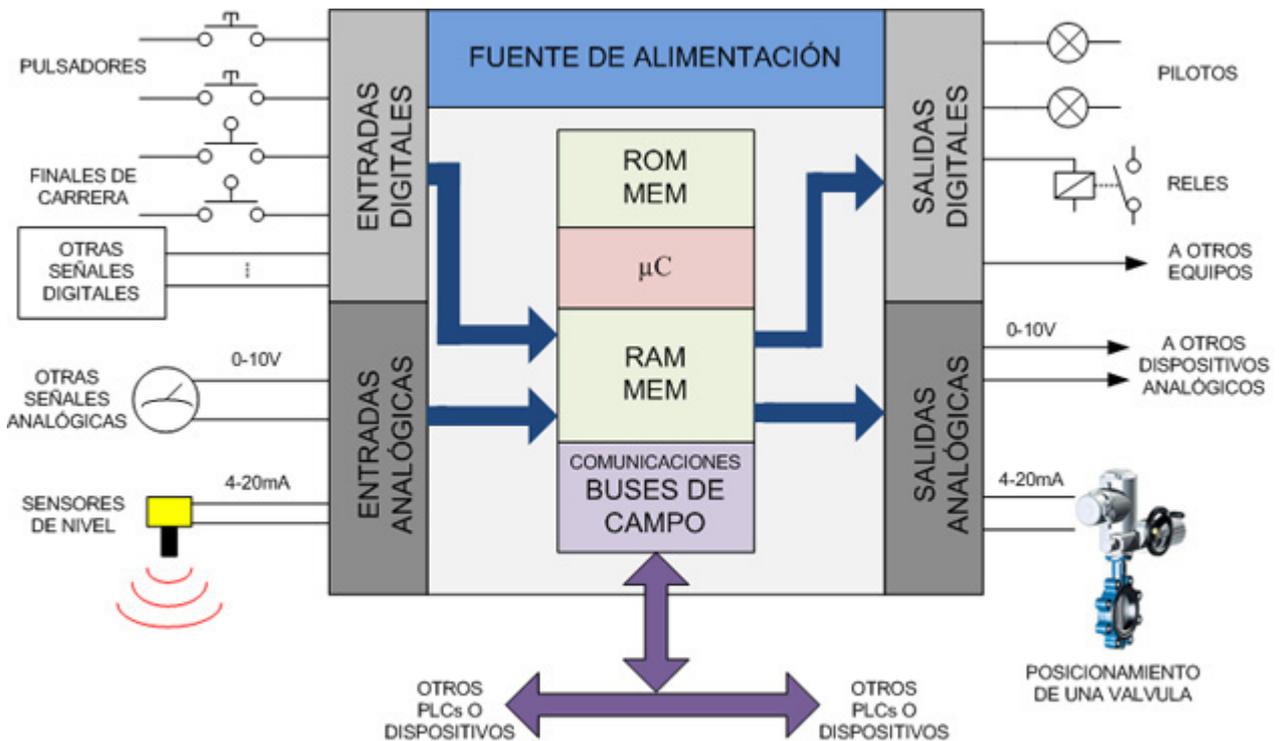


FIGURA 3.2.1-02  
- DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN PLC

### PROCESAMIENTO CICLICO



FIGURA 3.2.1-03  
- PROCESAMIENTO CÍCLICO DEL PLC

En el funcionamiento de los PLC el momento en que se leen las entradas y se escriben las salidas físicas tiene un orden determinado. El PLC antes de ejecutar el programa lee las entradas, después ejecuta el programa y finalmente escribe las salidas para posteriormente volver a comenzar el ciclo. Esto significa que no se activan las salidas durante la ejecución del programa y que no se ve afectado por un cambio en una entrada durante el ciclo.

Los programas en los PLC se ejecutan cíclicamente. Esto significa que cuando el programa finaliza en su última instrucción comienza de nuevo por la primera. Generalmente el programa de usuario en el PLC está estructurado en diferentes bloques de programación. Así el bloque principal de programa se ejecuta cíclicamente.

Dentro del bloque principal se pueden escribir directamente las instrucciones del programa o se pueden llamar a otros bloques destinados a ejecutar subprogramas. Una forma de escribir un programa de forma ordenada es llamar a diferentes subrutinas desde el bloque principal. De esta forma se ejecuta cíclicamente el bloque principal que a su vez va llamando a las diferentes subrutinas.

Debido a la forma de trabajo de los PLC se pueden eliminar las operaciones de bucle o salto hacia atrás causantes de bucles sin fin y fallos de operación.

El PLC completo se compone de CPU, tarjetas de entradas y salidas, ya sean digitales o analógicas, y fuente de alimentación. Además se complementa con módulos de comunicaciones. Todos estos elementos se describen a continuación.

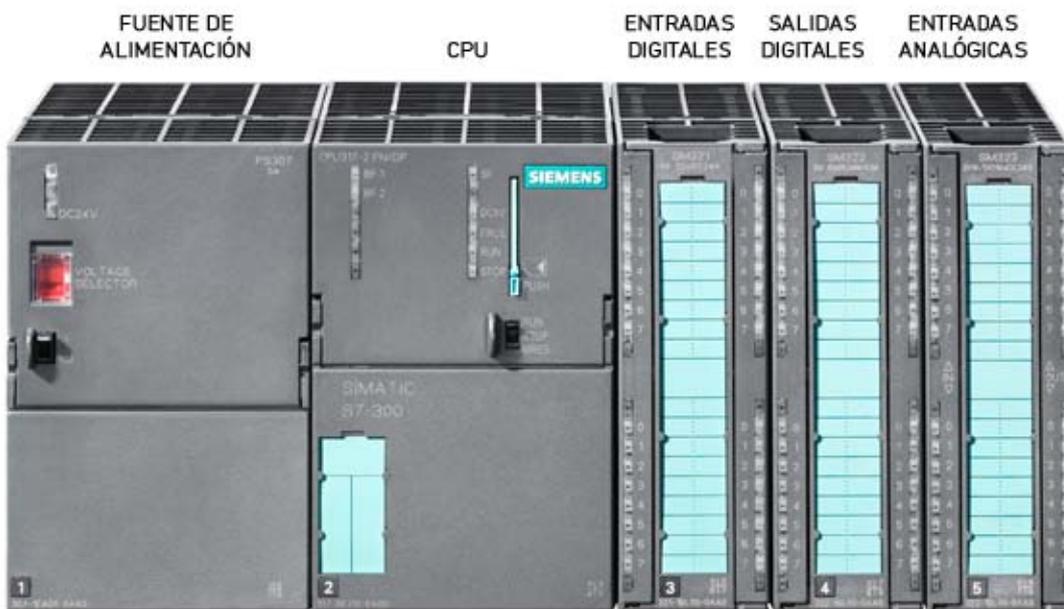


FIGURA 3.2.1-04  
- CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN PLC S7-300 SIEMENS

De entre todas las familias de PLC Siemens se ha optado por la S7-300. Si bien la familia S7-200 dispone de una capacidad suficiente para gestionar las señales digitales, se quedaba escasa en cuanto a cálculo y las posibilidades de comunicación. S7-400 es la gama alta de PLC Siemens con una potencia excesiva para las aplicaciones necesarias en las estaciones remotas. Por lo tanto la gama que más se ajusta a las necesidades de este proyecto es S7-300. Esta familia ofrece un amplio abanico de módulos para una adaptación óptima a las tareas requeridas

## • CPU 315-2 PN/DP, SIEMENS.

S7-300 ofrece una gran variedad de CPUs, compactas, estándar, tecnológicas, etc. Las CPU compactas disponen de la capacidad de procesamiento necesaria pero en su contra no disponen de los puertos de comunicaciones requeridos. En cuanto a la gama de CPU tecnológicas disponen de unas funcionalidades adicionales que no son necesarias en este proyecto, como control de movimiento, control de maquinas en serie, conexión de variadores, etc. La gama estándar ofrece las CPUs más adecuadas al proyecto. CPUs como la 315-2PN/DP son idóneas para la automatización del proceso. Además dispone de los puertos adecuados para realizar las comunicaciones de forma sencilla y eficaz a través de un único módulo TIM. Se ha tenido en cuenta en la elección de esta CPU la disponibilidad de puertos libres para posteriores ampliaciones o modificaciones de la aplicación. Si a esto se suma su reducido coste en comparación con las otras CPUs y además la alta compatibilidad con los diferentes equipos del proyecto obtenemos la CPU idónea.



FIGURA 3.2.1-05  
- CPU 315-2PN/DP, SIEMENS

### DATOS TÉCNICOS

- CPU con memoria de programa y capacidad funcional de nivel medio
- Gran capacidad de procesamiento con aritmética binaria y en coma flotante
- Interfaz PROFINET integrada
- Interfaz combinada MPI/maestro-esclavo PROFIBUS DP
- Áreas de direccionamiento (entradas y salidas)
  - Canales digitales
    - Entradas máx. 16384
    - Salidas máx. 16384
    - Entradas, de ellas centralizadas máx. 1024
    - Salidas, de ellas centralizadas máx. 1024
  - Canales analógicos
    - Entradas máx. 1024
    - Salidas máx. 1024
    - Entradas, de ellas centralizadas máx. 256
    - Salidas, de ellas centralizadas máx. 256
- Áreas de datos y su remanencia
- Marcas 2048 bytes
- Para el funcionamiento de la CPU se requiere una Micro Memory Card.
- Tiempos de ejecución para
  - Operaciones de bits 0,1  $\mu$ s
  - Operaciones de palabras 0,2  $\mu$ s
  - Aritmética en coma fija 2  $\mu$ s
  - Aritmética en coma flotante 3  $\mu$ s
- Temporizadores S7 256

### • Entradas Digitales (SM 321 DI32 DIGITAL INPUT)

Los módulos de entradas digitales son estándar en la gama S7-300. La principal diferencia entre módulos es el número de entradas disponibles. El módulo de entradas digitales SM 321; DI 32 x DC 24 V se distingue por las propiedades siguientes:

- 32 entradas, con separación galvánica en grupos de 16
- Tensión nominal de entrada 24 V DC
- Conector frontal de 40 pines.
- Longitud máxima de cable apantallado 1000m.
- Aislamiento ensayado de 500V DC
- Consumo típico de 6,5W
- Tensión de entrada para "1" desde 13 a 30V, para "0" de -30 a 5V
- Corriente de entrada 7mA, 24V
- Retardo de señal de 1,2 a 4,8ms.
- Indicación de estado mediante led.



FIGURA 3.2.1-06  
- ENTRADAS DIGITA-  
LES SM321 DI32

Las condiciones ambientales oscilan entre 0 a + 55° C para la temperatura de operación y entre -20 a 75° C para la temperatura de almacenamiento, admitiendo un humedad entre 10 y 90 % (sin condensación).

En la elección de este módulo se ha establecido un 20% de entradas libres en previsión de ampliaciones o modificaciones no proyectadas.

### • Salidas Digitales (SM 322 DO16 DIGITAL OUTPUT)

Los módulos de salidas digitales son estándar en la gama S7-300. La principal diferencia entre módulos es el número de salidas disponibles. El módulo de salidas digitales SM 322; DO 16 x DC 24V/0,5 A se distingue por las propiedades siguientes:

- 16 salidas con separación galvánica en grupos de 8.
- Intensidad de salida 0,5 A.
  - Tensión nominal de carga 24V DC.
  - Conector frontal de 20 pines.
  - Longitud máxima de cable apantallado 1000m.
  - Aislamiento ensayado de 500V DC
  - Consumo típico de 4,9W
  - Corriente de salida para "1" desde 5mA a 0,6A, para "0" 0,5mA.
  - Retardo de señal máx. 0,5ms.
  - Indicación de estado mediante led.
  - Rango de resistencia de carga de 48ohm a 4Kohm.



FIGURA 3.2.1-07  
- SALIDAS DIGITALES  
SM 322 DO16

Las condiciones ambientales oscilan entre 0 a + 55° C para la temperatura de operación y entre -20 a 75° C para la temperatura de almacenamiento, admitiendo un humedad entre 10 y 90 % (sin condensación).

En la elección de este módulo se ha establecido un 20% de salidas libres en previsión de ampliaciones o modificaciones no proyectadas.

### • Entradas Analógicas (SM 331 AI8 ANALOGIC INPUT)

Los módulos de entradas analógicas se distinguen por el número y el tipo de entradas o sensores que se pueden conectar. La resolución es diferente según el módulo así como los rangos de medida. El módulo elegido es el más adecuado a las necesidades del proyecto. El módulo de entradas analógicas SM 331; AI 8 x 13 bit se distingue por las propiedades siguientes:

- 8 entradas.
- Resolución del valor medido 12 bits + signo.
- Tipo de medición seleccionable:  
Tensión, 1-5V, 0-10V  $\pm 0,6\%$   
Intensidad, 0-20mA, 4-20mA  $\pm 0,5\%$   
Resistencia, 0-600ohm, 0-6Kohm  $\pm 0,5\%$   
Termoresistencia, Pt100, Ni100.
- Con separación galvánica respecto del bus posterior.
- Longitud máxima de cable apantallado 200m.
- Aislamiento ensayado de 500V DC
- Consumo típico de 0,4W
- Supresión de tensiones perturbadoras >86dB.
- Principio de medición por integración, tiempo de conversión básico 66ms.



FIGURA 3.2.1-08  
- ENTRADAS ANALÓGICAS SM 331 AI8

Las condiciones ambientales oscilan entre 0 a + 55° C para la temperatura de operación y entre -20 a 75° C para la temperatura de almacenamiento, admitiendo un humedad entre 10 y 90 % (sin condensación).

En la elección de este módulo se ha establecido un 20% de entradas libres en previsión de ampliaciones o modificaciones no proyectadas.

### • Salidas Analógicas (SM 332 AO4 ANALOGIC OUTPUT)

Los módulos de salidas analógicas se distinguen por el número y el tipo de salidas disponibles. Están diseñadas para su conexión a actuadores analógicos. El módulo elegido es el más adecuado a las necesidades del proyecto. El módulo de salidas analógicas SM 332; AO 4 x 12 bit se distingue por las propiedades siguientes:

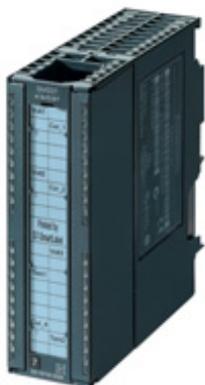


FIGURA 3.2.1-09  
- SALIDAS ANALÓGICAS SM 332 AO4

- 4 canales de salida.
- Resolución 12 bits.
- Tipo de medición seleccionable:  
Tensión, 0-10V 12bit,  $\pm 10V$  11bit + signo.  
Intensidad, 0-20mA 12 bit, 4-20mA 11bit + signo.
- Con separación galvánica respecto del bus posterior.
- Longitud máxima de cable apantallado 200m.
- Aislamiento ensayado de 500V DC
- Consumo típico de 3W
- Tiempo de conversión básico 0,8ms por canal.

Las condiciones ambientales oscilan entre 0 a + 55° C para la temperatura de operación y entre -20 a 75° C para la temperatura de

almacenamiento, admitiendo un humedad entre 10 y 90 % (sin condensación).

En la elección de este módulo se ha establecido un 20% de salidas libres en previsión de ampliaciones o modificaciones no proyectadas.

### ● **Instalación.**

Todo lo referente a la instalación, montaje y puesta en marcha del PLC se encuentra en el documento "*S7300\_cpu\_31x\_Configuracion*", ver Anexo A.

El conexionado y cableado con los diferentes equipos, así como la ubicación del mismo en el armario eléctrico, puede verse en el Anexo B, Planos.

### ● **Mantenimiento.**

En cuanto al mantenimiento del PLC toda la información necesaria se encuentra en el documento "*S7300\_cpu\_31x\_Configuracion*", ver Anexo A.

### 3.2.2.- ACTUADORES

Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control como, por ejemplo, una compuerta.

En nuestro caso, el actuador convertirá la señal de mando del PLC, entregada por la salida analógica (4-20mA), en el accionamiento de las compuertas a través de su motor eléctrico, su reducción mecánica y el movimiento de las sirgas acopladas.

El actuador ROTORK IQ 25/96 3010-000, dispone de todo lo necesario para la operación eléctrica local y remota de la compuerta. Incluye el motor eléctrico, los engranajes, el arrancador, los controles locales, los dispositivos para el control del par y la posición, así como la lógica de control. Todo ello dentro de una carcasa hermética con doble sellado. Todas estas características lo hacen idóneo para la aplicación en el proyecto frente a otros actuadores de control no integrado.

• **Principio de funcionamiento.**

El actuador está compuesto por varios módulos. El módulo principal es el Controlador que se encarga de accionar el motor en función del modo de funcionamiento y las entradas que recibe el actuador. El controlador acciona el motor a través del módulo Variador (motor switching module) que permite controlar la velocidad rotacional.

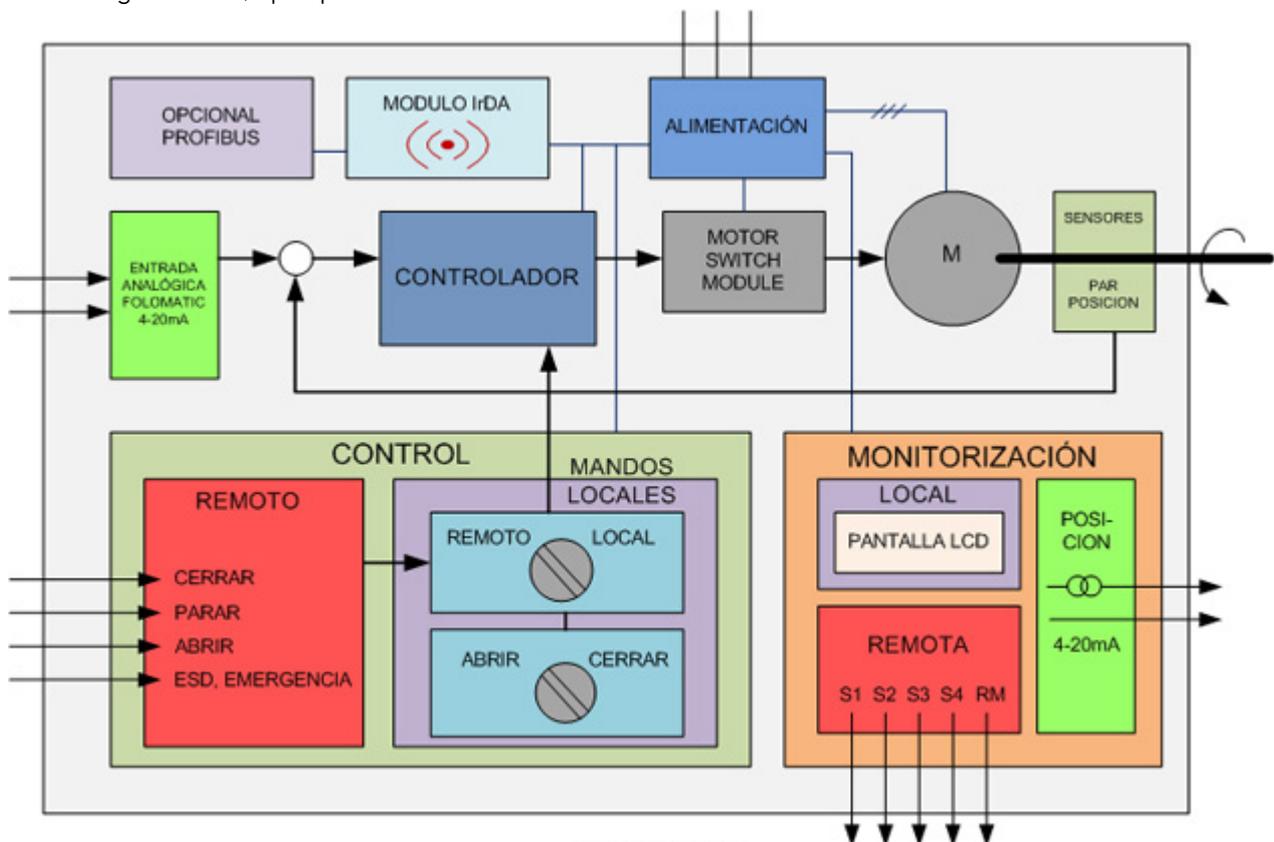


FIGURA 3.2.2-01  
 - DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN ACTUADOR ROTORK IQ25

El módulo de Control permite establecer el modo de funcionamiento y las señales de mando. Si el selector Remoto-Local, ubicado en la carcasa del actuador, está posicionado en remoto el actuador obedecerá según las señales de entrada activadas desde el PLC. Si por el contrario se sitúa en local será el selector Abrir-Cerrar, ubicado en la carcasa, el que dará la orden al controlador. En forma remota también existe la posibilidad de dar orden al controlador mediante la entrada analógica Folomatic. Esta entrada da una consigna de posición. El actuador también dispone de unos sensores internos para determinar la posición del eje del motor y el par ejercido. El control de posición se realiza internamente mediante el bucle formado por los sensores, el controlador, el variador y la entrada analógica.

Para conocer el estado del actuador se dispone del módulo Monitorización. A través de este módulo obtenemos información sobre la posición, par, estados, etc. La información puede verse en la pantalla LCD del propio actuador y también puede obtenerse mediante señales de salida que pueden ser conectadas, por ejemplo, al PLC.

Los ajustes del par y la posición así como la configuración de los contactos de indicación se efectúan con un mando de infrarrojos no intrusivo que se comunica mediante el módulo IrDA.

El actuador también dispone de un módulo opcional para la comunicación mediante buses de campo Profibus, Modbus, Pakscan, etc.

Algunas características del actuador Rotork IQ son:

- Puesta en marcha simplificada
- Doble sellado de la carcasa IP68
- Medida de la posición
- Medida del par
- Pantalla LCD
- Control condicional
- Protección contra la pérdida de fase
- Protección por termostatos
- Protección contra inversión instantánea
- Operación manual
- Ajuste por infrarrojos
- Controles locales
- Control de posición



FIGURA 3.2.2-02  
- ACTUADOR ROTORK IQ25

### • Características generales.

#### SUMINISTRO ELECTRICO

Los actuadores IQ están disponibles con los suministros trifásicos estándar de 50 Hz. ó 60 Hz. Desde 200 a 690 Voltios. La tolerancia es del 10% del valor nominal.

Los actuadores estándar pueden operar alimentados por UPS, sistemas de alimentación ininterrumpida, siempre que se mantengan las tolerancias citadas arriba

## PROTECCIONES

El sistema de control del IQ incorpora las siguientes protecciones para el actuador, la compuerta y el control:

- Protección contra compuerta obstruida (par excedido)
- Syncrophase, protección contra pérdida de fase.
- Termostato de protección del motor.
- Protección del circuito de control del actuador.
- Protección contra inversión instantánea de marcha
- Protección contra fallo de la señal de control (configurable).

## CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO

La configuración completa del actuador se puede realizar a través de la interfaz de infrarrojos sin necesidad de quitar la tapa. La configuración se puede efectuar con o sin alimentación eléctrica en cuyo caso se utiliza la batería del actuador.

### ● Modos de funcionamiento.

El actuador dispone de dos modos de funcionamiento, local y remoto. El funcionamiento local se realiza con los mandos situados en el actuador o a través del mando de infrarrojos. El funcionamiento remoto se realiza mediante las entradas digitales y analógicas del actuador.

## CONTROL LOCAL

Hay dos mandos no intrusivos en la carcasa del actuador, uno para la selección del control Remoto/Local/Stop que puede fijarse en cualquiera de las tres posiciones con un candado y el otro para las ordenes de abrir y cerrar. Los mandos pueden girarse para orientarlos según la posición de montaje del actuador.

El control local puede configurarse para que se ejecute con el mando de infrarrojos que dispone de botones específicos para abrir, cerrar y parar y funciona a una distancia nominal de 0.75 m de la pantalla.

## CONTROL REMOTO

Para realizar el control remoto existen 6 entradas digitales:

- Abrir. Cuando el actuador recibe esta señal ordena abrir a la compuerta.
- Cerrar. Cuando el actuador recibe esta señal ordena cerrar a la compuerta.
- Stop (mantenido). Con esta señal el actuador detiene el movimiento de la compuerta.
- Emergencia o ESD (Emergency Shut Down). Es la señal que indica al actuador un estado de emergencia. Puede configurarse el actuador para que en caso de activación de esta señal abra, cierre o mantenga la posición de la compuerta. La orden de ESD debe derivarse de un contacto mantenido. La orden de ESD es prioritaria sobre las otras órdenes remotas o locales. Puede configurarse para que también sea prioritaria sobre el Stop Local, los enclavamientos y el Temporizador cuando esté instalado. La entrada de ESD opera con un común independiente de las otras órdenes lo que permite una separación galvánica entre el sistema de control de emergencia y el operativo.
- Enclavamiento de apertura. Esta señal en combinación con Abrir mantiene el movimiento de apertura aún en ausencia posterior de la señal Abrir.
- Enclavamiento de cierre. Esta señal en combinación con Cerrar mantiene el movimiento de apertura aún en ausencia posterior de la señal Cerrar.

Las entradas de control disponen de una interfaz de optoacopladores inmunes a puntas de hasta 2KV. El control se hace con conmutación por el positivo (negativo común) usando bien el suministro interno del actuador o una tensión externa cuyo valor esté comprendido entre 20 y 60 V CC o CA o entre 60 y 120 V sólo CA.

### CONTROL PROPORCIONAL ANALÓGICO

El controlador proporcional Folomatic permite posicionar la compuerta proporcionalmente a una señal analógica de corriente, tensión o potenciométrica con rangos de 0-20 o 4-20 mA, 0-5, 0-10V.

El actuador dispone de sensores internos de posición lo que permite realizar un control de posición interno. Mediante la entrada analógica Folomatic se consigna una posición.

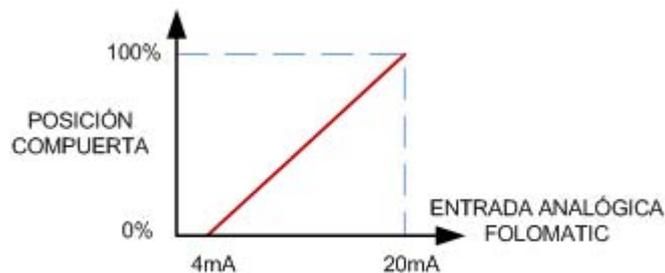


FIGURA 3.2.2-03  
- GRÁFICA (POSICIÓN COMPUERTA - ENTRADA ANALÓGICA)

El posicionamiento puede realizarse sobre el recorrido total de la compuerta o sobre una parte de ésta, normalmente se configura el 100% del recorrido sin embargo pueden existir aplicaciones donde se desee controlar una parte de este recorrido únicamente. La configuración de estos parámetros se realiza mediante el mando de infrarrojos.

La Folomatic puede configurarse para que en caso de pérdida de señal de control abra, cierre o mantenga la última posición de la compuerta. Utilizando las entradas de control remoto se puede anular el posicionamiento cuando se requiera llevar la compuerta a una posición extrema por control convencional, por ejemplo, cuando se quieran realizar operaciones de limpieza y mantenimiento en las compuertas o ante una situación de emergencia donde sea necesario realizar una apertura total de la compuerta.

### • Indicación y monitorización.

El monitorizaje del estado del actuador se realiza de dos formas simultáneas. Si se esta a pie de actuador puede averiguarse el estado de este visualizando la pantalla LCD (monitorizaje local) y mediante el mando de infrarrojos. La forma de comunicar esta información al PLC es mediante las salidas digitales y analógicas (monitorizaje remoto).

### LOCAL

Una pantalla de cristal líquido retro-iluminada proporciona una indicación de la posición de la compuerta con una resolución del 1% y 3 LEDs de colores rojo, verde y ámbar indican si la compuerta se encuentra abierta, cerrada o en posición intermedia. La pantalla también dispone de 4 iconos de diagnóstico rápido de alarma en la compuerta, el actuador, el circuito de control o batería baja.

## REMOTO

Hay 4 contactos libres de potencial, S1, S2, S3 y S4 que pueden configurarse independientemente con el mando de infrarrojos para señalar una de las siguientes funciones:

- Posición de la Compuerta: abierta, cerrada o intermedia (0 a 99% de apertura).
- Estado: Compuerta abriendo, cerrando, en movimiento (con contacto accionado o pulsante).
- Seleccionado Stop local, o Control Local o Control Remoto.
- Enclavamiento activo en la apertura o en el cierre.
- ESD activa.

Cada contacto puede configurarse como normalmente cerrado o abierto y tienen una capacidad de corte de 5mA a 5 A 120 V CA, 30 V CC.

## ALARMAS

El actuador es capaz de indicar las siguientes alarmas configurables en los contactos S1 a S4.

- Motor parado por par en posición intermedia, en dirección de cierre o en dirección de apertura.
- Par seleccionado excedido u operación manual del actuador.
- Batería baja, detectado fallo interno, termostato actuado.

## RELÉ MONITOR

Es un relé independiente con un contacto conmutable que monitoriza la disponibilidad eléctrica del actuador. La capacidad del contacto es de 5mA a 5 A, 120 V AC, 30 V CC. El relé puede configurarse para que se desenergice bajo una o una combinación de las siguientes condiciones:

- Pérdida de una o más fases de la alimentación eléctrica.
- Pérdida de tensión en el circuito de control
- Seleccionado control Local
- Seleccionado Stop Local
- Termostato del motor actuado.

## OPCIONES DE INDICACIÓN, POSICIÓN Y PAR.

El actuador dispone de dos salidas analógicas, una para indicar la posición (CPT) y otra para indicar el par (CTT).

El CPT Current Position Transmitter (indicador analógico de posición) es un transmisor analógico de 4 – 20 mA sin contacto mecánico y con alimentación interna proporcional a la posición de la compuerta que puede configurarse para que los 4 miliamperios correspondan a la posición totalmente abierta o totalmente cerrada de la compuerta con ajuste automático del cero y el span.

El CTT Current Torque Transmitter (indicador analógico remoto de par) proporciona una indicación analógica remota de 4-20 mA proporcional al par de salida del actuador.

### 3.2.3- SAI

SAI o sistema de alimentación ininterrumpida (UPS Uninterrupted Power System) es un dispositivo que gracias a sus baterías puede proporcionar energía eléctrica de forma autónoma, tras un corte del suministro eléctrico, a todos los dispositivos que tenga conectados. Otra de las funciones de los SAI es la de mejorar la calidad de la energía eléctrica que llega a las cargas, filtrando subidas y bajadas de tensión y eliminando armónicos de la red en el caso de usar Corriente Alterna.

#### ● Estimación de cargas.

A continuación se incluye un listado de los consumos previstos tanto del cuadro de la Estación de Remota como de la instrumentación alimentada desde el mismo, y que servirá de base para el dimensionamiento del SAI.

Equipo	Consumo máximo
PLC	60W
Instrumentación	60W
Equipos de Comunicaciones	140W
TOTAL	260W

#### ● SAI DLP 150 (1500VA/1050W), Riello UPS

Las características del SAI escogido, en función de la estimación de cargas, son las siguientes:



FIGURA 3.2.3-01  
- SAI (SISTEMA DE ALIMENTACIÓN  
ININTERRUMPIDA) DLP 150DLP 150

- Potencia Nominal 1500VA
- Tensión de salida, 230V AC
- Tensión filtrada, estabilizada con filtros EMI para la supresión de perturbaciones atmosféricas.
- Sobrecargas elevadas (hasta de 150%).
- Soporta reencendido automático al regreso de la alimentación de la red (programable).
- Corrección del factor de potencia de la onda sinusoidal de entrada, asegurando un bajo impacto en la red de alimentación.
- Ampliada tolerancia de la tensión de entrada (desde 110V hasta 300V) sin la intervención de la batería.
- Comunicación vía RS232
- Señales de control, fallo, bypass, modo batería, batería baja, alarma.

### 3.2.4- TERMINAL DE VISUALIZACIÓN PARA MANTENIMIENTO

Se contempla en este apartado la funcionalidad del terminal de visualización de mantenimiento, aunque no forma parte de este proyecto el desarrollo del terminal. A continuación pasamos a describir sus principales características.

#### ● PANTALLA TP177B

La pantalla SIMATIC TP177B es un panel gráfico táctil basado en Windows CE. Dispone de interfaz PROFINET, y Profibus DP.

Tamaño del Display 5,7"  
Pantalla táctil  
2000KB memoria de usuario  
Conexión de impresora por USB  
Almacenamiento de hasta 2000 Alarmas  
Almacenamiento de hasta 200 Recetas  
Admite imágenes en mapas de bits  
Sistema de hasta 50 usuarios  
Protección por password  
50 variables por imagen



FIGURA 3.2.4-01  
- TERMINAL DE VISUALIZACIÓN.  
SIMATIC TP177B

Permite un manejo y una supervisión intuitivos gracias a su pantalla táctil. La pantalla táctil se puede manejar de diferentes maneras: con el lápiz, el dedo, con o sin guantes

Gracias a su reducido calado y su robusto frontal con protección IP65, los paneles son ideales para su uso a pie de máquina. Una funda opcional protege adicionalmente todos los paneles táctiles de 6" contra ralladuras y condiciones ambientales rigurosas.

Con el concepto de pantalla de mantenimiento se aporta una herramienta versátil al personal de mantenimiento. A través de la pantalla se podrán conectar al PLC de la estación remota, realizar las operaciones de mantenimiento, controlar dicha estación, asignar nuevas consignas, descargar variables, etc. De esta forma se ahorra la partida destinada a visualización, evitando instalar una pantalla por estación.

### 3.3.- INSTRUMENTACION

Para llevar a cabo de una forma eficiente y estable la regulación y el control de un canal es necesario disponer de medidas fiables de algunas magnitudes físicas del mismo.

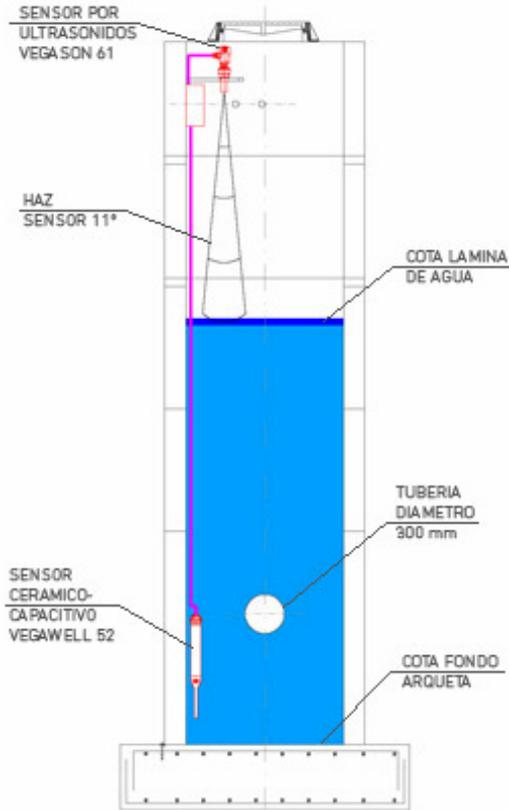


FIGURA 3.3-01  
- ARQUETA DE MEDIDA PARA SENSORES DE NIVEL

Los sensores son los encargados de captar estas medidas y convertirlas en magnitudes eléctricas.

Definimos elemento sensor como aquel que responde directamente a la magnitud a medir, se encuentra en contacto directo con el proceso a medir y convierte la magnitud a medir en otra (eléctrica o no) que posteriormente el acondicionador (en caso de ser necesario) es capaz de convertir en una señal susceptible de medida.

En el caso en los que el sensor no proporcione una señal eléctrica serán necesarios dispositivos encargados de generar señales eléctricas a partir de estas. Por ejemplo, en el caso de sensores basados en la variación de resistencia a una respuesta variable, será necesario un circuito auxiliar que posea una alimentación eléctrica para poder obtener una señal de salida, pues la variación de resistencia en sí no genera señal alguna. A este tipo de dispositivos lo denominamos acondicionadores.

#### • Clasificación.

Atendiendo a la forma de utilización de la energía generada por la magnitud física a medir, los sensores se pueden clasificar en:

Activos. Aquellos en los que por influencia directa de la magnitud física tratada se generan señales eléctricas intrínsecamente en el elemento sensor. En este tipo, el elemento sensor no requiere alimentación eléctrica exterior para la obtención de la señal.

Pasivos. Aquellos que requieren alimentación eléctrica exterior. Alguna característica eléctrica (resistencia, capacidad, etc.) es modificada por el fenómeno objeto de medición, haciéndose necesaria una excitación eléctrica para obtener una señal eléctrica proporcional a la magnitud bajo prueba.

Atendiendo al tipo de señal proporcionada en su salida, los sensores los podemos clasificar en:

Analógicos. La señal de salida es función proporcional a la magnitud física a medir.

Digitales. La señal de salida se presenta en forma de niveles discretos de tensión a los que se les asigna valores numéricos.

### ● **Magnitudes a medir.**

Como ya hemos resaltado anteriormente, es necesario disponer de medidas fiables de algunas magnitudes del canal para poder regularlo y controlarlo, esas magnitudes son las siguientes:

- Nivel de Canal Aguas Arriba y Aguas abajo de cada almenara.

Se utilizarán sensores de nivel ultrasónicos (Modelo VegaSon 61), siendo la medida redundada mediante sensores de nivel cerámico-capacitivos (Modelo VegaWell 52). Dichos medidores irán montados en arquetas de medida. La elección de estos 2 sensores se ha realizado atendiendo a la experiencia previa que se poseía de los mismos, al haber sido probados con anterioridad. Tanto el comportamiento como la facilidad de instalación hacen que estos dispositivos sean idóneos para el uso en este proyecto.

- Caudal extraído de la toma. Se utilizará para la medida un caudalímetro electromagnético Siemens, que estará compuesto por un sensor (Sitrans F M MAG 5100 W) y un transmisor (Sitrans F M MAG 6000). La elección de este dispositivo se ha realizado atendiendo a la compatibilidad con el autómatas SIEMENS. Además, las ventajas que ofrece en cuanto a la instalación y las posibilidades de ampliación del equipo (buses de campo, salidas, etc) son razones para su elección.

### **3.3.1.- SENSOR CERAMICO-CAPACITIVO (VEGAWELL 52)**

#### ● **Principio de funcionamiento.**

El principio de funcionamiento de los sensores cerámico-capacitivos se basa en la propiedad que tienen determinados materiales semiconductores de variar su resistencia eléctrica en función de la presión a la que se ven sometidos.

De este modo, sumergido el sensor la resistencia del mismo variará en función de la presión del agua que a su vez estará relacionada con el nivel de agua existente sobre el sensor.

#### ● **Características Técnicas.**

- Magnitud de salida 4...20mA/HART a dos hilos o cuatro hilos.
- Resolución de la señal 1,6uA
- Corriente máxima de salida 22mA.

#### ● **Precisión.**

La precisión de la medida dada por un sensor cerámico-capacitivo depende de la linealidad de la variación de la resistencia con la presión. También se ve afectada por la temperatura del agua.

#### ● **Instalación.**

Debido al sistema de medida explicado arriba, el sensor cerámico-capacitivo debe instalarse sumergido por debajo de la cota mínima de agua que se pretende medir.

El sensor se montará sumergido dentro de las arquetas de medida de las almenaras y suspendido de su propio cable de acuerdo con las indicaciones del fabricante.



**FIGURA 3.3.1-01**  
**- SENSOR CERÁMICO-**  
**CAPACITIVO PARA MEDICIÓN**  
**DE NIVEL (VEGAWELL 52)**

### ● **Mantenimiento.**

Al tratarse de una sonda sumergida se ve afectada generalmente por problemas de suciedad que pueden llegar a taponar los conductos de toma de presión del sensor.

El mantenimiento preventivo consiste fundamentalmente en la limpieza periódica del sensor que no presenta mayor dificultad al tratarse de un equipo muy ligero y poderse recuperar fácilmente.

Conviene señalar que en determinados casos es necesario realizar una limpieza periódica de las arquetas de medida para evitar que el material depositado en el fondo llegue a cubrir el sensor y falsee la medida.

### **3.3.2.- SENSOR DE NIVEL POR ULTRASONIDOS (VEGASON 61)**

#### ● **Principio de funcionamiento.**

Los transmisores de nivel por ultrasonidos emiten un pulso de energía ultrasónica hacia la superficie del líquido. Este pulso de ultrasonidos se refleja en la superficie del líquido y vuelve al sensor que mide el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del eco.

Conocido este tiempo y teniendo en cuenta la velocidad del sonido en el medio en el que se propaga la onda sonora (en este caso el aire) se calcula la distancia a la que se encuentra la superficie del agua de la sonda.

#### ● **Características Técnicas.**

- Rango de medición de líquidos de 0,25 a 5 metros.
- Magnitud de salida 4...20mA/HART a dos hilos o cuatro hilos.
- Resolución de la señal 1,6uA
- Corriente máxima de salida 22mA.

#### ● **Precisión.**

La precisión de la medida calculada por un sensor de ultrasonidos se ve afectada por los siguientes factores:



FIGURA 3.3.2-01  
- SENSOR DE ULTRASONIDOS  
PARA MEDICIÓN DE NIVEL  
(VEGASON 61)

La temperatura del medio afecta a la velocidad del sonido en el mismo y por lo tanto al cálculo de la distancia. Los sensores elegidos incorporan una sonda de temperatura que compensa este efecto.

La posibilidad de rebotes en las paredes o en otros obstáculos provoca falsos ecos que confunden al sensor ocasionando fallos de medida. En el caso de este proyecto los sensores de medida se montarán en las arquetas preparadas al efecto evitando estos problemas.

La existencia de espumas o flotantes en el agua falsean igualmente las medidas dadas por estos sensores. En el caso de los sensores instalados para la medida del nivel del canal en este proyecto y dado que se montarán en las arquetas de medida conectadas con el canal por un tubo a una cota muy cercana a la base del canal es

prácticamente imposible que se introduzcan flotantes que afecten a la medida .

La falta de paralelismo entre el sensor y la superficie a medir puede afectar a la medida. Este efecto se evita fácilmente con un montaje cuidadoso del sensor que garantice que se monta perfectamente vertical.

### ● **Instalación.**

La instalación de estos sensores es relativamente fácil al no estar en contacto con el líquido a medir.

Deberá montarse el equipo perfectamente vertical, guardando la separación con la pared indicada por el fabricante y a una altura sobre el nivel máximo de la lámina de agua suficiente para garantizar el resguardo mínimo que necesita el captador para medir correctamente.

### ● **Mantenimiento.**

El mantenimiento de los equipos de ultrasonidos es muy simple al ser de fácil acceso, no estar en contacto con el agua y no disponer de partes móviles.

## **3.3.3.- CAUDALIMETRO EN TOMA**

El caudalímetro Siemens consta de dos componentes, el sensor (Sitrans F M MAG 5100 W) y el transmisor (Sitrans F M MAG 6000). La conjunción de estos componentes permite la obtención de la medida del caudal a través de la tubería donde está instalado el sensor.

### **3.3.3.1- SENSOR SITRANS F M MAG 5100 W, DN 600**

#### ● **Principio de funcionamiento.**

La medición de caudal se basa en la Ley de Faraday de la Inducción Magnética. Cuando un conductor eléctrico de longitud (L) se mueve con velocidad (v) perpendicularmente a las líneas de flujo de un campo magnético de intensidad (B), se induce una tensión (Ui) en los extremos del conductor.

$$U_i = L \times B \times v$$

Sustituyendo L por el diámetro interior de la tubería (Di), y con el campo magnético constante y conocido de intensidad (B), queda:

$$K = L \times B = D_i \times B$$

Y por lo tanto se obtiene que la señal del electrodo es directamente proporcional a la velocidad del fluido.

$$U_i = K \times v$$

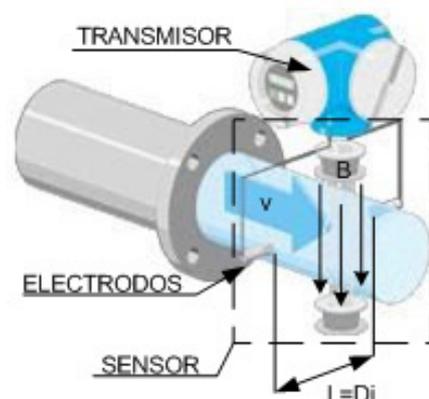
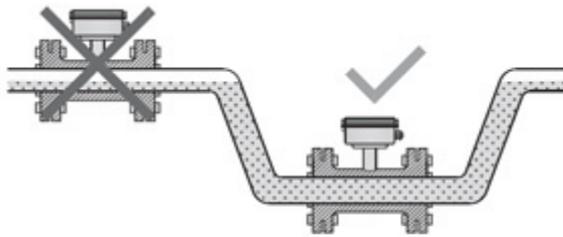


FIGURA 3.3.3.1-01  
- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE  
UN CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO

● **Instalación.**



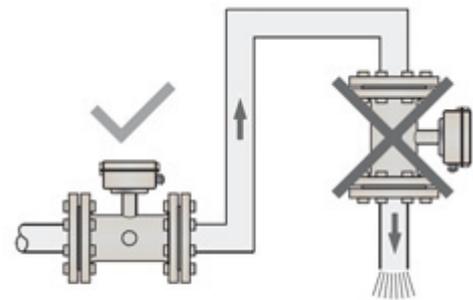
**FIGURA 3.3.3.1-02**  
- INSTALACIÓN EN TUBERÍAS EN "U"

En la instalación del sensor se debe tener en cuenta que para una correcta medición la tubería debe permanecer siempre llena. En instalaciones con tuberías en "U", el sensor se debe colocar en el tramo donde la tubería esté llena.

Evitar colocar el sensor en los tramos más altos del las tuberías o en los tramos verticales con salida libre.

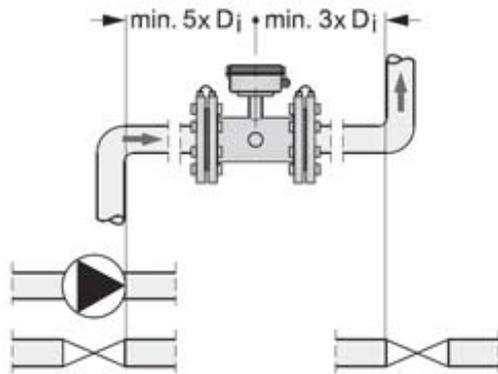
Para conseguir una medida precisa de caudal es esencial contar con longitudes rectas de tubos de entrada y salida, así como una cierta distancia a las bombas y a las válvulas. También es importante centrar el caudalímetro con respecto a las bridas y juntas de la tubería.

La distancia mínima entre una válvula o bomba y la entrada al sensor debe ser 5 veces el diámetro interior de la tubería.



**FIGURA 3.3.3.1-03**  
- INSTALACIÓN EN TRAMOS HORIZONTALES

La distancia mínima entre la salida del sensor y una válvula debe ser 3 veces el diámetro interior de la tubería.

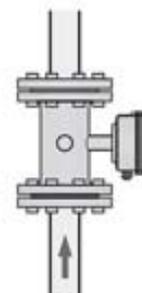


**FIGURA 3.3.3.1-04**  
- DISTANCIAS RESPECTO A VÁLVULAS,  
BOMBAS Ó CURVAS

En cuanto a la orientación del sensor se recomienda: Con flujo ascendente instalación vertical. La instalación vertical minimiza el desgaste y los sedimentos en el sensor. Además se consigue disminuir el efecto negativo de las burbujas de aire en el líquido.

En instalación horizontal la caja de terminales debe permanecer en la parte superior o en la inferior. No se debe colocar la caja de terminales de lado ya que esto hace que se posicionen los electrodos arriba, perturbando la medición con posibles burbujas de aire, y abajo, donde se propicia la acumulación de lodo y sedimentos que perjudican la medida.

En cuanto a la conexión eléctrica se puede hacer una instalación remota del transmisor. Deben utilizarse prensaestopas M20 o NPT 1/2" para los cables de alimentación y salida. La conexión debe realizarse como indica la figura (3.3.3.1-06).



**FIGURA 3.3.3.1-05**  
- INSTALACIÓN VERTICAL

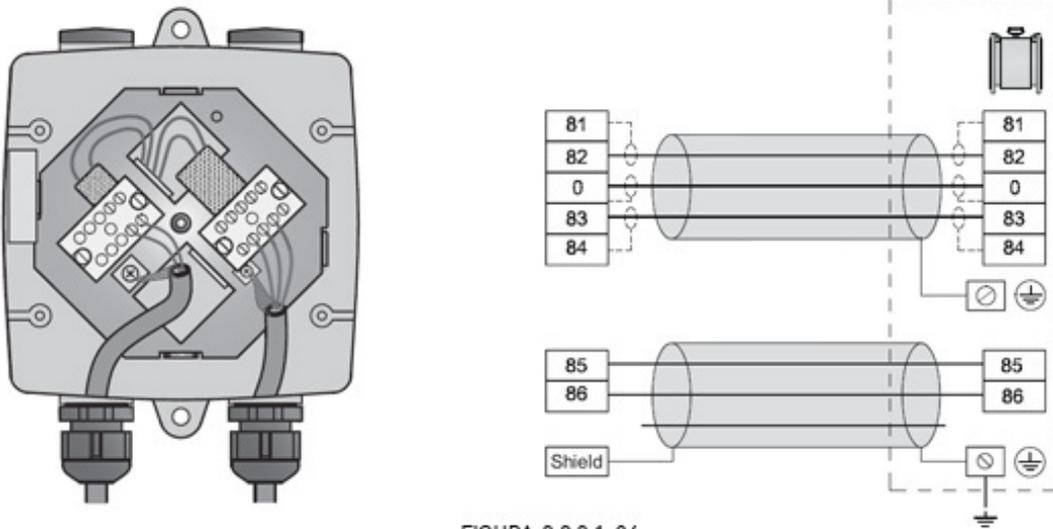


FIGURA 3.3.3.1-06  
- INSTALACIÓN REMOTA DEL TRANSMISOR

### • Mantenimiento.

El dispositivo no requiere mantenimiento, sin embargo, se debe realizar una inspección periódica según las directivas y normas pertinentes.

Una inspección puede incluir la comprobación de:

- Condiciones ambientales.
- La integridad de sellado de las conexiones de procesos, entradas de cable y tornillos de la cubierta.
- La fiabilidad de la fuente de alimentación, protección de iluminación y puestas a tierra.

## 3.3.3.2 – TRANSMISOR SITRANS F M MAG 6000

### • Principio de funcionamiento.



FIGURA 3.3.3.2-01  
- TRANSMISOR SITRANS F M  
MAG6000

Los transmisores están basados en un microprocesador y disponen de una pantalla alfanumérica en varios idiomas. El principio de medición de caudal se basa en la ley de Faraday de la inducción electromagnética. Las bobinas están montadas diametralmente en el tubo a medir generando un campo electromagnético pulsado. El líquido que fluye a través de este campo electromagnético induce un voltaje.

Los transmisores evalúan las señales de los sensores electromagnéticos asociados, luego las convierten en señales estándar apropiadas (p. ej. 4 - 20 mA) y realizan también la función de una unidad de alimentación que proporciona una corriente constante a las bobinas.

El transmisor consta de una serie de bloques de función que convierte el voltaje del sensor en lectura de caudal.

El módulo de corriente de las bobinas genera una corriente pulsante magnetizante que activa las bobinas en el sensor. La corriente es vigilada y corregida permanentemente. Un circuito de autovigilancia registra errores o fallas del cable.

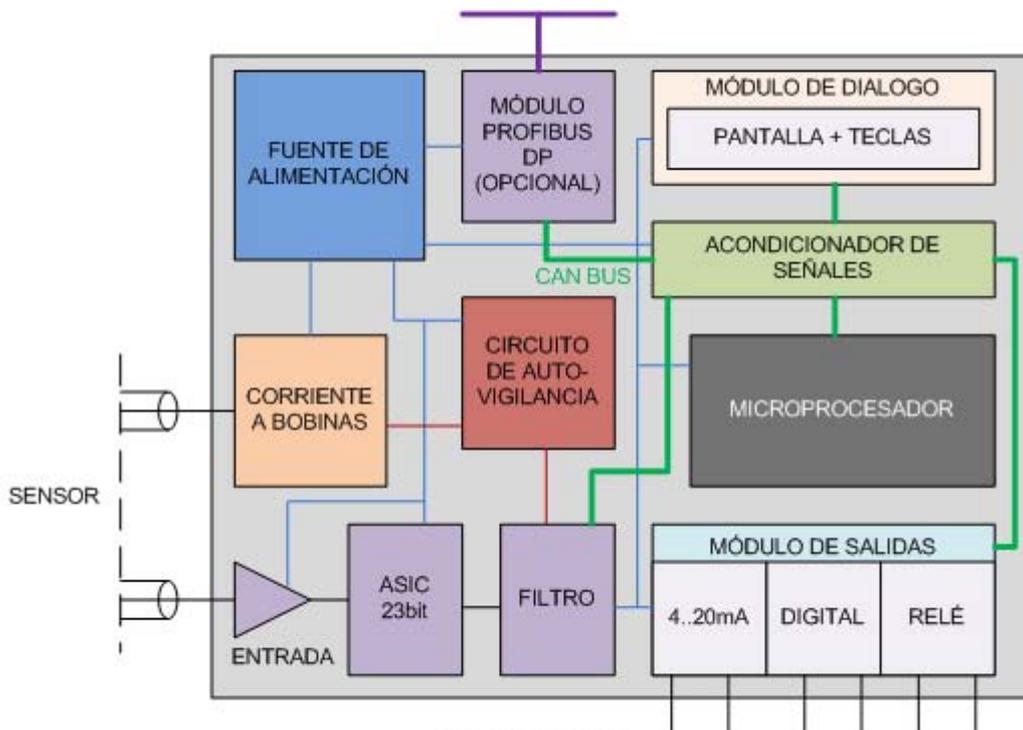


FIGURA 3.3.3.2-02  
- DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN TRANSMISOR SITRANS F M MAG6000

Un circuito de entrada amplifica la señal de flujo proporcional proveniente de los electrodos. La impedancia de entrada es extremadamente alta:  $>10^{14} \Omega$  permitiendo medir el caudal de fluidos con una conductividad mínima de  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Los errores de medición producidos por la capacitancia del cable quedan excluidos gracias al apantallado del cable.

El procesador digital de señales convierte la señal analógica de flujo en una señal digital y suprime los ruidos del electrodo mediante un filtro digital. Cualquier inexactitud del transmisor, como resultado de derivas a largo plazo y de temperatura, es vigilada y compensada continuamente a través del circuito de autovigilancia. La conversión de señal analógica a digital tiene lugar en un ASIC de ruido ultra bajo, con una resolución de señal de 23 bits. Esto permite eliminar una conmutación de rango.

El transmisor funciona internamente a través de un bus de comunicación CAN interno. Las señales son transmitidas a través de un acondicionador de señales al módulo de visualización y de/a los módulos opcionales internos/externos y al módulo de diálogo.

La unidad de visualización consta de una pantalla de tres líneas y de un teclado de 6 teclas. La pantalla muestra el caudal o un valor de totalizador como lectura primaria.

El módulo de salida convierte los datos de caudal en salidas analógicas, digitales o de relé. Las salidas están aisladas galvánicamente y pueden ser configuradas individualmente para adaptarlas a una aplicación específica.

### • Características Técnicas.

- Rango de medición de líquidos conductores de 0 a 113.000 m<sup>3</sup>/h.
- Salida de corriente: 0...20mA o 4...20mA, carga < 800 ohmios.
- Salida digital: -Frecuencia 0-10KHz, ciclo de servicio 50%
- Impulso, programable. Activa 24V DC, 30mA. Protegida contra cortocircuitos. Pasiva, 3-30V DC máx. 110mA.
- Salida relé: Función programable, 42 V AC, 2A. 24V DC, 1A.
- Entrada digital: 11-30V DC
- Funciones: Caudal, 2 totalizadores, corte por bajo caudal, corte por tubería vacía, sentido del flujo, errores del sistema, tiempo de funcionamiento, flujo uni/bidireccional, alarmas ajustables, salida de pulsos, control para unidad de limpieza y lotes.
- Todas las entradas y salidas están aisladas galvánicamente.
- Totalizador: Dos contadores de 8 dígitos para caudal en el sentido del flujo, en sentido inverso o neto.
- Pantalla: Iluminación del fondo con texto alfanumérico, 3 x 20 caracteres para indicar caudales, valores totalizados, ajustes y fallos  
El caudal en sentido inverso se indica con un signo negativo.
- Ajuste del cero: automático.
- Impedancia de entrada del electrodo: > 1x10e+14 ohmios.
- Temperatura ambiente: en funcionamiento, -20 a +50°C
- Temperatura del fluido: -20 a +200°C
- Comunicaciones (opcional): HART, profibus PA, profibus DP, Modbus RTU.
- Índice de protección: IP 67 según IEC 529 y DIN 40050.
- Tensión de alimentación: 11-30V DC.
- Consumo: 24 V c.c.: 9 W, I<sub>N</sub> = 380 mA, I<sub>ST</sub> = 8A (30 ms)

### • Instalación.

El transmisor se puede montar mediante instalación remota o bien compacta en el sensor.

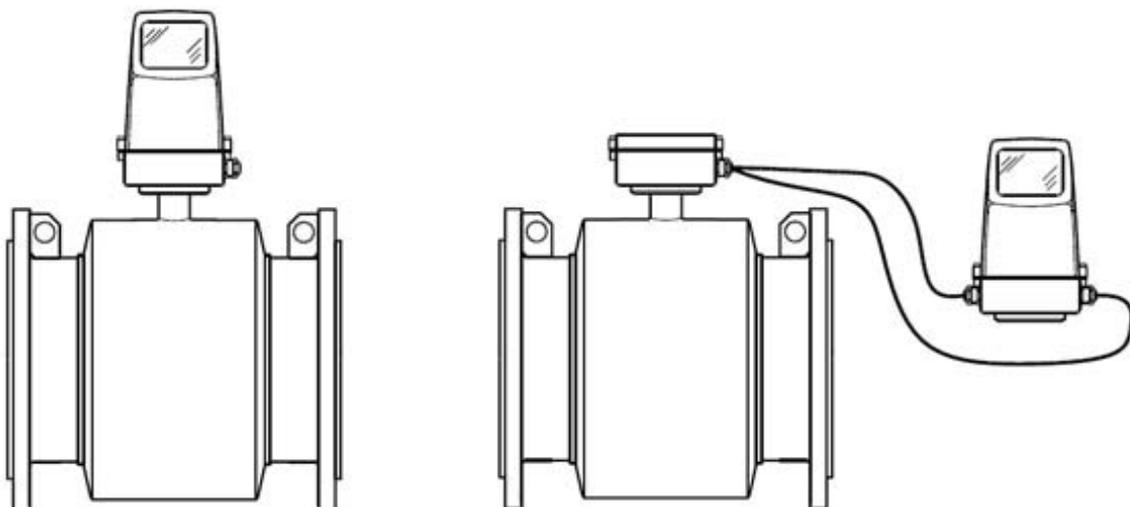


FIGURA 3.3.3.2-04  
- INSTALACIÓN LOCAL O REMOTA DEL TRANSMISOR

Es posible operar y leer las mediciones del caudalímetro prácticamente en todas las condiciones de instalación debido a que el display se puede orientar en relación al sensor.

Deberá usarse el tipo y longitud de cable adecuadas. Los detalles se encuentran en la página 68 del manual del transmisor Sitrans F M MAG6000, recogida en el Anexo A.

### • Precisión.

El error de esta familia de caudalímetros es del 0,25% de la lectura. En el siguiente gráfico se representa el error, margen de incertidumbre del caudalímetro como porcentaje del valor medido, en función de la velocidad del fluido.

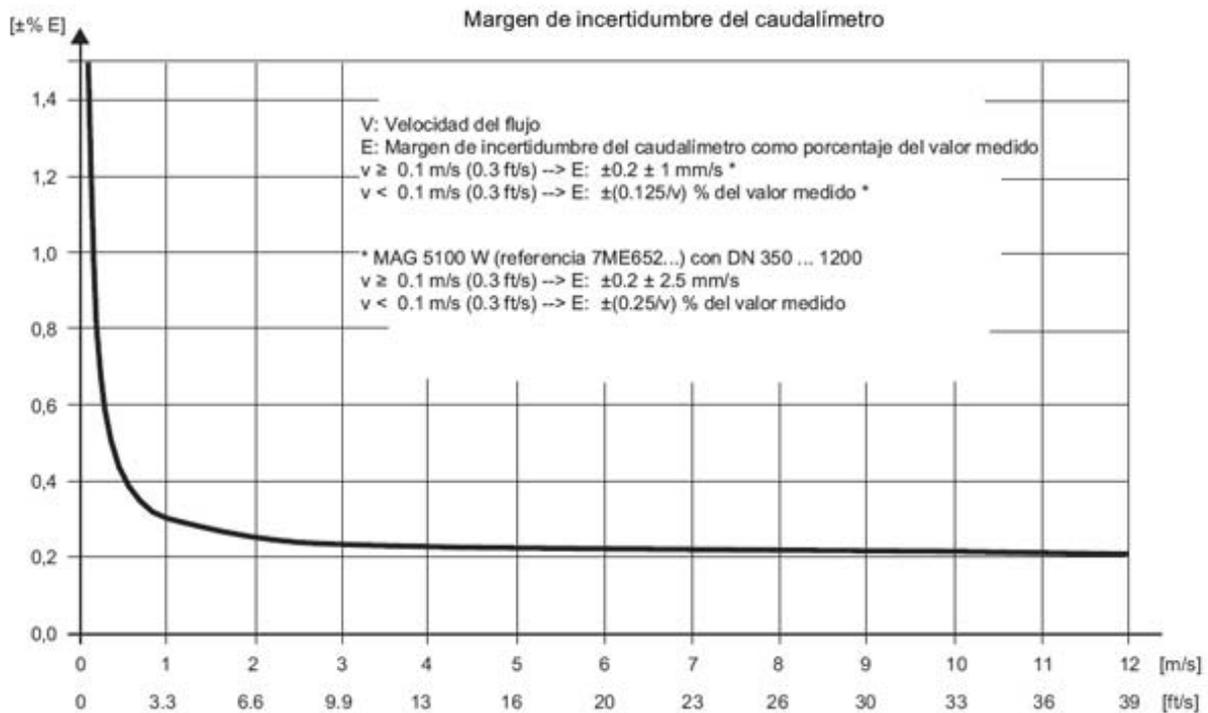


FIGURA 3.3.3.2-03  
- GRÁFICA DEL MARGEN DE INCERTIDUMBRE DEL CAUDALÍMETRO

La instalación del transmisor en la estación remota Toma será del tipo remota. Consultar de la página 22 en adelante del manual del transmisor Sitrans F M MAG6000, recogida en el Anexo A.

La conexión eléctrica se especifica en los planos de *Estación Remota Toma*, en el anexo B, Planos.

Es necesaria una puesta en marcha del dispositivo una vez realizada su instalación. Los pasos necesarios para realizarla se encuentran en el manual del transmisor Sitrans F M MAG6000, recogido en la documentación del Anexo A.

### • Mantenimiento.

El dispositivo no requiere mantenimiento, sin embargo, se debe realizar una inspección periódica según las directivas y normas pertinentes.

Una inspección puede incluir la comprobación de:

- Condiciones ambientales.

- La integridad de sellado de las conexiones de procesos, entradas de cable y tornillos de la cubierta.
- La fiabilidad de la fuente de alimentación, protección de iluminación y puestas a tierra.

### 3.4.- EQUIPOS DE COMUNICACIONES.

La necesidad de controlar y gestionar remotamente los procesos automáticos que se desarrollan en cada uno de los puntos de control establecidos a lo largo del Canal requiere el desarrollo de una red de comunicaciones robusta que preste un servicio fiable y permita mantener en todo momento la comunicación con el Centro de Control.

A continuación pasaremos a describir las principales características de los diferentes equipos que son necesarios para gestionar el sistema de telecontrol, establecer una red inalámbrica Wimax y programar envíos de SMS al personal de mantenimiento

#### 3.4.1 MODULOS DE TELECONTROL TIM

Los TIM (Telecontrol Interface Module) permiten una transmisión fiable y ordenada de los datos de control y de proceso entre estaciones remotas y el centro de control

##### ● TIM 3V-IE, TIM 3V-IE Advanced

TIM 3V-IE es un módulo de comunicaciones SINAUT para SIMATIC S7-300 que tiene una interfaz RS232 a la que se puede conectar un módem externo apropiado. Además, dispone de una interfaz RJ45 que permite la transmisión SINAUT a través de redes basadas en IP.

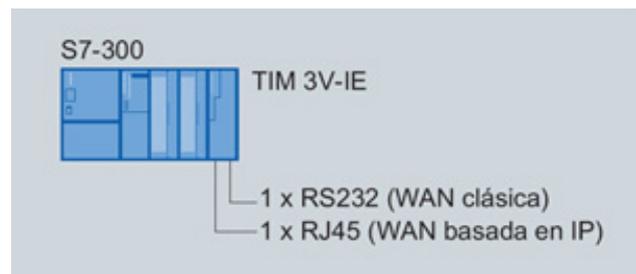


FIGURA 3.4.1-01  
- SALIDAS DEL MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 3V-IE

##### ● TIM 4R-IE

El TIM 4R-IE dispone de dos interfaces RS232/RS485 para la transmisión de datos SINAUT a través de WAN clásicas y dos puertos RJ45 para la conexión a redes basadas en IP (WAN o LAN).



FIGURA 3.4.1-04  
- SALIDAS DEL MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 4R-IE

El TIM puede ser utilizado como procesador de comunicaciones en SIMATIC S7-300, aunque está especialmente indicado como procesador de comunicaciones SINAUT para SIMATIC S7-400 o la central de supervisión en PC (SINAUT ST7cc o ST7sc).

## • TIM 4R, TIM 4RD

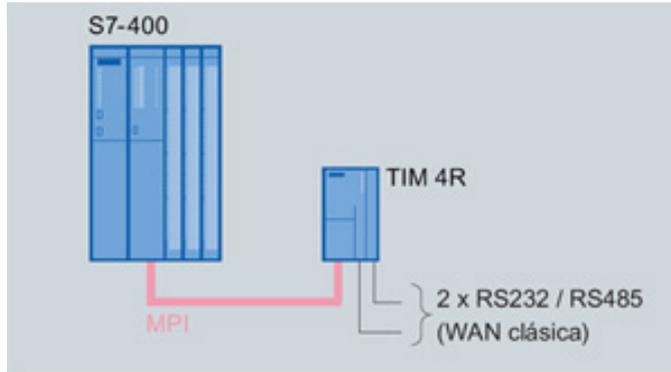


FIGURA 3.4.1-03

- SALIDAS DEL MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 4R

El TIM 4R es apto tanto para la instalación como módulo de comunicaciones en SIMATIC S7-300 o un equipo completo C7, como también para la conexión como equipo independiente a través de MPI a uno o varios SIMATIC S7-300/S7-400 y para las centrales de supervisión en PC ST7cc o ST7sc. Dispone de dos interfaces RS232/RS485, a las que se puede conectar un módem externo adecuado. Las dos redes WAN pueden ser del mismo tipo o distintas, por ejemplo, línea dedicada y red telefónica, y pueden ser utilizadas como vías de transmisión redundantes. El TIM 4R se puede equipar opcionalmente con un receptor de reloj controlado por radio DCF77.

Se ha optado por escoger el modulo TIM 4R-IE por ser el que mejor se adapta a las necesidades del proyecto. Posee 2 puertos RJ45 y dos puertos RS232/RS485, lo que hace que se dispongan de puertos libres para futuras ampliaciones.

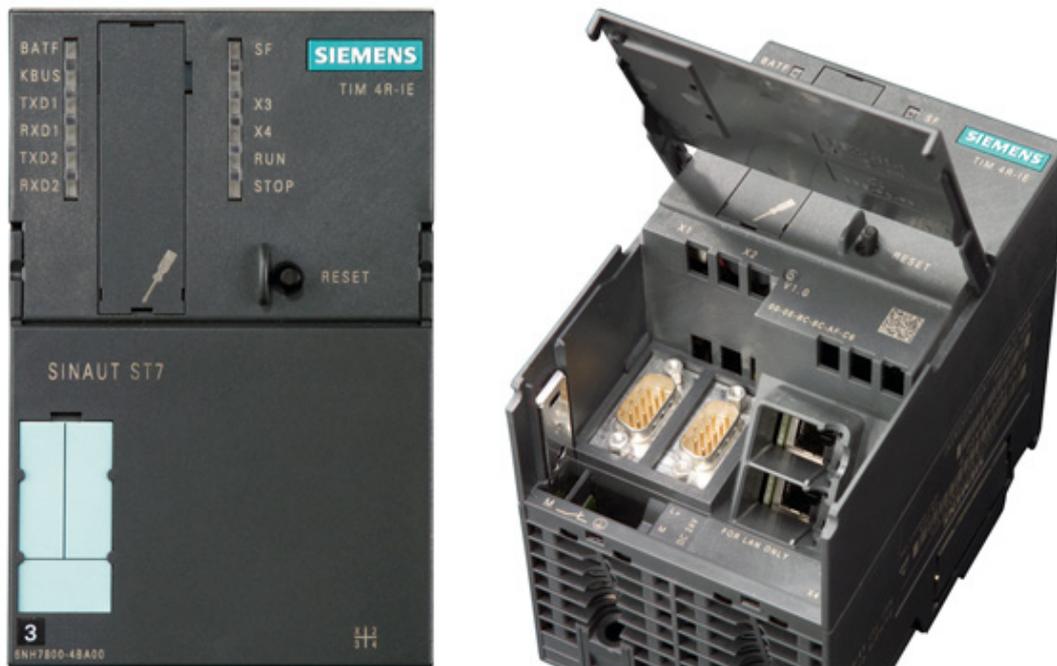


FIGURA 3.4.1-02

- MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 4R-IE

### 3.4.2 EQUIPOS INALAMBRICOS WIMAX

WiMAX, siglas de Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas), es una norma de transmisión de datos que utiliza las ondas de radio.

BreezeNET B100 es un modulo WIMAX para establecer enlaces Punto a Punto. Permite la conectividad bajo condiciones NLOS Non-line-of-sight (sin linea de vision directa) y puede funcionar en las bandas de 5.4GHz no licenciadas dando cobertura hasta 70 Km, facilitando velocidades de transmisión de datos de hasta 35 Mbps por canal.



FIGURA 3.4.2-01  
- EQUIPO WIMAX BREEZENET B100 DE ALVARION

Aunque ya se ha comentado con anterioridad, es conveniente remarcar que se ha optado por enlaces Punto a Punto, por ser mas fiables que un enlace multipunto. Si la estación Base se avería, se pierden todas las conexiones, en cambio si todos los enlaces son punto a punto hacemos el sistema más robusto.

A parte con los enlaces Punto a Punto, se garantiza un ancho de banda fijo para cada enlace, lo que hace al sistema mucho más fiable.

También es importante destacar que la utilización de la tecnología WIMAX, y en concreto de los equipos BreezeNET B100 de Alvarion, frente a otro tipo de tecnologías radio, se debe principalmente al hecho de que pueden trabajar en una banda no licenciada, y por lo tanto no hay que pagar canon por utilizar ninguna frecuencia.

Destacar también que al ser capaces de trabajar con anchos de banda tan elevados, queda abierta la posibilidad a futuras ampliaciones, así como la posibilidad de incorporar sistemas de vigilancia mediante video.

Así pues, el sistema básico de comunicaciones se compondrá de:

- 1 estación Base autónoma (AU), situada en el Centro de Control, y formadas por 3 módulos BreezeNET B100 equipados con una unidad exterior (ODU, Outdoor Device Unit) alimentada a través de un modulo PoE (Power Over Ethernet) conectado mediante RJ45 y una antena

externa direccional conectada mediante cable UTP (Unshielded Twisted Pair, par trenzado sin apantallado) Categoría 5 a la ODU. Ver figuras 3.1.1-01, 3.1.2-01, 3.1.2-02.

- 3 Unidades Suscriptoras (SU, Subscriber Unit), situadas en cada una de las estaciones Remotas, Almenara 1, Almenara 2 y Toma 1, y formadas por 3 módulos BreezeNET B100 equipados con una unidad externa (ODU, Outdoor Device Unit), alimentada a través de un modulo PoE (Power Over Ethernet) conectado mediante RJ45 y una antena externa direccional conectada mediante cable UTP Categoría 5 a la ODU.

A continuación pasamos a enumerar las principales características de los módulos Wimax utilizados (BreezeNET B100):

- Sistema inalámbrico WIMAX punto a punto.
- Comunicación de Datos basados en el Estándar 802.16D.
- Funcionamiento en banda de frecuencia no licenciada (5,4 MHz). Frecuencias de trabajo: (5.150 - 5.350 GHz) (5.250 - 5.350 GHz) (5.470 - 5.725 GHz) (5.725 - 5.875 GHz)
- Ancho de canal: 10, 20, 40 MHz
- Tecnología de radio OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales)
- Método acceso a radio - Duplex por División de Tiempo (TDD)
- Modulación adaptativa: BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM
- Velocidad de transmisión hasta 70 Mbps.
- Interfaz - 10/100/1000 Base-T, E1/T1
- IP67, pensado para situar equipos en exteriores.
- Alto rendimiento en aplicaciones NLOS (sin línea de visión directa)
- Alimentación a través de (Power Over Ethernet)

La configuración y gestión de los equipos BreezeNET B100 se realiza mediante BreezeCONFIG, via SNMP (Simple Network Management Protocol).

### 3.4.3 MODEM GSM/GPRS



FIGURA 3.4.3-01  
- MODEM SIEMENS GSM 720-3

Todas las estaciones remotas irán equipadas con un MODEM GSM/GPRS conectado a través de uno de los puertos serie a la TIM, que podrá programarse para enviar mensajes SMS a los teléfonos del personal de mantenimiento.

La unidad MD720-3 es un módem GSM/GPRS diseñado para aplicaciones industriales que se puede utilizar en redes GSM de 900 y 1800 MHz. El módem requiere una tarjeta SIM para la conexión a un proveedor de servicios de red.

Además del puerto RS-232 estándar, el módem MD720-3 tiene una interfaz RS422/485 para establecer conexiones multipunto con equipos industriales de diverso tipo.

Otra de las características mejoradas que presenta esta unidad es su capacidad de establecer conexiones CSD (Circuit Switched Data) o para enviar mensajes SMS cuando la señal DTR (Data Terminal Ready) está activada, lo que permite utilizar el módem en aplicaciones en las que el dispositivo conectado no es lo bastante inteligente para iniciar una llamada mediante comandos AT.

Si la red utiliza un código PIN, éste se puede almacenar en el módem para garantizar su disponibilidad después de un fallo de la alimentación. Además, el módem se puede volver a registrar periódicamente en la red, una característica que resulta particularmente útil dado que algunas redes eliminan los registros SIM cuando han permanecido inactivos durante cierto periodo de tiempo.

## CAPÍTULO 4 - REGULACIÓN DEL SISTEMA

Un sistema de regulación o de control automático es necesario en el momento en que se desea automatizar un proceso. En la industria multitud de procesos o sistemas de fabricación están controlados automáticamente mediante reguladores o por medio de autómatas programables.

Una infraestructura hidráulica de distribución de agua se puede considerar un sistema continuo donde se pueden controlar, o regular, una o más variables. En este caso la variable de salida será el nivel del canal. Desde un centro de control se marcará una consigna de nivel para un tramo de canal. Este tramo se regulará automáticamente mediante la apertura o cierre de las compuertas que lo seccionan, llenándolo o vaciándolo según sea necesario, hasta alcanzar con una precisión aceptable el nivel de agua deseado.

El sistema de regulación consistirá en la adquisición del valor de la variable de salida, mediante instrumentación, la lectura de la variable de entrada consignada desde el centro de control, un regulador automático implementado en autómatas programables cuya función será controlar el sistema, y el tramo de la infraestructura hidráulica como sistema a controlar.

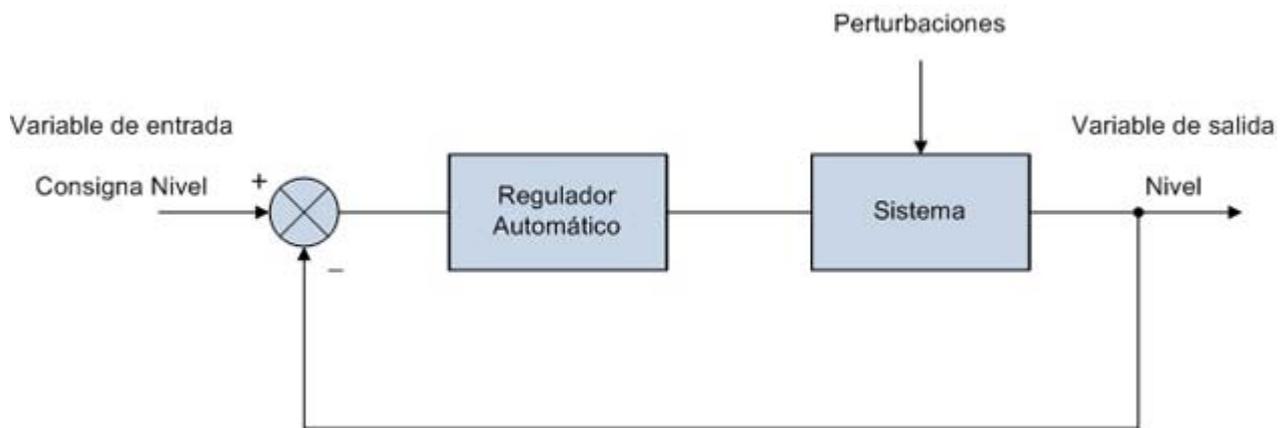


FIGURA 4-01  
- BUCLE DE REGULACIÓN CLÁSICO.

### • Finalidad de la regulación

Con la instalación del sistema de regulación se persiguen los siguientes objetivos:

- No desperdiciar ni una gota de agua, de manera que los aliviaderos perdieran su razón de ser. Los transitorios producidos serán amortiguados para que no lleguen a provocarse elevaciones de lámina que supongan un riesgo de desbordamiento.
- El canal permanecerá siempre lleno. Esta condición se deberá mantener incluso en invierno. De esta manera se prolongará la vida del revestimiento minimizando una gran parte de las roturas.
- En el caso de una rotura, el tramo afectado deberá de ser aislado lo más rápidamente posible para minimizar los daños en el propio canal y aguas abajo del mismo.

## • Modelado Del Sistema Físico

Todo sistema físico puede expresarse mediante un modelo matemático, ya sea un sistema térmico, un sistema mecánico o un sistema hidráulico.

La obtención del modelo matemático es necesaria para analizar el comportamiento del sistema y obtener el controlador que mejor se adapte a unas especificaciones determinadas. Una forma de expresar matemáticamente un sistema es utilizando ecuaciones diferenciales lineales que describan su comportamiento físico en el entorno de trabajo, relacionando la entrada (o variable que permite manipular el sistema) y la salida (o variable que interesa controlar en el sistema).

Cuando las ecuaciones diferenciales son de coeficientes constantes, es posible, aplicando la transformada de Laplace y considerando condiciones iniciales nulas, obtener el cociente entre la salida y la entrada del sistema en el campo transformado de Laplace. Este cociente, conocido como función de transferencia, es un modelo matemático que permite realizar análisis más sencillos del comportamiento del sistema mediante métodos algebraicos.

En ocasiones la obtención de la función de transferencia a partir de las ecuaciones diferenciales puede resultar compleja, inexacta o poco fiable. Afortunadamente existen herramientas de simulación que permiten obtener datos suficientes para la identificación del sistema y la obtención de su función de transferencia.

En el tramo de la infraestructura hidráulica interesa controlar la altura de la lámina (salida del sistema) al final del tramo en función del caudal suministrado al comienzo del mismo (entrada del sistema). Debido a la complejidad de las ecuaciones involucradas en el modelo se ha optado por utilizar una herramienta de análisis hidráulico, HEC-RAS, con objeto de poder obtener, mediante simulación y el posterior análisis de ésta, una función de transferencia que caracterice adecuadamente el comportamiento del sistema.

## 4.1 - SIMULACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE HEC-RAS.

HEC-RAS es un software de análisis de ríos o canales desarrollado por el departamento de ingeniería hidráulica del ejército de los Estados Unidos. El software permite estudiar el comportamiento de una estructura hidráulica, ya sea sencilla como un canal o compleja como un río, frente a regímenes permanentes o transitorios. Los resultados se muestran en gráficas de caudal-tiempo, nivel-tiempo, relaciones de caudal-nivel, tablas de datos hidráulicos, animaciones 3D, etc.



FIGURA 4.1-01  
- PANTALLA DE INFORMACIÓN DEL PROGRAMA HEC-RAS.

HEC-RAS permite estudiar el comportamiento del sistema Tramo de la Infraestructura Hidráulica para poder identificar el modelo de sistema que mejor se ajuste al comportamiento observado y obtener datos que permitan deducir los parámetros del mismo. Desde el punto de vista del control de sistemas continuos se podrá observar de forma un poco más realista como se comporta el sistema frente a señales tipo escalón o rampa. Además mediante el estudio se pueden obtener los valores de la ganancia y la constante de tiempo del sistema.

### • Geometría del Sistema

El sistema que se ha simulado es un tramo genérico de canal, de forma trapezoidal.

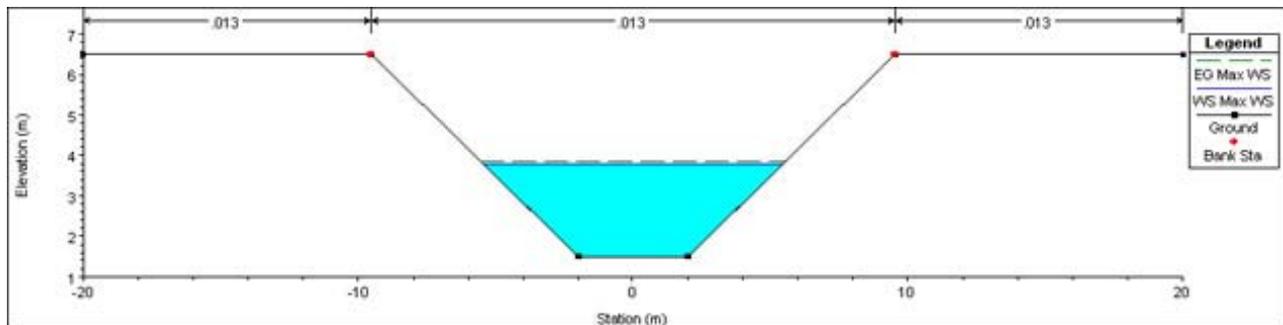


FIGURA 4.1-02  
- SECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA SIMULADO EN HEC-RAS.

La longitud del tramo es de 10Km con un desnivel de 0,00015m/m, lo que supone en la totalidad del tramo una diferencia de 1,5m. El calado máximo es de 5m, la base del canal es de 4m y la inclinación de las paredes laterales es de 33,69°. La estructura esta realizada en hormigón lo que supone una rugosidad de las paredes de 0,013 (Manning's value).

Se han establecido dos puntos de medida: uno al inicio del tramo y otro al final, donde se situarán las arquetas de medida. Ahí es donde se tomará la medida de nivel del canal, por lo tanto es en esos puntos donde se desea obtener resultados en las simulaciones. El punto RS1 es el punto inicial, aguas arriba. El punto RS0 es el punto final, aguas abajo.

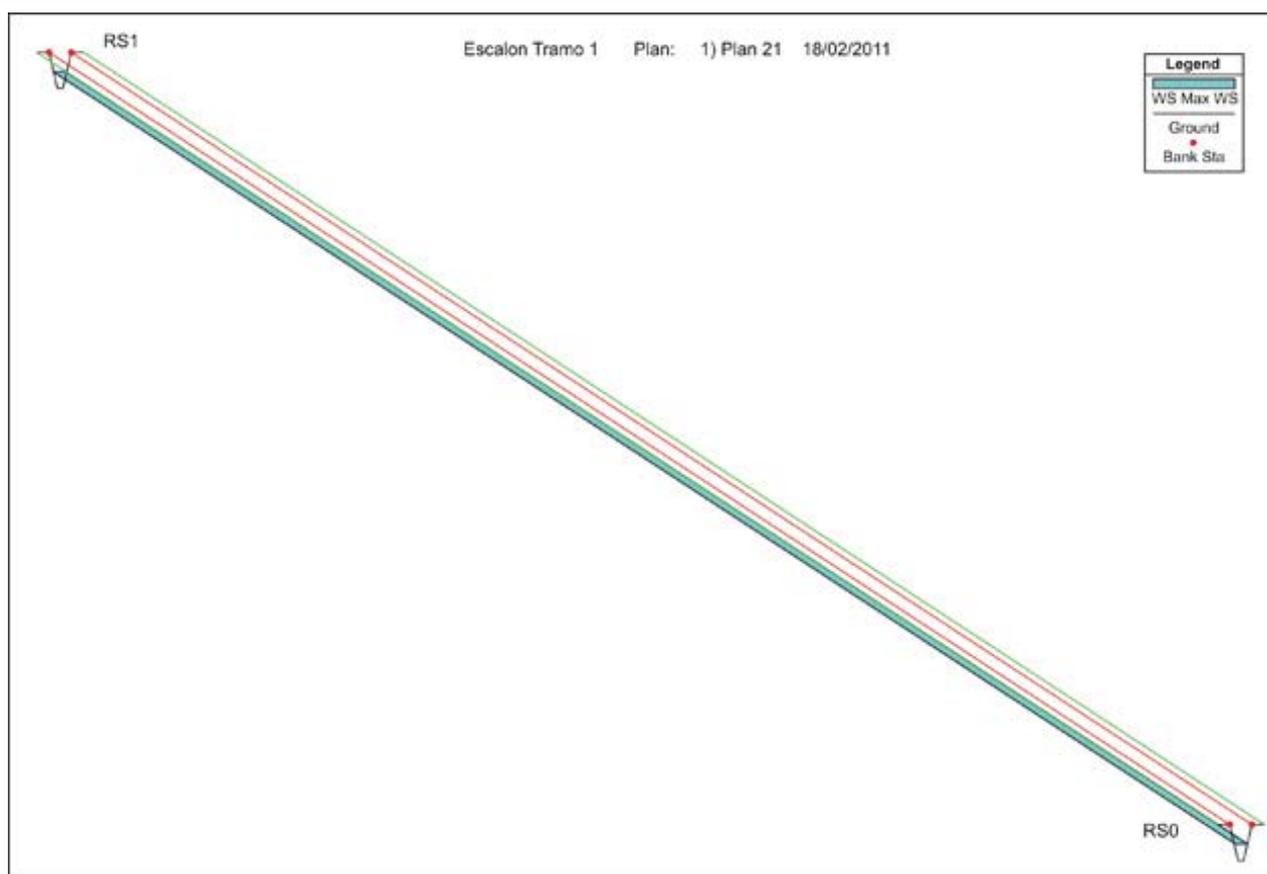


FIGURA 4.1-03  
- VISTA EN PERSPECTIVA DE LA GEOMETRÍA DEL TRAMO DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA.

## • Simulaciones

Las situaciones que se han simulado son aumentos de caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que supone una diferencia de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , rango de valores sobre los cuales se pretende trabajar en la regulación. En realidad el paso de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  no se hace de forma instantánea (escalón), sino de forma gradualmente lineal. Se han contemplado dos escenarios. En el primero de ellos el tiempo que se tarda en alcanzar los  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  es de 1 hora. Este tiempo obedece a una operación de apertura con un tiempo algo más lento al de una operación de apertura real. En el segundo escenario el tiempo que transcurre hasta alcanzar los  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  es de 10 minutos. En este caso la reducción del tiempo de operación obedece a criterios de aproximación del aumento de caudal a un escalón ideal.

### AUMENTO DE CAUDAL DE $10 \text{ m}^3/\text{s}$ A $20 \text{ m}^3/\text{s}$ EN 1 HORA.

En el primer escenario contemplado se pasa de un caudal inicial y estable de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  a uno de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  en un periodo de una hora. Este comportamiento puede simular un aumento de caudal para compensar, por ejemplo, una disminución de nivel en el tramo. En situaciones reales son más probables pequeños aumentos de caudal que no superen el rango de los  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , de ahí la importancia de esta simulación.

En la figura 4.1-04 se muestra el caudal en el punto RS1, inicio de tramo.

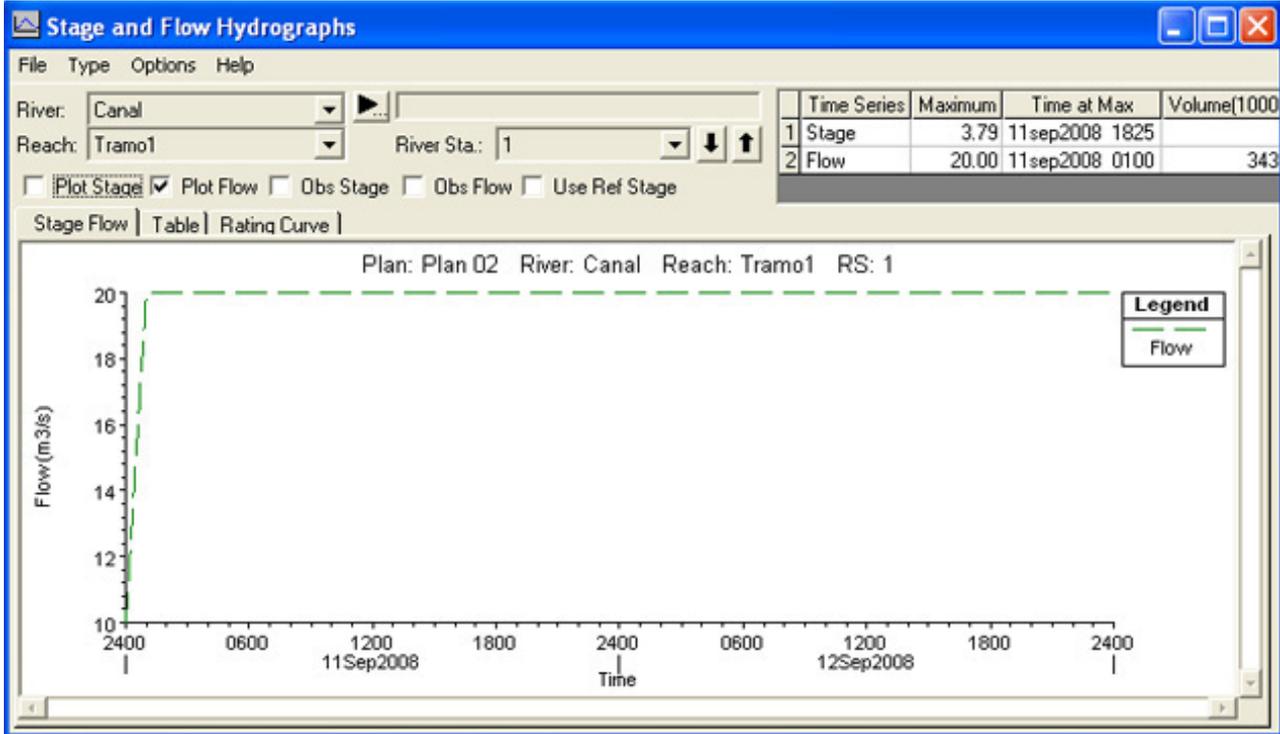


FIGURA 4.1-04  
 - INCREMENTO DE CAUDAL EN UNA HORA. PUNTO RS1, INICIO DE TRAMO.

Al ejecutar la simulación se obtiene un aumento de nivel en el punto RS0, final de tramo, tal como se observa en la figura 4.1-05.

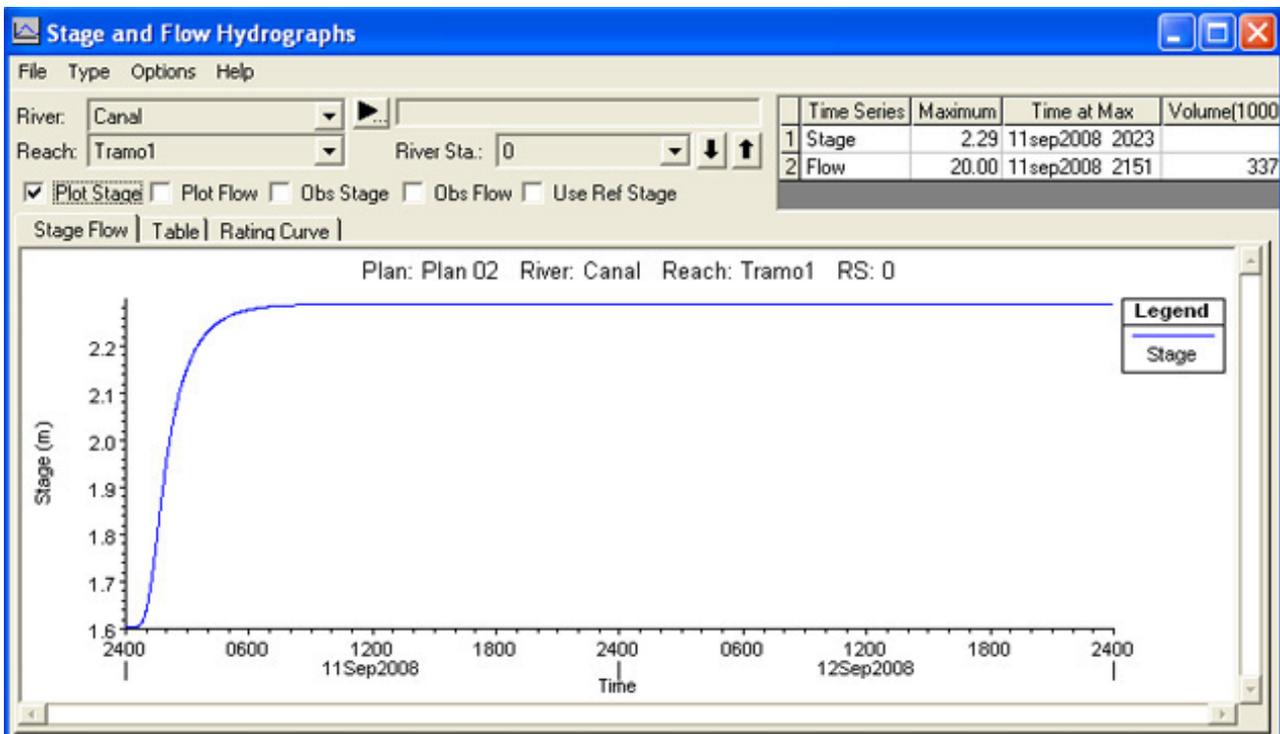


FIGURA 4.1-05  
 - VARIACIÓN DE NIVEL EN EL TIEMPO EN EL PUNTO RS0, FINAL DE TRAMO.

Se observa un comportamiento similar a un primer orden con retardo puro. En este caso se parte de una situación inicial estable de  $10\text{m}^3/\text{s}$  lo que implica un nivel de 1,6m. El aumento de nivel no es instantáneo: se inicia tras un tiempo de retardo, pues aguas arriba el aumento de caudal se inicia a las 24 horas y se puede ver como el nivel aumenta a partir de la primera media hora. El nivel se estabiliza en 2,29m y el caudal llega al valor deseado de  $20\text{m}^3/\text{s}$ .

### AUMENTO DE CAUDAL DE $10\text{m}^3/\text{s}$ A $20\text{m}^3/\text{s}$ EN 10 MINUTOS.

En esta simulación se pasa de una situación estable de caudal  $10\text{m}^3/\text{s}$ , al inicio del tramo, a un caudal de  $20\text{m}^3/\text{s}$  en un tiempo de 10 minutos. El objetivo de la simulación es obtener un resultado aguas abajo con una entrada al sistema más similar al escalón de caudal ideal.

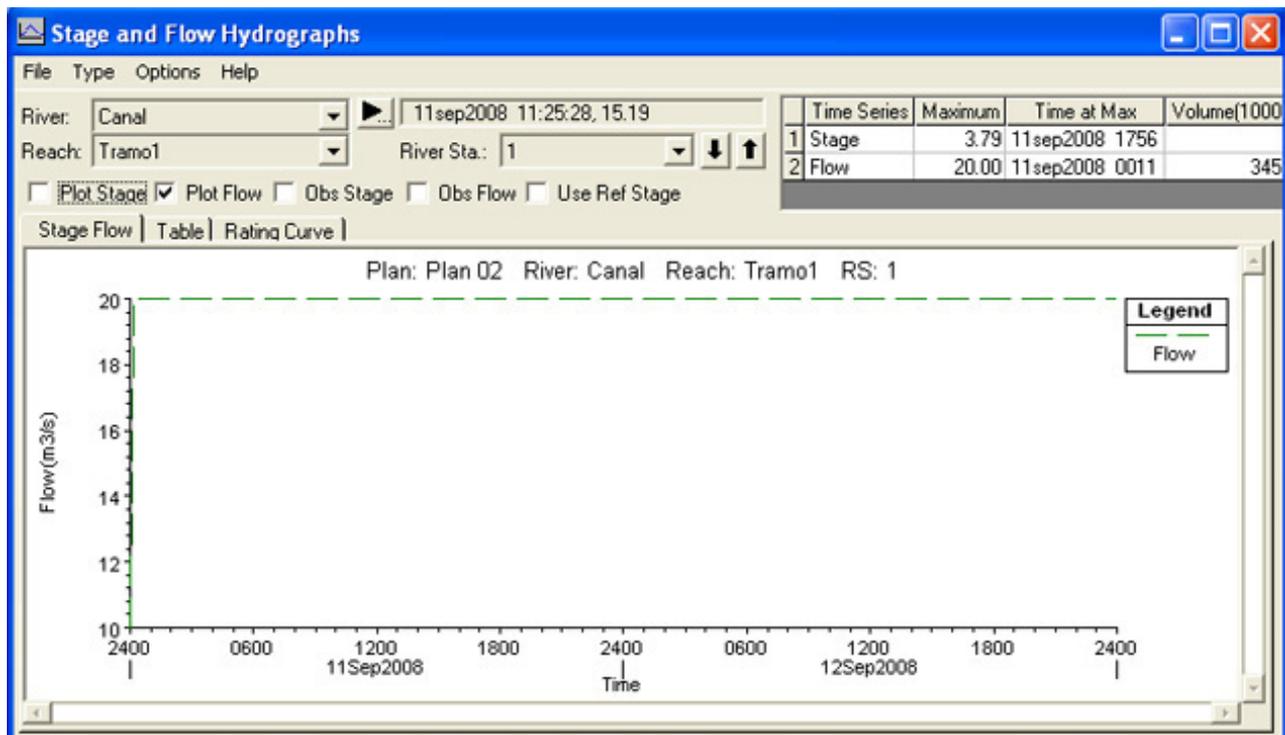


FIGURA 4.1-06  
- INCREMENTO DE CAUDAL EN DIEZ MINUTOS. PUNTO RS1, INICIO DE TRAMO.

El aumento de caudal en el punto RS1, inicio del tramo, comienza a las 24 horas y dura 10 minutos. La señal, mostrada en la figura 4.1-06, se puede aproximar a un escalón ideal, al ser los 10 minutos despreciables frente a la dinámica temporal de evolución del nivel en el punto RS0, final del tramo, observada en la figura 4.1-07.

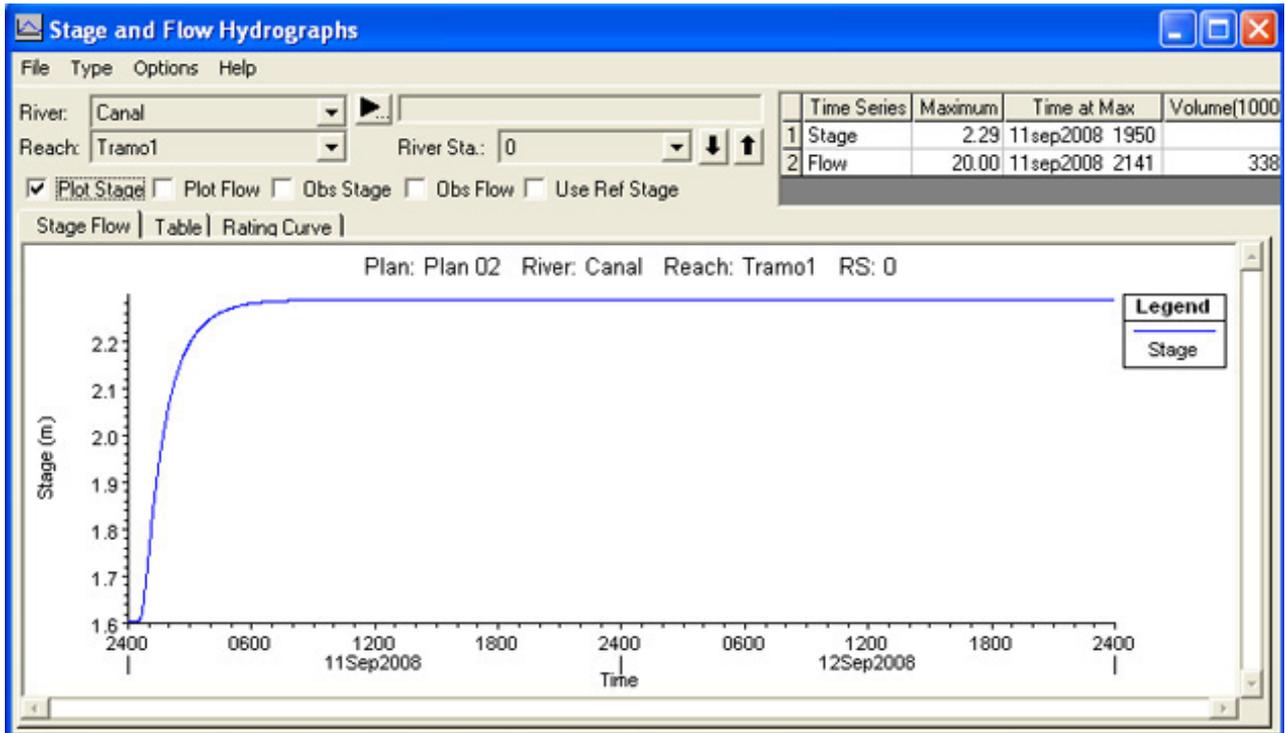


FIGURA 4.1-07  
- VARIACIÓN DE NIVEL EN EL TIEMPO EN EL PUNTO RS0, FINAL DE TRAMO.

Se puede observar un comportamiento muy similar a la simulación anterior. Existe un pequeño retardo y el sistema se puede aproximar por un primer orden con retardo. El sistema alcanza el 95% de su salida pasadas las 3 horas.

## • Conclusiones

Después de realizar un análisis preliminar de las simulaciones se puede establecer como hipótesis de partida que el sistema se comporta como un primer orden con retardo puro.

Una primera aproximación al comportamiento dinámico del sistema indica que el tiempo de retardo está algo por encima de los 30 minutos y el tiempo de respuesta es superior a las 3 horas.

En el siguiente apartado se calcularán los parámetros del sistema con mayor precisión.

## 4.2- CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA.

De las conclusiones de la simulación se deduce que el sistema se comporta como un primer orden con retardo. Para calcular los parámetros que gobiernan el sistema es necesario conocer este tipo de sistema y a qué hacen referencia estos parámetros.

### • Sistemas De Primer Orden Con Retardo

En un gran número de sistemas reales la respuesta a las acciones dadas no se observa de inmediato, tarda un tiempo en notarse el efecto sobre la dinámica del sistema. Es decir, puede transcurrir un cierto tiempo hasta que el sistema comienza a responder al cambio realizado. Este tiempo se denomina *retardo*.

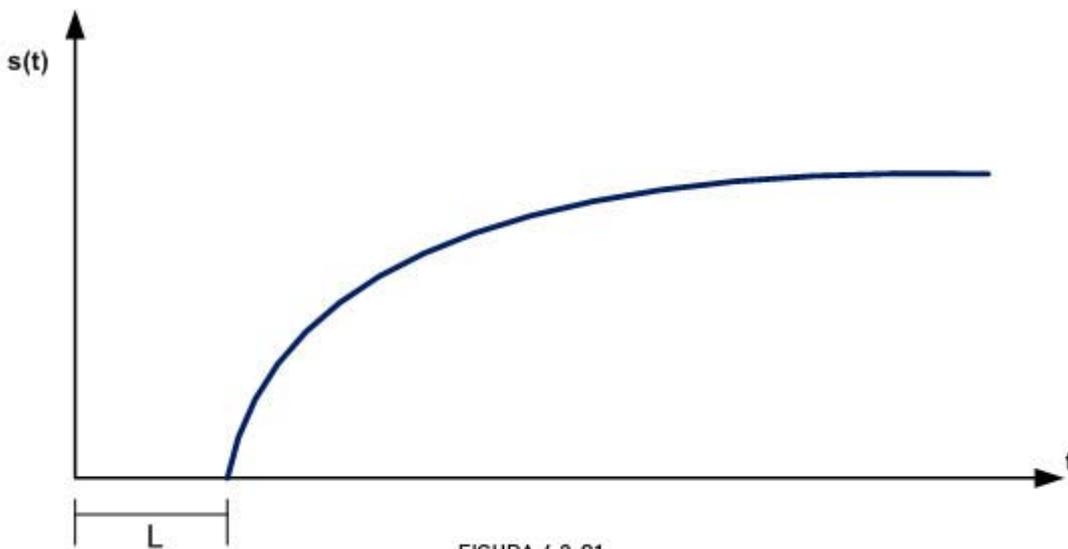


FIGURA 4.2-01  
- RESPUESTA DE UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN CON RETARDO L.

En el sistema Tramo de la Infraestructura Hidráulica se observa que desde que comienza el cambio hasta que reacciona la salida existe un retardo. Este retardo está provocado por las dimensiones y las características físicas del tramo. Parece lógico pensar que desde que se introduce un caudal en la cabecera del tramo hasta que llega al final debe pasar un determinado tiempo. A parte de este retardo el sistema responde como uno de primer orden por lo que basta añadir dicho retardo a la función de transferencia. Así pues, la función de transferencia de un primer orden con retardo es:

$$G(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls} \quad (4.1)$$

Donde el término  $e^{-Ls}$  representa el retardo y L es el tiempo de dicho retardo.

Un sistema de primer orden con retardo se caracteriza por tres parámetros:

- La ganancia estática K
- La constante de tiempo T, o Lag – time.
- El tiempo de retardo L, o Delay – time.

• **Diferencias En Las Respuestas Del Sistema Simulado en Hec-Ras.**

En el apartado anterior 4.1 – SIMULACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE HEC-RAS, se han ensayado dos casos, entrada con un aumento de caudal en una hora y entrada con un aumento de caudal en diez minutos. En principio las dos salidas obtenidas, el nivel en el final del tramo, son muy similares pero se diferencian ligeramente.

Uno de los objetivos de la simulación es obtener datos que permitan deducir los parámetros del sistema. Una comparación gráfica permite ver la diferencia entre los parámetros (L y T) correspondientes, obtenidos gráficamente a partir de las curvas de salida. El que las salidas sean diferentes es normal, al ser las entradas distintas. Sin embargo, en una primera aproximación, puede resultar sospechosa la diferencia de valores entre los parámetros.

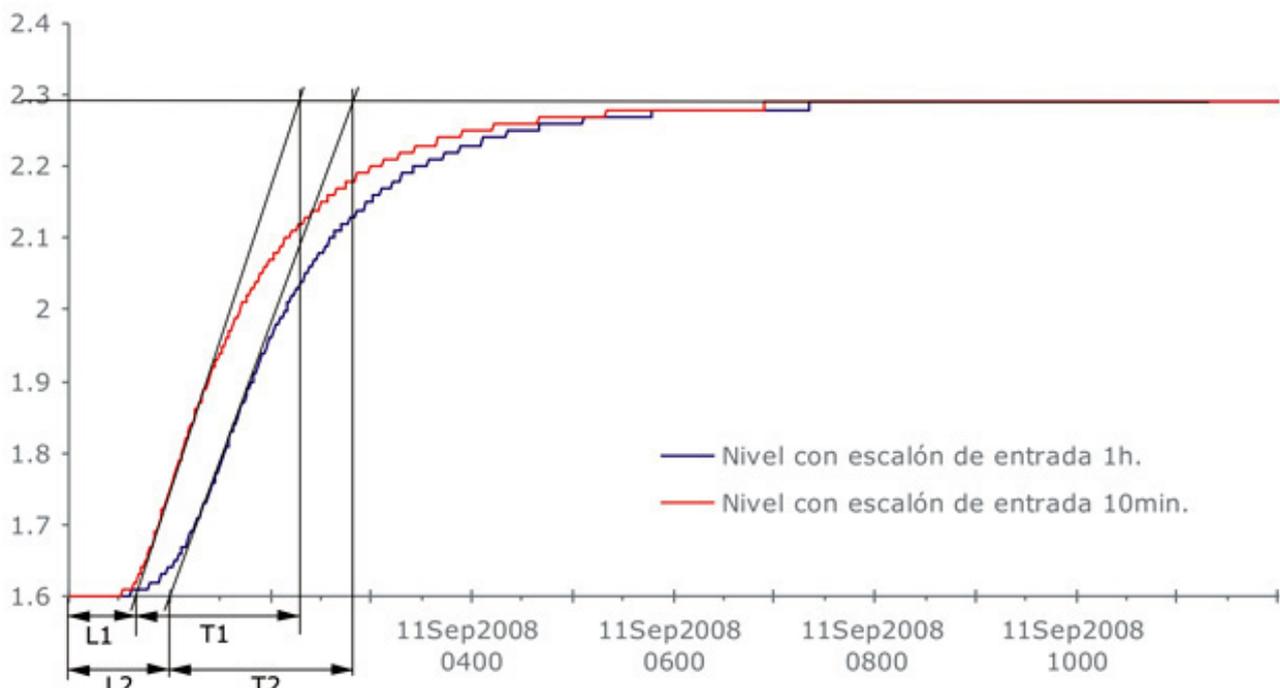


FIGURA 4.2-02  
 - RESPUESTAS DEL SISTEMA SIMULADO EN HEC-RAS. DIFERENCIAS EN LOS PARÁMETROS.

La respuesta del sistema obtenida frente a la entrada en escalón de caudal de 10 minutos se puede asemejar a la de un sistema de primer orden con retardo frente a una entrada en escalón ideal, ya que el tiempo de la "rampa" (10 minutos) es despreciable comparado con el tiempo T1 y su influencia prácticamente nula. Sin embargo para la entrada en escalón de 1 hora la influencia de la rampa se evidencia sobre la respuesta del sistema. En este caso T2 (1,8 horas) y el tiempo de rampa (1 hora) no distan tanto como para que la aproximación de la entrada por un escalón sea válida. La construcción gráfica para obtener los parámetros en este segundo caso ya no resulta correcta, ya que en realidad el comportamiento del sistema, si se insiste en idealizar la entrada como un escalón, no es ya el de un primer orden básico con retardo, sino el de un segundo orden básico con retardo, tal como se analiza a continuación.

## • Análisis De La Respuesta Del Sistema.

Para averiguar en que forma la entrada influye sobre la salida es necesario un análisis matemático de la respuesta del sistema frente al tipo de entrada utilizada. La señal de entrada aproximada al escalón usada en las simulaciones puede construirse como una señal compuesta de una rampa de pendiente  $\frac{\Delta Q}{T_{rampa}}$  y otra de la misma pendiente pero de signo contrario que se inicia en  $t = T_{rampa}$ .

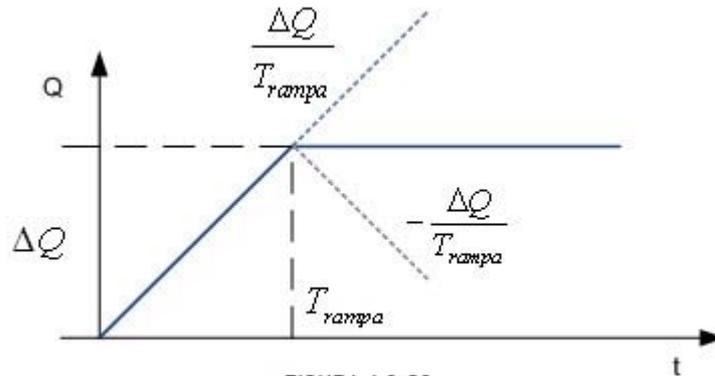


FIGURA 4.2-03  
- SEÑAL COMPUESTA DE ENTRADA.

La señal de entrada expresada en el dominio de Laplace es:

$$E(s) = \frac{\Delta Q}{T_{rampa}} \frac{1}{s^2} - \frac{\Delta Q}{T_{rampa}} \frac{1}{s^2} e^{-T_{rampa}s} = \frac{\Delta Q}{T_{rampa}} \frac{1}{s^2} (1 - e^{-T_{rampa}s}) \quad (4.2)$$

El término  $e^{-T_{rampa}s}$  hace referencia al tiempo de retardo hasta que la *segunda* rampa se inicia. La respuesta del sistema, la variación de nivel  $\Delta h$ , ante esta señal de entrada es:

$$\Delta h(s) = E(s) \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} = \frac{\Delta Q}{T_{rampa}} \frac{1}{s^2} (1 - e^{-T_{rampa}s}) \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (4.3)$$

Usando la aproximación de Padé:

$$\Delta h(s) \approx \frac{\Delta Q}{T_{rampa}} \frac{1}{s^2} \left( 1 - \frac{1 - s \frac{T_{rampa}}{2}}{1 + s \frac{T_{rampa}}{2}} \right) \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} = \frac{\Delta Q}{s} \cdot \frac{K}{\left( \frac{T_{rampa}}{2} s + 1 \right) (Ts+1)} e^{-Ls} \quad (4.4)$$

La expresión (4.4) es la respuesta del sistema cuando la entrada es una señal compuesta como la de la figura 4.2-03. Esta respuesta se puede interpretar como la respuesta a un escalón  $\Delta Q$  de un sistema de segundo orden sobreamortiguado de constantes de tiempo  $T_{rampa}/2$  y  $T$  con un retardo puro de  $L$ . En el caso de las simulaciones realizadas ambas

entradas corresponden con este tipo de señal, sin embargo cuando el  $T_{rampa}$  es muy pequeño frente a  $T$  el polo  $\left(\frac{T_{rampa}}{2}s+1\right)$  puede despreciarse. La respuesta del sistema en este caso queda:

$$\Delta h(s) = U(s) \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} = \frac{\Delta Q}{s} \cdot \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (4.5)$$

Ambas respuestas (4.4) y (4.5) serán similares cuando  $T_{rampa}$  sea despreciable frente a  $T$ . Si no lo es, el polo adicional, de constante de tiempo  $T_{rampa}$ , hace que el tiempo de respuesta del sistema ante la entrada  $E(t)$  sea mayor que  $L+3T$ .

La expresión (4.4) en el dominio temporal queda:

$$\Delta h(t) = \begin{cases} 0 & , \quad t < L \\ \Delta Q \cdot K \left( 1 - \frac{T}{T - \frac{T_{rampa}}{2}} e^{-\frac{1}{T}(t-L)} + \frac{\frac{T_{rampa}}{2}}{T - \frac{T_{rampa}}{2}} e^{-\frac{1}{\frac{T_{rampa}}{2}}(t-L)} \right) & , \quad t \geq L \end{cases} \quad (4.6)$$

Esta expresión obedece a la respuesta del sistema de primer orden con retardo cuando la entrada es una señal compuesta y  $T_{rampa}$  no es despreciable frente a  $T$  (aumento de caudal en 1 hora). Cuando  $T_{rampa}$  si es despreciable frente a  $T$  (aumento de caudal en 10 minutos) la respuesta en el dominio temporal es la siguiente:

$$\Delta h(t) = \begin{cases} 0 & , \quad t < L \\ \Delta Q \cdot K \left( 1 - e^{-\frac{1}{T}(t-L)} \right) & , \quad t \geq L \end{cases} \quad (4.7)$$

## • Cálculo De Los Parámetros Del Sistema

Gracias a los datos obtenidos en las simulaciones se puede determinar la ganancia estática del sistema. En ambos ensayos los valores iniciales y finales de caudal (10 y 20m<sup>3</sup>/s) y nivel (1,6 y 2,29m) son los mismos. Por lo tanto, la ganancia estática del sistema resultará de:

$$K = \frac{h_{\infty} - h_0}{q_{\infty} - q_0} = \frac{2,29 - 1,6}{20 - 10} = 0,069 \quad (4.8)$$

Para obtener el valor de los parámetros L y T será necesario aplicar un ajuste de mínimos cuadrados a las funciones obtenidas (4.6) y (4.7) en la sección anterior. Se ha utilizado el software MATLAB para realizar este cálculo. MATLAB (abreviatura de *MATRIX LABORATORY*, "laboratorio de matrices") es un software matemático con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). El paquete MATLAB dispone de la herramienta *Curve Fitting Tool* que permitirá realizar el cálculo de los parámetros del sistema mediante mínimos cuadrados.

## ANÁLISIS CON ENTRADA ESCALÓN DE CAUDAL EN 1 HORA.

Con la herramienta *Curve Fitting Tool* se puede obtener un valor de los parámetros L y T que se ajuste a la curva de respuesta del sistema cuando la entrada es una aproximación al escalón de caudal en 1 hora. Para ello en el entorno de MATLAB se llama a la herramienta *Curve Fitting Tool* (cftool). En la ventana *Data* se introducen los datos, en forma de variable, de las curvas de respuesta del sistema simulado en Hec-Ras. Tanto la respuesta ante un escalón de 1 hora como la respuesta al escalón de 10 minutos. En la ventana *Fitting* se configura el análisis que se va a realizar.

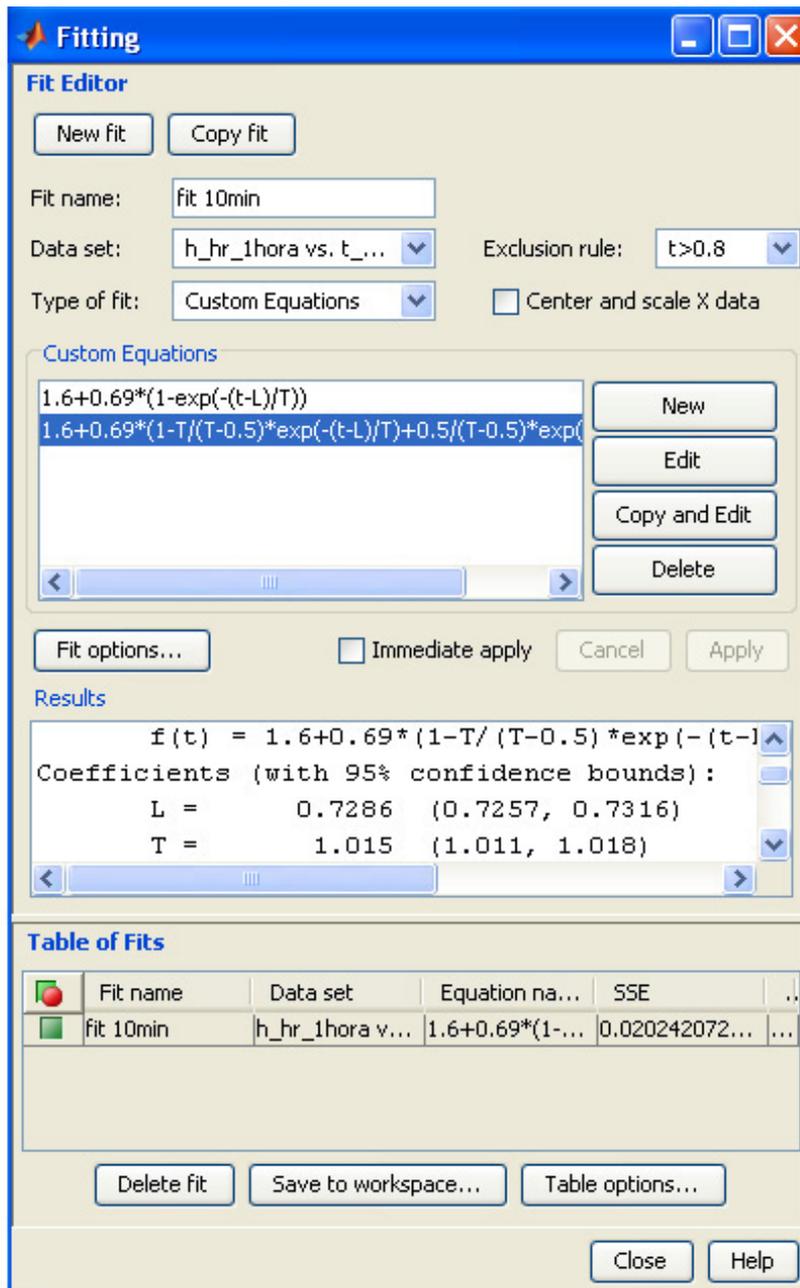


FIGURA 4.2-04  
 - VENTANA FITTING DE LA HERRAMIENTA CURVE FITTING TOOL DE MATLAB.  
 CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS PARA ESCALÓN DE CAUDAL EN 1 HORA.

La ecuación que se usa para el ajuste es la (4.6) con unas pequeñas modificaciones que permitirán realizar el cálculo correctamente. El término constante 1.6 hace referencia al nivel estable correspondiente a un caudal de  $10\text{m}^3/\text{s}$ . La constante 0,69 es el resultado de la  $\Delta Q$  ( $10\text{m}^3/\text{s}$ ) por la ganancia estática K del sistema (0.069) calculada en (4.8).

Durante los primeros instantes el nivel permanece constante a un valor 1,6m. Se han excluido todos los puntos anteriores a  $t = 0.8$ , momento en el cual el nivel comienza a subir. La exclusión de esos puntos impide que aparezcan errores incorrectos en dichos puntos, ya que para el ajuste la herramienta solo emplea una única curva para todo el tiempo ( $t \geq 0$ ) y no dos (una para  $0 \leq t < L$ , y otra para  $t \geq L$ ) como sería deseable.

Aplicando esta configuración (Apply), como se puede observar en la figura 4.2-04, la herramienta obtiene unos resultados y una representación grafica de la curva ajustada. Los resultados son los siguientes:

$t > 0.8$

General model:

$$f(t) = 1.6 + 0.69 * (1 - T / (T - 0.5)) * \exp(-(t - L) / T) + 0.5 / (T - 0.5) * \exp(-(t - L) / 0.5)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds)

$$L = 0.7286 \quad (0.7257, 0.7316)$$

$$T = 1.015 \quad (1.011, 1.018)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE} : 0.02024$$

$$\text{R-square} : 0.9991$$

$$\text{Adjusted R-square} : 0.9991$$

$$\text{RMSE} : 0.002674$$

Según estos resultados los parámetros L y T que mejor ajustan la ecuación (4.6) a la curva de respuesta del sistema cuando la entrada es un escalón de caudal en 1 hora son los siguientes:

$$L = 0.7286$$

$$T = 1.015$$

La representación gráfica de la curva ajustada es la siguiente:

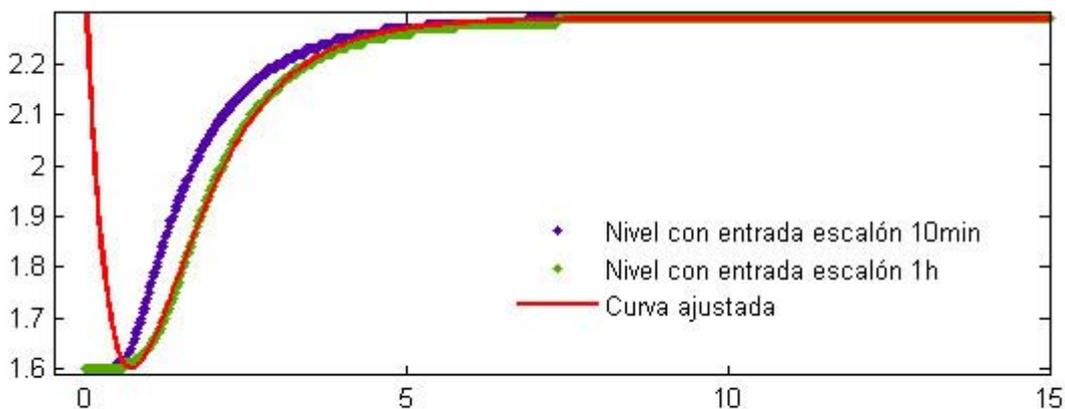


FIGURA 4.2-05  
- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AL ESCALÓN DE CAUDAL EN 1 HORA MEDIANTE LA HERRAMIENTA CURVE FITTING TOOL DE MATLAB.

Los primeros valores de la curva ajustada, correspondientes a instantes de tiempo  $t < L$  no se consideran en el cálculo del error ya que se han eliminado los datos por debajo de 0.8 horas.

En nuestro modelo el incremento de altura para instantes de tiempo anteriores a L es nulo y difiere del mostrado por la curva ajustada.

### ANÁLISIS CON ENTRADA ESCALÓN DE CAUDAL EN 10 MINUTOS.

Una vez realizado el análisis para la curva de respuesta a la entrada en escalón de 1 hora es necesario realizar otro análisis para el caso de la respuesta del sistema a la entrada en escalón de caudal en 10 minutos y obtener unos parámetros que ajusten el sistema a esta curva. Ambos parámetros, los obtenidos para el caso de 1 hora y los del caso de 10 minutos deberían ser similares.

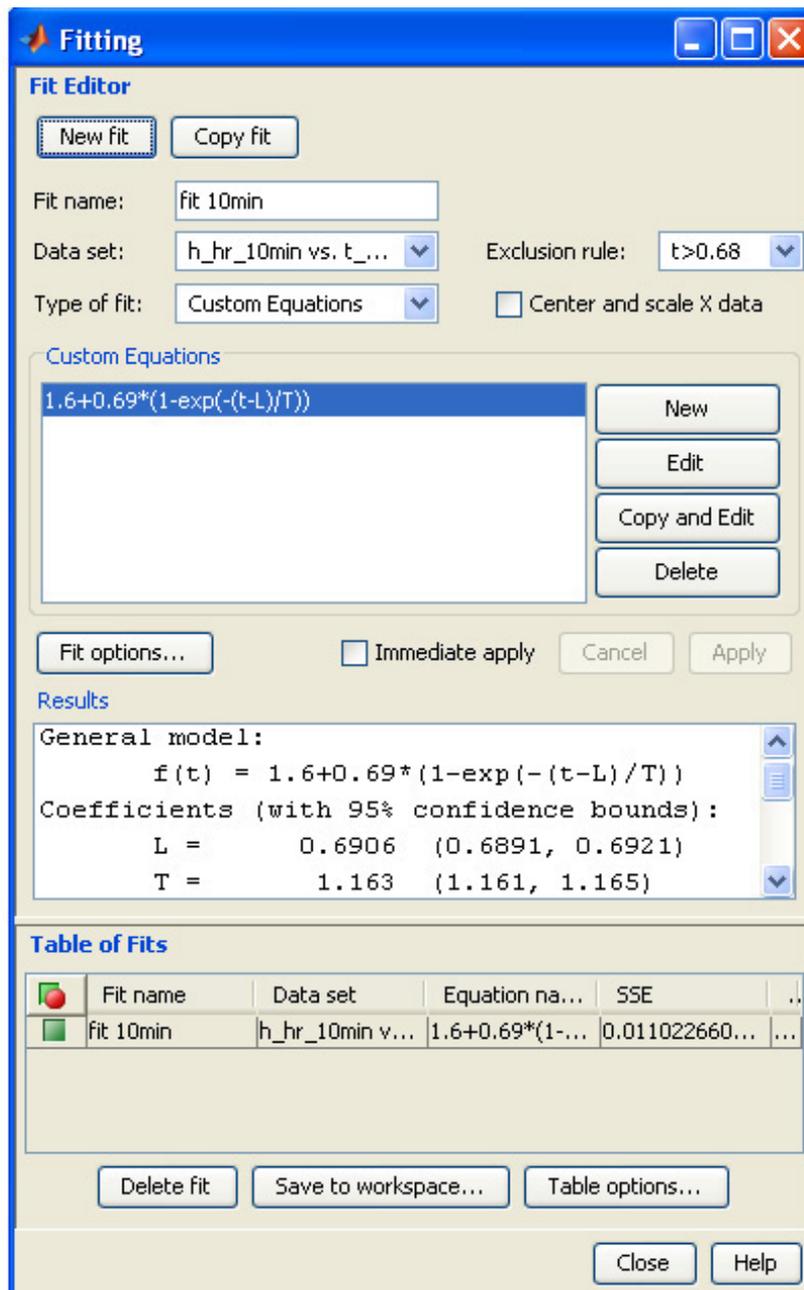


FIGURA 4.2-06  
 - VENTANA FITTING DE LA HERRAMIENTA CURVE FITTING TOOL DE MATLAB.  
 CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS PARA ESCALÓN DE CAUDAL EN 10 MINUTOS.

La ecuación que se usa para este ajuste es la (4.7) ya que se trata de un caso prácticamente ideal donde se puede despreciar el  $T_{rampa}$  respecto a  $T$ . El término constante 1.6 hace referencia al nivel estable correspondiente a un caudal de  $10\text{m}^3/\text{s}$ . La constante 0,69 es el resultado de la  $\Delta Q$  ( $10\text{m}^3/\text{s}$ ) por la ganancia estática  $K$  del sistema (0.069) calculada en (4.8)

Se han excluido todos los puntos anteriores a  $t = 0.68$ , momento en el cual el nivel comienza a subir, ya que durante los primeros instantes el nivel permanece constante a un valor 1,6m. La exclusión de esos puntos impide que aparezcan errores incorrectos en dichos puntos. La ventana de configuración *Fitting* para este análisis puede verse en la figura 4.2-06.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

$t > 0.68$

General model:

$$f(t) = 1.6 + 0.69 \cdot (1 - \exp(-(t-L)/T))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds)

$$L = 0.6906 \quad (0.6891, 0.6921)$$

$$T = 1.163 \quad (1.161, 1.165)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE} : 0.01102$$

$$\text{R-square} : 0.9993$$

$$\text{Adjusted R-square} : 0.9993$$

$$\text{RMSE} : 0.001971$$

Según estos resultados los parámetros  $L$  y  $T$  que mejor ajustan la ecuación (4.7) a la curva de respuesta del sistema cuando la entrada es un escalón de caudal en 10 minutos son los siguientes:

$$L = 0.6906$$

$$T = 1.163$$

La representación gráfica de la curva ajustada es la siguiente:

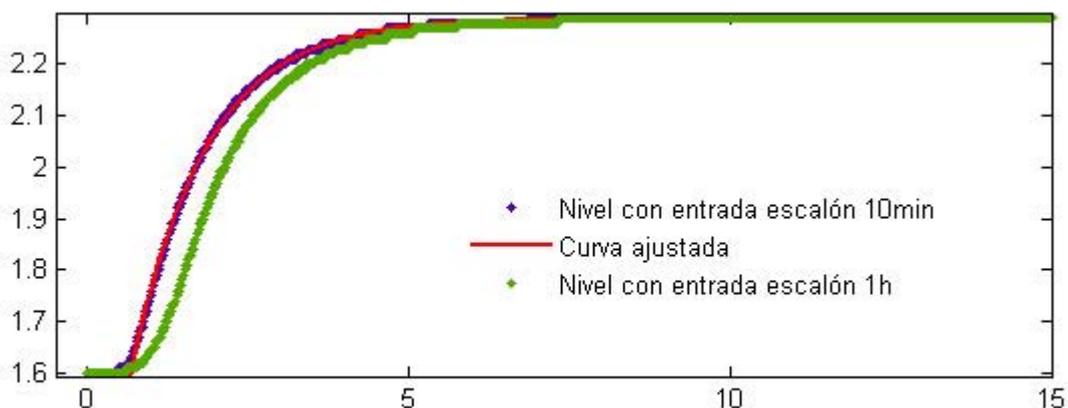


FIGURA 4.2-07  
- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA RESPUESTA AL ESCALÓN DE CAUDAL EN 10 MINUTOS MEDIANTE LA HERRAMIENTA CURVE FITTING TOOL DE MATLAB.

Como puede verse en la figura, con estos parámetros el sistema se ajusta perfectamente a la respuesta obtenida en la simulación mediante Hec-Ras. Como se deducía al principio los parámetros obtenidos para el caso del escalón de caudal en 1 hora y el caso del escalón de caudal en 10 minutos son próximos. Para el caso de  $L$ , 0.7286 y 0.6906. Para el caso de  $T$ , 1.015 y 1.163.

De estos análisis se obtienen los parámetros necesarios para determinar la función de transferencia del sistema:

$$G(s) = \frac{0.069}{1.163s+1} e^{-0.6906s} \quad (4.9)$$

La función de transferencia del sistema, relación entre la entrada y la salida, es la resultante en (4.9), donde la entrada al sistema es un incremento de caudal ( $m^3/s$ ) y la salida un incremento de nivel (m). De esto se deduce que las acciones a aplicar al sistema serán modificaciones de caudal y las realimentaciones serán medidas de las variaciones de nivel y por lo tanto las consignas deberán ser niveles. Esto es exactamente lo que se pretende en este proyecto.

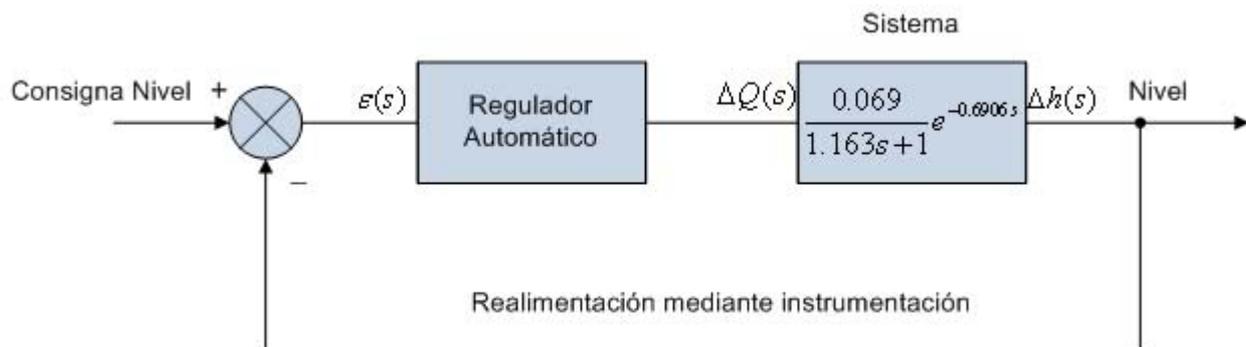


FIGURA 4.2-08  
 - BUCLE DE REGULACIÓN CON LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA DETERMINADOS.

### 4.3.- CONTROL DEL SISTEMA MEDIANTE REGULADOR

El objetivo de un sistema de control regulador es mantener la salida del sistema en un valor constante, el de referencia o consigna. De manera que se atenúe lo más rápido posible el efecto de perturbaciones sobre la salida. En el caso del tramo de infraestructura hidráulica el objetivo del sistema de control es mantener el nivel de agua al valor indicado desde el Centro de Control.

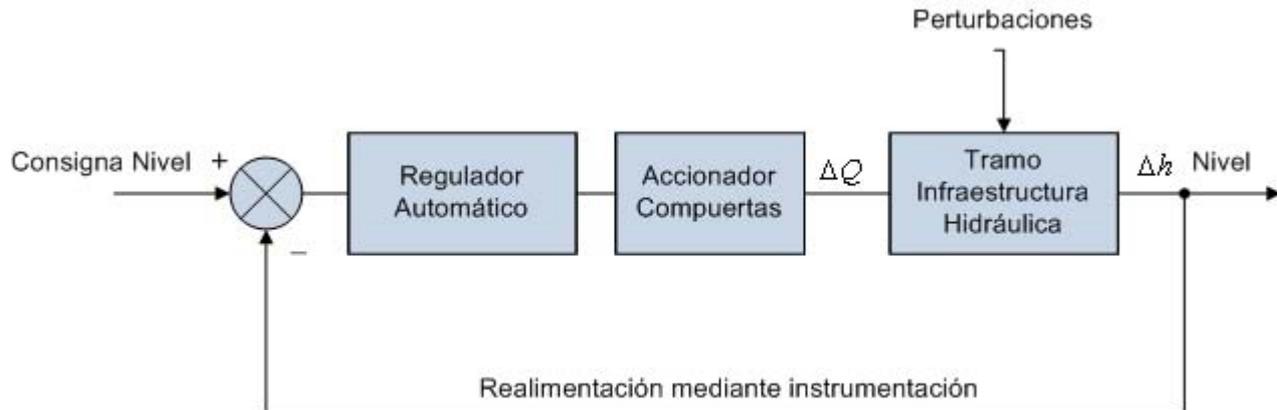


FIGURA 4.3-01  
- DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL DEL SISTEMA.

El centro de todo el sistema es el Tramo de la infraestructura hidráulica con su función de transferencia. En él, el nivel de agua en el tramo debe permanecer constante al valor de la consigna. La forma de conseguir mantener este nivel es mediante incrementos de caudal a través de la apertura o cierre de las compuertas. Para controlar el proceso se dispone de un regulador.

El regulador debe conocer la diferencia entre el valor deseado a la salida (consigna de nivel) y el valor actual de salida, el nivel medido. La variable realimentada se compara con la señal de mando (consigna) y se obtiene el error el cual es la entrada al regulador. El objetivo del regulador será mantener a cero el error en régimen permanente. Si la señal de error es cero, la variable controlada tendrá un valor que coincide exactamente con el previsto. Si no es así, el error entra en el regulador que proporciona una señal o variable de control (acción), la cual influirá en el proceso, abriendo o cerrando las compuertas, lo que significa variar el caudal, para que el error tienda a cero.

Una vez determinada la función de transferencia del proceso que se pretende controlar es necesario calcular el regulador apropiado a dicho sistema.

### • Diferentes tipos de reguladores

Existen cuatro tipos de reguladores clásicos, el regulador Proporcional, el Proporcional Integral, el Proporcional Diferencial y el regulador Proporcional Integral Diferencial. La misión de los reguladores dentro del bucle de regulación es reaccionar ante la señal de error modificando la variable de control hasta intentar conseguir que el error sea cero, es decir, error de posición cero. Se colocan en la cadena directa y permiten reaccionar ante variaciones de la referencia o la aparición de perturbaciones.

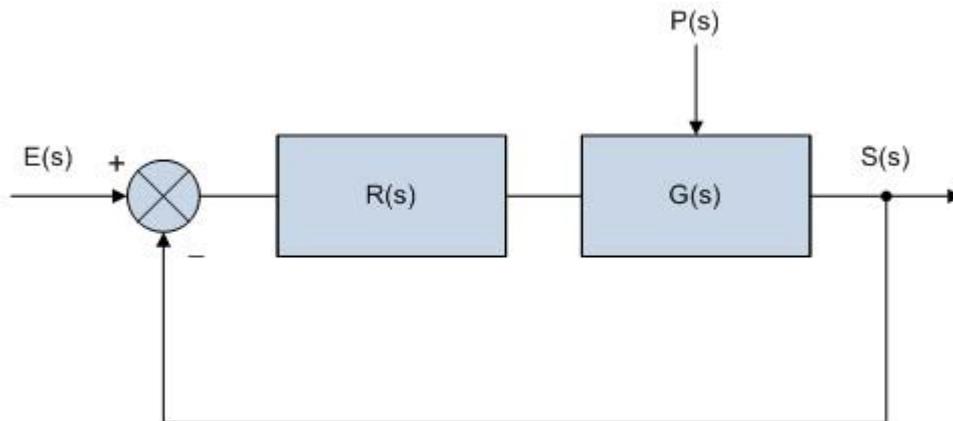


FIGURA 4.3-02

- BUCLE DE REGULACIÓN CON REGULADOR  $R(s)$ , SISTEMA  $G(s)$ , PERTURBACIONES  $P(s)$ , SALIDA  $S(s)$  Y ENTRADA  $E(s)$ .

La elección del tipo de regulador está en función de la respuesta del sistema que se desea obtener. Con el regulador se pretende:

- Conseguir que el nivel de agua en el tramo siga el nivel de referencia lo más exactamente posible.
- Minimizar el efecto de las perturbaciones, tomas del agua en el tramo, lo más rápidamente posible.
- Mejorar la respuesta temporal del sistema.

### • Comportamiento del sistema tramo de la infraestructura hidráulica con un regulador proporcional integral PI.

En un regulador proporcional integral la acción suministrada es proporcional al error y a la integral del error. Se consigue mejorar la precisión del sistema ya que el regulador integrará el error hasta suministrar la acción necesaria para conseguir, en régimen permanente, error de posición cero, es decir, se consigue alcanzar y mantener el nivel consignado desde el Centro de Control.

La función de transferencia de un regulador proporcional integral es:

$$R(s) = K_i \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (4.10)$$

Colocando un regulador PI en la cadena directa, donde  $G(s)$  es la función de transferencia de un sistema de primer orden con retardo, la función de transferencia en bucle abierto queda:

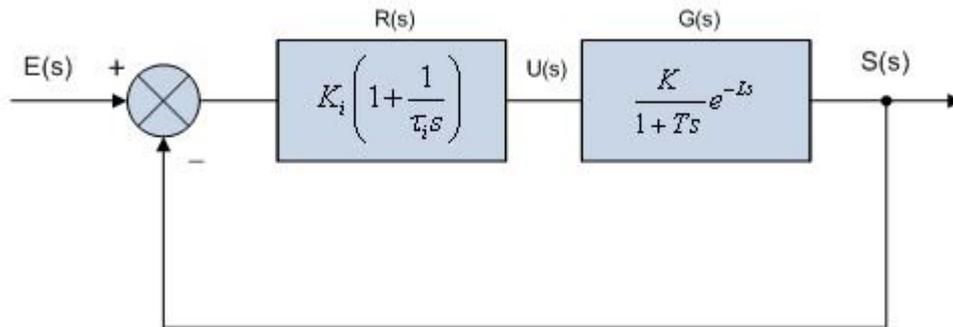


FIGURA 4.3-03  
- REGULACIÓN DEL SISTEMA CON UN REGULADOR PROPORCIONAL INTEGRAL.

$$R(s)G(s) = K_i \frac{(1 + \tau_i s)}{\tau_i s} \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (4.11)$$

El término  $e^{-Ls}$  se puede aproximar mediante Taylor a  $(1 - Ls)$ , por lo que queda:

$$R(s)G(s) = K_i \frac{(1 + \tau_i s)}{\tau_i s} \frac{K(1 - Ls)}{(1 + Ts)} \quad (4.12)$$

Haciendo la constante de tiempo del regulador igual a la constante de tiempo del sistema se obtiene:

$$\tau_i = T \quad (4.13)$$

$$R(s)G(s) = \frac{K_i K (1 - Ls)}{Ts}$$

Se puede determinar el error de posición con:

$$K_{pos} = \lim_{s \rightarrow 0} R(s)G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_i K (1 - Ls)}{Ts} = \infty \quad (4.14)$$

$$e_p = \frac{1}{1 + K_{pos}} = 0$$

Luego el sistema regulado tiende a un error de posición cero, se ha mejorado la especificación en régimen permanente. En estas condiciones el nivel de agua en el tramo alcanzara el nivel de consigna con exactitud. El tiempo que tarde en alcanzarlo dependerá de la constante de tiempo del sistema.

La función de transferencia en bucle cerrado será:

$$\frac{S(s)}{E(s)} = \frac{R(s)G(s)}{1+R(s)G(s)} \Rightarrow \frac{S(s)}{E(s)} = \frac{(1-Ls)}{\frac{T-K_iKL}{K_iK}s+1} \quad (4.15)$$

Se deduce de esta función de transferencia que la constante de tiempo del sistema es:

$$\tau_s = \frac{T}{K_iK} - L \quad (4.16)$$

$$\text{Si } K_i \uparrow \uparrow \tau_s \downarrow \downarrow$$

Si se aumenta  $K_i$ , la ganancia del regulador PI, la constante de tiempo del sistema disminuye. Se mejora el transitorio y el sistema se hace más rápido. No obstante no se puede aumentar  $K_i$  tanto como se desee ya que estaría limitado a un valor tal que:

$$\frac{T}{K_iK} = L \Rightarrow K_i = \frac{T}{LK} \quad (4.17)$$

Para valores  $K_i$  mayores la  $\tau_s$  se haría negativa dando lugar a un sistema inestable.

Se observa además en (4.15) que la función de transferencia tiene un cero con parte real positiva. Esto implica que el sistema aproximado es de fase no mínima. Ello es debido a que la aproximación de Taylor no es válida para los primeros instantes de tiempo. Sin embargo pasados esos primeros instantes de tiempo las dos salidas (aproximada y no) empiezan a ser similares.

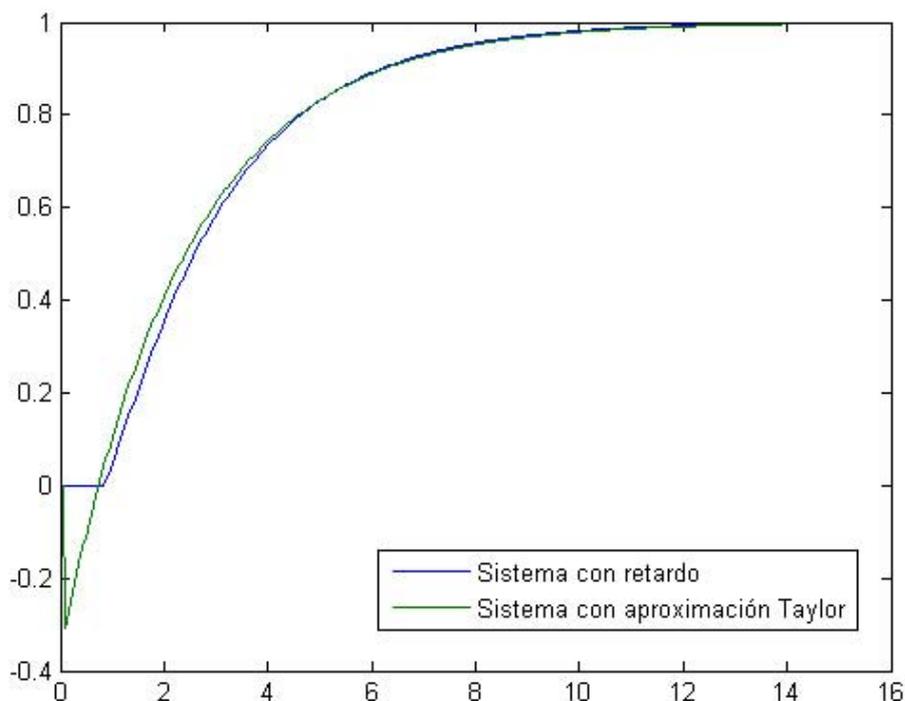


FIGURA 4.3-04  
- COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA CON RETARDO Y EL SISTEMA CON RETARDO APROXIMADO MEDIANTE TAYLOR.

## CONCLUSION

Se puede controlar un sistema de primer orden con retardo con un regulador PI con resultados óptimos ya que:

- El sistema tendrá error de posición cero. Alcanzará el valor de consigna.
- Mejora el transitorio ya que la constante de tiempo del sistema en lazo cerrado dependerá, en parte, de la ganancia del regulador  $K_i$  (4.16).

## • Comportamiento del sistema tramo de la infraestructura hidráulica con regulador proporcional integral diferencial PID.

En un regulador PID la acción suministrada es proporcional a la suma del error, la derivada del error y la integral del error. Aprovecha las ventajas de precisión de un regulador PI y la mejora del transitorio de un regulador PD. Su función de transferencia es:

$$R(s) = K_{pid} \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) (1 + \tau_d s) = K_{pid} \frac{(1 + \tau_i s)(1 + \tau_d s)}{\tau_i s} \quad (4.18)$$

Colocando el regulador PID, la función de transferencia en bucle abierto queda:

$$R(s)G(s) = K_{pid} \frac{(1 + \tau_i s)(1 + \tau_d s)}{\tau_i s} \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} \quad (4.19)$$

El término  $e^{-Ls}$  se puede aproximar ahora mediante Padé a  $\frac{(1 - L/2s)}{(1 + L/2s)}$ , por lo que queda:

$$R(s)G(s) = K_{pid} \frac{(1 + \tau_i s)(1 + \tau_d s)}{\tau_i s} \frac{K(1 - L/2s)}{(1 + Ts)(1 + L/2s)} \quad (4.20)$$

Haciendo la constante de tiempo integral del regulador igual a la constante de tiempo del sistema e igualando la constante de tiempo derivativa a  $L/2$  se obtiene:

$$\tau_i = T, \quad \tau_d = L/2 \quad (4.21)$$

$$R(s)G(s) = \frac{K_{pid} K (1 - L/2s)}{Ts}$$

Se puede determinar el error de posición con:

$$K_{pos} = \lim_{s \rightarrow 0} R(s)G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_{pid} K (1 - L/2s)}{Ts} = \infty \quad (4.22)$$

$$e_p = \frac{1}{1 + K_{pos}} = 0$$

Luego el sistema regulado tiende a un error de posición cero, se ha mejorado la especificación en régimen permanente. En estas condiciones el nivel de agua en el tramo alcanzara el nivel de consigna con exactitud. El tiempo que tarde en alcanzarlo dependerá de la constante de tiempo del sistema.

La función de transferencia en bucle cerrado será:

$$\frac{S(s)}{E(s)} = \frac{R(s)G(s)}{1 + R(s)G(s)} \Rightarrow \frac{S(s)}{E(s)} = \frac{(1 - L/2s)}{\frac{T - K_{pid}K(L/2)}{K_{pid}K} s + 1} \quad (4.23)$$

Se deduce de esta función de transferencia que la constante de tiempo del sistema es:

$$\tau_s = \frac{T}{K_{pid}K} - \frac{L}{2} \quad (4.24)$$

$$Si K_{pid} \uparrow \uparrow \tau_s \downarrow \downarrow$$

Si se aumenta Kpid, la ganancia del regulador PID, la constante de tiempo del sistema disminuye. Se mejora el transitorio y el sistema se hace más rápido. No obstante no se puede aumentar Kpid tanto como se desee ya que estaría limitado a un valor tal que:

$$\frac{T}{K_{pid}K} = \frac{L}{2} \Rightarrow K_{pid} = \frac{2T}{LK} \quad (4.25)$$

Para valores Kpid mayores la  $\tau_s$  se haría negativa dando lugar a un sistema inestable.

En los reguladores PID los grandes valores de acción inicial suministrados por la componente derivativa son un gran inconveniente debido a la posibilidad de saturación de los actuadores. Esta saturación implicaría grandes movimientos en las compuertas alcanzando los topes máximos de las mismas, siendo este un comportamiento indeseable en la regulación del sistema. En la figura 4.3.1-05 puede verse una comparativa de acciones proporcionadas por diferentes configuraciones del regulador.

## • Perturbaciones En El Sistema

En el sistema Tramo de la infraestructura hidráulica una perturbación será entendida como una toma de agua, una fuga en el tramo o una adición de caudal externa. Esta última se trataría de un caso excepcional. Analizando matemáticamente el efecto de la perturbación en el sistema en bucle cerrado con un regulador se obtiene:

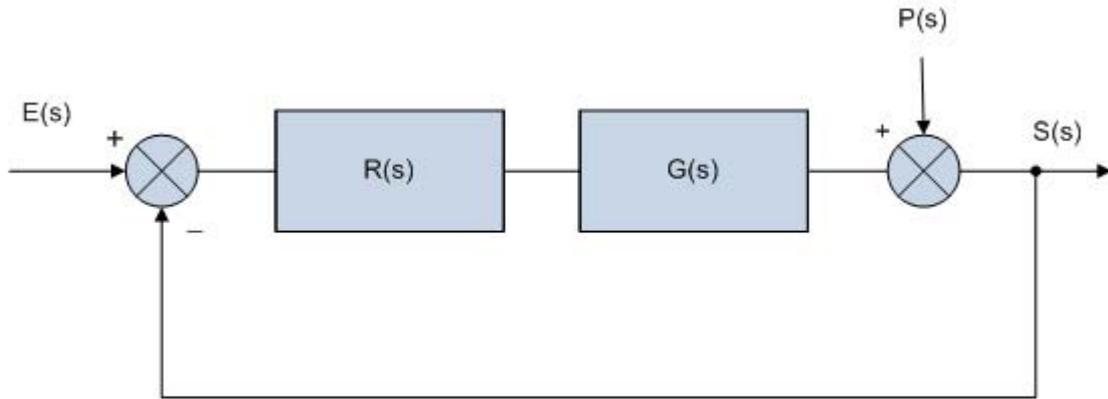


FIGURA 4.3-05  
- BUCLE DE REGULACIÓN CON PERTURBACIONES P(s) EN EL SISTEMA.

$$\frac{S(s)}{P(s)} = \frac{1}{1 + R(s)G(s)} \quad (4.26)$$

De esta expresión puede deducirse que el efecto de la perturbación sobre la variable de salida, nivel, será menor cuanto mayor sea la ganancia de la cadena directa, esto es, la del regulador por la de la función de transferencia del sistema. Esto se puede conseguir aumentando la ganancia estática del regulador, por tanto:

$$\text{Si } K_{pos} \uparrow\uparrow \text{ el efecto de } P(s) \text{ sobre } S(s) \downarrow\downarrow \quad (4.27)$$

En el caso de un regulador proporcional integral será:

$$K_{pos} = \lim_{s \rightarrow 0} K_i \frac{(1 + \tau_i s)}{\tau_i s} = \infty \quad (4.28)$$

Lo que significa que la ganancia estática de este regulador es infinita y por lo tanto elimina el efecto de la perturbación cuando esta adquiere un valor constante en régimen permanente.

El efecto de la perturbación no es nulo en el tiempo, es decir, cuando una toma de agua extrae caudal del tramo, el nivel en este disminuye durante un tiempo, el transitorio, mientras tanto el regulador compensa el efecto de la perturbación aumentando la acción hasta que la perturbación mantiene un valor constante y la variable de salida del sistema, el nivel, recupera su valor de consigna. De igual forma cuando la toma cierra y deja de extraer caudal, el nivel aumenta. El error entonces es negativo con lo que el regulador disminuye su acción hasta que el nivel vuelve al valor deseado.

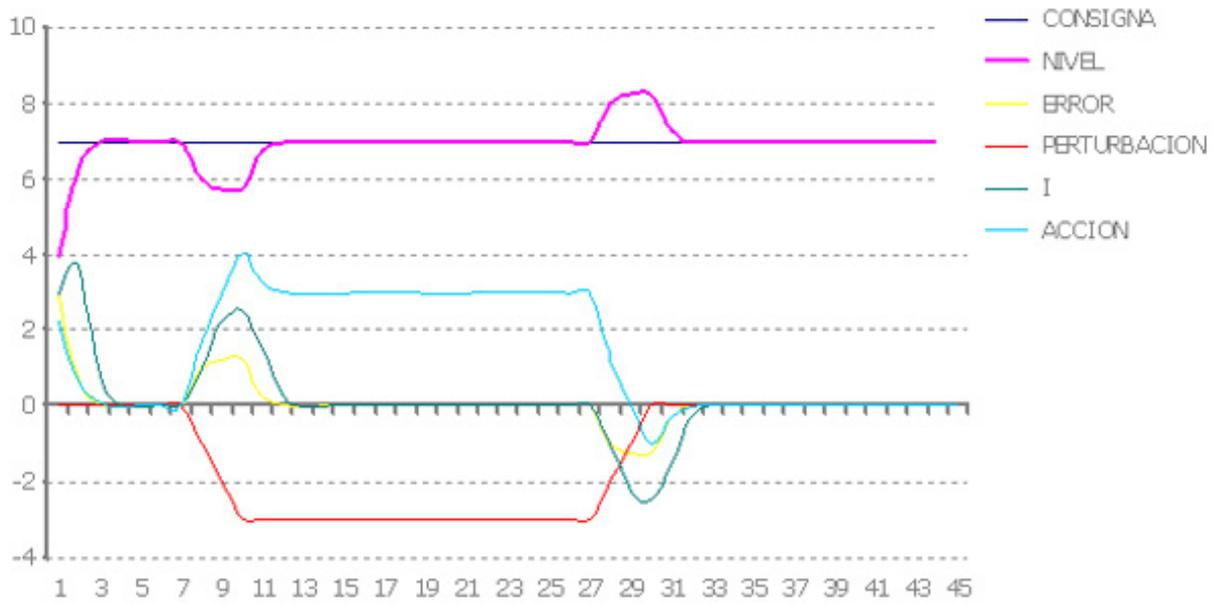


FIGURA 4.3-06  
- REACCIÓN DE UN REGULADOR PROPORCIONAL INTEGRAL CONTROLANDO UN SISTEMA CON PERTURBACIÓN.

En esta gráfica de un regulador proporcional integral regulando un sistema se observa que frente a la perturbación que se inicia en el tiempo 7 el nivel disminuye hasta que la perturbación se hace constante (tiempo 10) en ese momento el nivel se recupera al valor consigna. El regulador está eliminando el efecto de la perturbación. En el momento en que la perturbación comienza a desaparecer (tiempo 27), el error se hace negativo y el nivel aumenta hasta que la perturbación desaparece (tiempo 30), momento en el que el nivel disminuye hasta alcanzar el valor de consigna.

### 4.3.1 – CONTROL MEDIANTE LAMBDA-TUNING.

Lambda Tuning es un método de ajuste de controladores PI y PID a partir de los parámetros (L y T) del sistema a controlar. En los apartados anteriores se ha determinado que el sistema *Tramo de la Infraestructura Hidráulica* es de primer orden con retardo y se va a controlar con regulador PI o PID. Como ajuste principal de los parámetros del regulador se va a utilizar el método Lambda Tuning.

En el apartado 4.3 – CONTROL DEL SISTEMA MEDIANTE REGULADOR, se ha estudiado la viabilidad de controlar el sistema mediante reguladores PI y PID utilizando la cancelación de polos. Lambda Tuning es un caso especial de los métodos de cancelación de polos.

#### • Control PI

##### SISTEMAS DELAY DOMINATED

La función de transferencia de un regulador PI es (4.10). La función de transferencia de un sistema de primer orden con retardo es (4.1), entonces el sistema en lazo abierto es:

$$R(s)G(s) = K_i \frac{(1 + \tau_i s)}{\tau_i s} \frac{K}{1 + Ts} e^{-Ls} = \frac{K_i K}{Ts} (1 - Ls) \quad (4.29)$$

$$\tau_i = T$$

$$e^{-Ls} \approx (1 - Ls)$$

La función exponencial ha sido aproximada usando Taylor y la constante de tiempo del regulador se ha ajustado a T. El sistema en lazo cerrado queda:

$$\frac{S(s)}{E(s)} = \frac{(1 - Ls)}{\left(\frac{T}{K_i K} - L\right)s + 1} = \frac{(1 - Ls)}{T_{cl}s + 1} \approx \frac{1}{T_{cl}s + 1} e^{-Ls} \quad (4.30)$$

El parámetro  $T_{cl}$  originariamente se denominaba  $\lambda$  (lambda), de ahí el nombre del método, y es la constante de tiempo deseada del sistema en lazo cerrado. La elección de  $T_{cl}$  es crítica. Una regla común es elegir  $T_{cl} = 3T$  para obtener un regulador robusto y  $T_{cl} = T$  para un regulador más agresivo. Esta última regla solo se recomienda si el modelo del sistema es muy similar al sistema real. De la siguiente forma se obtienen todos los parámetros del regulador PI:

$$K_i = \frac{1}{K} \frac{T}{L + T_{cl}} \quad T_{cl} = 3T \rightarrow \text{Robusto} \quad (4.31)$$

$$\tau_i = T \quad T_{cl} = T \rightarrow \text{Agresivo}$$

Un inconveniente de este ajuste es la cancelación del polo del sistema, aunque no supone un problema si el sistema está dominado por el retardo (delay dominated). Conviene separar el estudio para sistemas *Delay Dominated* y sistemas *Lag Dominated*.

Así pues para sistemas *Delay Dominated* se obtiene el ajuste del regulador de aplicar (4.31), siendo  $T_{cl} = 3T$  si se busca un regulador robusto, sin sobreoscilación y no muy rápido. Si se ajusta  $T_{cl} = T$  se obtiene un regulador más agresivo pero deberían conocerse bien los parámetros del sistema. En cuanto al parámetro  $\tau_i$  está recomendado elegir su valor al mayor de los valores  $T$  ó  $3L$ . Para la implementación del regulador en el PLC se utiliza la siguiente estructura en paralelo del regulador PI:

$$R(s) = KP + \frac{KI}{s} \quad (4.32)$$

$$KP = K_i, \quad KI = \frac{K_i}{\tau_i}$$

En el apartado 4.2 – CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA, se obtienen los parámetros del sistema:

$$K = 0,069, L = 0,6906, T = 1,163$$

La tabla con los valores de ajuste del regulador es la siguiente.

CONTROL PI SISTEMAS DELAY DOMINATED					
REGULADOR PI	Tcl	Ki	$\tau_i$	KP	KI
ROBUSTO	3T	4.033	1.163	4.033	3.467
AGRESIVO	T	9.093	1.163	9.093	7.819
$\tau_i = T$					

## SISTEMAS LAG DOMINATED

Cuando un sistema tiene el parámetro  $T$  mucho mayor que  $L$  se dice que es un sistema Lag Dominated. En este tipo de sistemas eliminar el polo con el regulador puede provocar respuestas pobres a las posibles perturbaciones. Es necesario, por lo tanto, ajustar el regulador sin cancelar el polo del sistema.

$$R(s)G(s) = \frac{K_i K (1 + \tau_i s)(1 - Ls)}{\tau_i s(1 + Ts)} \quad (4.33)$$

La ecuación anterior muestra el sistema en lazo abierto. En lazo cerrado queda:

$$\frac{R(s)G(s)}{1 + R(s)G(s)} = \frac{(1 + \tau_i s)(1 - Ls)}{\left(\frac{\tau_i T}{K_i K} - \tau_i L\right) s^2 + \left(\frac{\tau_i}{K_i K} + \tau_i - L\right) s + 1} \quad (4.34)$$

El sistema ahora es de segundo orden donde su ecuación característica es:

$$\left(\frac{\tau_i T}{K_i K} - \tau_i L\right) s^2 + \left(\frac{\tau_i}{K_i K} + \tau_i - L\right) s + 1 = 0 \quad (4.35)$$

La ecuación característica del sistema deseado es:

$$T_{cl}^2 s^2 + 2\xi T_{cl} s + 1 = 0 \quad (4.36)$$

Por comparación entre (4.35) y (4.36) se obtienen los parámetros del regulador PI:

$$\left. \begin{aligned} K_i &= \frac{L + 2\xi T_{cl} - \frac{T_{cl}^2}{K}}{T_{cl}^2 + 2\xi T_{cl} L + L^2} \\ \tau_i &= \frac{K_i K (2\xi T_{cl} + L)}{1 + K_i K} \end{aligned} \right\} \text{con } T_{cl} \text{ proporcional a } L \quad (4.37)$$

Donde  $\xi$  es el coeficiente de amortiguamiento y  $T_{cl}$  la inversa de  $\omega_n$ , la frecuencia natural. Del valor de estos coeficientes dependerá el comportamiento del sistema, aunque también hay que tener en cuenta que, al no ser la función de transferencia en lazo cerrado un segundo orden básico, el polinomio del numerador también tendrá su influencia en el comportamiento transitorio, pudiéndose producir sobrepasamientos en la salida aun con  $\xi$  igual a 1. Conforme aumente el valor de  $\xi$  disminuirá la sobreoscilación, por lo que interesara escoger valores de  $\xi$  iguales o superiores a 1 para que no haya sobreoscilación y para que el sobrepasamiento que pueda introducir el polinomio del numerador se compense con el sobreamortiguamiento.

Uno de los objetivos del control automático del tramo es mantener la lámina de agua lo más alta posible para mejorar el mantenimiento del revestimiento, por lo tanto sobrepasamientos en estas condiciones pueden generar desbordamientos.

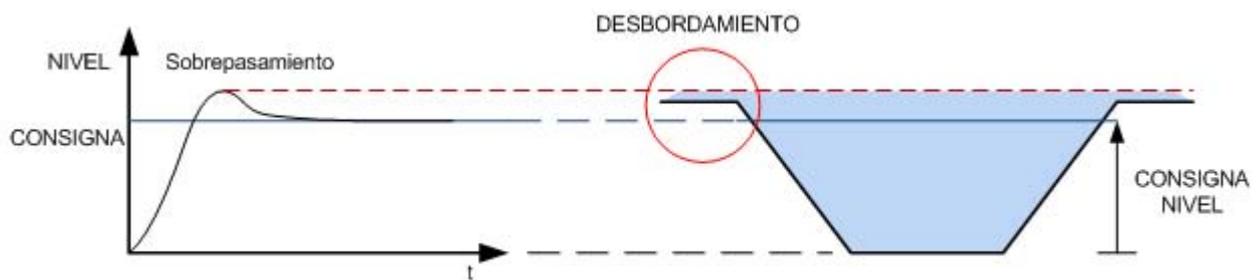


FIGURA 4.3.1-01  
- DESBORDAMIENTO DEL CANAL CUANDO EL SOBREPASAMIENTO ES GRANDE Y LA CONSIGNA DE NIVEL ESTA ALTA.

Sin embargo si la consigna de nivel fuese suficientemente baja o el sobrepasamiento fuese pequeño, el hecho de que existiese sobrepasamiento no implica el rebose.

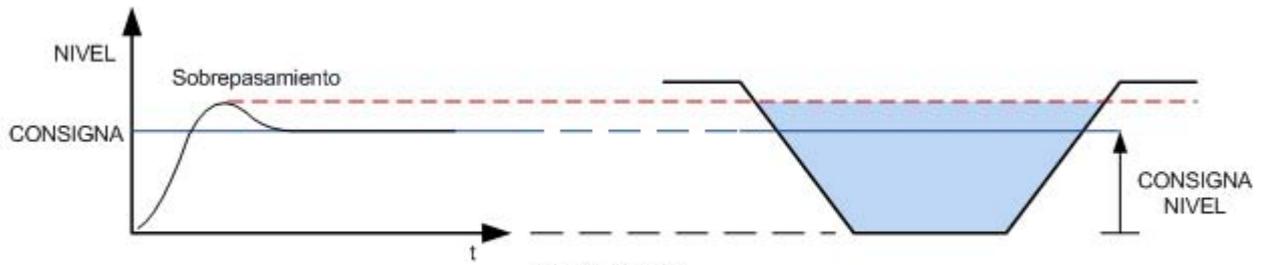


FIGURA 4.3.1-02  
- SOBREPASAMIENTO CON UNA CONSIGNA DE NIVEL NO MUY ALTA. NO SE LLEGA AL REBOSE EN EL CANAL

Conforme aumenta el valor de  $\xi$ , en un sistema sobreamortiguado, aumenta el amortiguamiento y se compensan los posibles sobrepasamientos. Tiene la contrapartida de que el tiempo de respuesta aumenta.

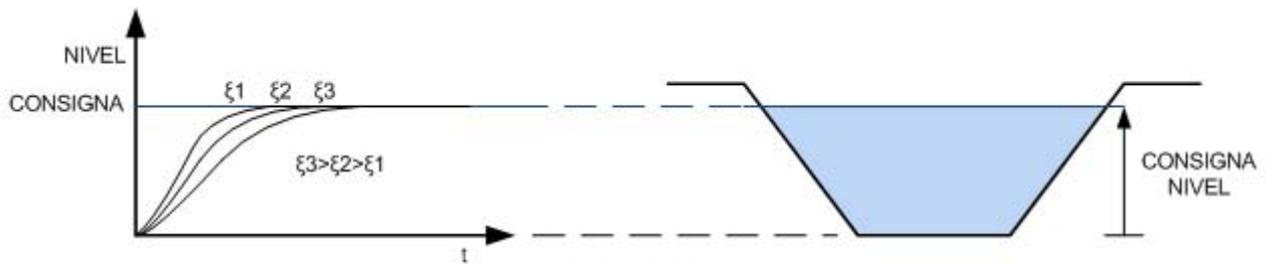


FIGURA 4.3.1-03  
- RESPUESTA DEL SISTEMA SIN SOBRESOSCILACIONES NI SOBREPASAMIENTOS.  
LA CONSIGNA DE NIVEL PUEDE SER ALTA SIN PELIGRO DE REBOSE.

Establecidos los valores  $\xi$  y  $T_{cl}$  del comportamiento dinámico del sistema en lazo cerrado, y utilizando los parámetros obtenidos para el modelo del sistema:

$$K = 0,069, L = 0,6906, T = 1,163$$

Se ha obtenido una tabla con los valores de ajuste del regulador. Se han calculado diferentes parámetros en función de  $\xi$  y  $T_{cl}$ . Conforme aumente  $\xi$  el sobrepasamiento disminuirá. Con un  $T_{cl}$  mayor la respuesta se retrasará. Se especifican los parámetros  $K_P$  y  $K_I$  que son los funcionales en el ajuste del regulador implementado en el PLC.

CONTROL PI SISTEMAS LAG DOMINATED				
Tcl=L				
$\xi$	$K_i$	$\tau_i$	$K_P$	$K_I$
1	-2.537	-0.440	-2.537	5.771
2	-1.209	-0.314	-1.209	3.847
3	-0.545	-0.189	-0.545	2.885
4	-0.146	-0.063	-0.146	2.308
Tcl=2L				
$\xi$	$K_i$	$\tau_i$	$K_P$	$K_I$
1	-5.637	-2.198	-5.637	2.565
2	-3.457	-1.947	-3.457	1.776
3	-2.303	-1.696	-2.303	1.358

## • Control PID

Como se vio en el apartado 4.3 – CONTROL DEL SISTEMA MEDIANTE REGULADOR también se puede controlar el sistema con un regulador PID. El principal inconveniente de este regulador son las grandes acciones iniciales que va a provocar debido a la parte derivativa del mismo. Aun así se considera interesante obtener los parámetros para el control PID.

La función de transferencia de un regulador PID es (4.18). La función de transferencia en lazo abierto queda como en (4.20). Haciendo la constante de tiempo integral del regulador igual a la constante de tiempo del sistema e igualando la constante de tiempo derivativa a  $L/2$  se obtiene:

$$\tau_i = T, \tau_d = L/2 \quad (4.38)$$

$$R(s)G(s) = \frac{K_{pid}K(1-L/2s)}{Ts}$$

La función de transferencia en lazo cerrado será:

$$\frac{R(s)G(s)}{1+R(s)G(s)} = \frac{1-\frac{L}{2}s}{\left(\frac{T}{K_{pid}K}-\frac{L}{2}\right)s+1} \quad (4.39)$$

Por lo tanto la ecuación característica del sistema en lazo cerrado es:

$$\left(\frac{T}{K_{pid}K}-\frac{L}{2}\right)s+1=0 \quad (4.40)$$

$T_{cl}$  es la constante de tiempo del sistema en lazo cerrado deseada, por lo tanto:

$$T_{cl} = \frac{T}{K_{pid}K} - \frac{L}{2} \quad (4.41)$$

De donde se deducen las ecuaciones para ajustar los parámetros del regulador PID:

$$\boxed{\begin{aligned} K_{pid} &= \frac{1}{K} \frac{T}{T_{cl} + L/2} \\ \tau_i &= T \\ \tau_d &= L/2 \end{aligned}} \quad (4.42)$$

Para la implementación del regulador en el PLC se utiliza la siguiente estructura en paralelo del regulador PID:

$$R(s) = KP + \frac{KI}{s} + KDs \tag{4.43}$$

$$KP = K_{pid} \left( 1 + \frac{\tau_d}{\tau_i} \right), \quad KI = \frac{K_{pid}}{\tau_i}, \quad KD = K_{pid} \tau_d$$

Con los parámetros del sistema:

$$K = 0,069, L = 0,6906, T = 1,163$$

La tabla con los valores de ajuste del regulador es la siguiente. Para la elección de Tcl se han seguido los mismos criterios que en los sistemas Delay dominated.

CONTROL PID							
REGULADOR PID	Tcl	Kpid	$\tau_i$	$\tau_d$	KP	KI	KD
ROBUSTO	3T	4.396	1.163	0.345	5.701	3.780	1.518
AGRESIVO	T	11.175	1.163	0.345	14.493	9.609	3.859
$\tau_i = T, \tau_d=L/2$							

### • Simulación Del Control Del Sistema Mediante MATLAB

Una vez calculados los diferentes reguladores es necesaria una simulación del comportamiento del sistema con los mismos. Se ha utilizado para ello el software MATLAB. El paquete MATLAB dispone de una herramienta adicional, Simulink (plataforma de simulación multidominio) que ha sido utilizada para realizar la simulación.

El sistema simulado puede verse en la figura 4.3.1-04. Corresponde al entorno de Simulink donde se ha colocado un regulador PID parametrizable (*PID Controller with Approximate Derivative*), una limitación de acción para simular la saturación de los reguladores (*Saturation*), el sistema calculado con el retardo correspondiente (*Retardo*), una perturbación (*Pert*) y una señal senoidal simulando posibles ruidos en la cadena de realimentación (*Sine Wave*). Los elementos *To Workspace* recogen en formato tabla de datos las señales a las que están conectados. El elemento *Step* es el escalón de consigna. Está configurado para ser un escalón de 0 a 1.

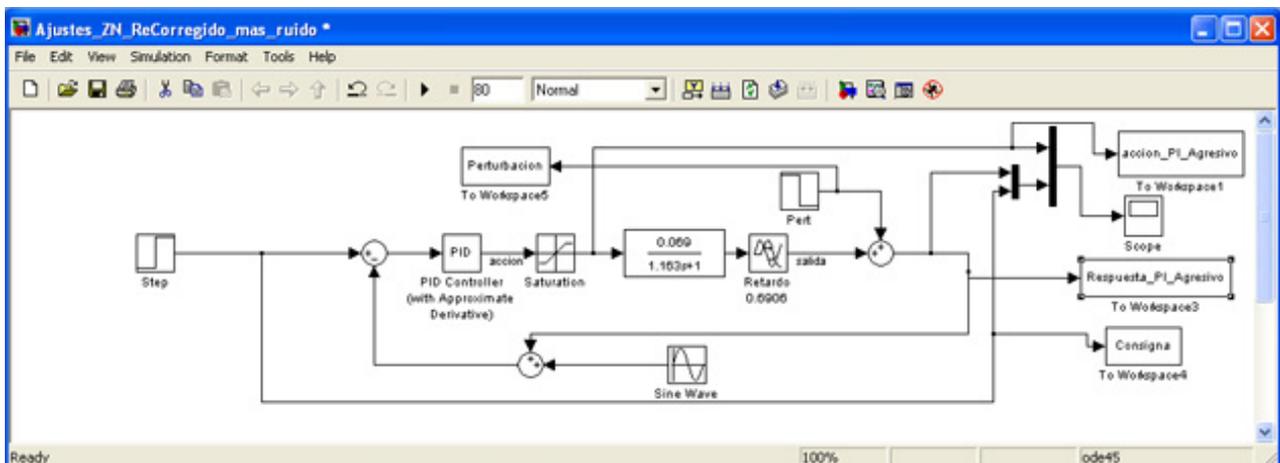


FIGURA 4.3.1-04  
- SIMULACIÓN DE LA REGULACIÓN DEL SISTEMA EN SIMULINK MATLAB.

Una vez construido el lazo de regulación se han simulado los ajustes de PI y PID Lambda calculados anteriormente, según las tablas de CONTROL PI SISTEMAS DELAY DOMINATED, CONTROL PI SISTEMAS LAG DOMINATED y CONTROL PID que se muestran a continuación:

CONTROL PI SISTEMAS DELAY DOMINATED							
REGULADOR PI	Tcl	Ki	$\tau_i$	KP	KI		
ROBUSTO	3T	4.033	1.163	4.033	3.467		
AGRESIVO	T	9.093	1.163	9.093	7.819		
Ti = AL MAYOR (T,3L)							
CONTROL PI SISTEMAS LAG DOMINATED							
Tcl=L							
$\xi$		Ki	$\tau_i$	KP	KI		
1		-2.537	-0.440	-2.537	5.771		
2		-1.209	-0.314	-1.209	3.847		
3		-0.545	-0.189	-0.545	2.885		
4		-0.146	-0.063	-0.146	2.308		
Tcl=2L							
$\xi$		Ki	$\tau_i$	KP	KI		
1		-5.637	-2.198	-5.637	2.565		
2		-3.457	-1.947	-3.457	1.776		
3		-2.303	-1.696	-2.303	1.358		
CONTROL PID							
REGULADOR PID	Tcl	Kpid	$\tau_i$	$\tau_d$	KP	KI	KD
ROBUSTO	3T	4.396	1.163	0.345	5.701	3.780	1.518
AGRESIVO	T	11.175	1.163	0.345	14.493	9.609	3.859
$\tau_i = T, \tau_d = L/2$							

Se han simulado:

- Regulador PI robusto para sistemas Delay Dominated -> KP = 4.033, KI = 3.467, KD = 0
- Regulador PI agresivo para sistemas Delay Dominated -> KP = 9.093, KI = 7.819, KD = 0
- Regulador PI para sistemas Lag Dominated con Tcl = L y  $\xi = 4$  -> KP = -0.146, KI = 2.308, KD = 0
- Regulador PID robusto -> KP = 5.701, KI = 3.780, KD = 1.518
- Regulador PID agresivo -> KP = 14.493, KI = 9.609, KD = 3.859

En la figura 4.3.1-05, la gráfica superior es la respuesta del sistema controlado con los diferentes reguladores cuando la consigna cambia de 0 a 1. Como puede observarse en el instante de tiempo  $t = 40$  aparece una perturbación en la altura final debida a una pérdida de caudal en algún punto intermedio del tramo. A priori puede parecer que la respuesta del sistema con el regulador PID agresivo sea la mejor. Sin embargo, si se observa la segunda gráfica, que muestra las acciones de los reguladores, se pueden ver que las acciones de los reguladores PID son muy elevadas. Por lo tanto los reguladores PID no son recomendados. En cuanto a los reguladores PI el que mejor responde frente a la perturbación es el PI agresivo. También es el que mejor tiempo de respuesta tiene. Por lo tanto se recomienda ajustar el regulador con los parámetros correspondientes al regulador PI agresivo para sistemas Delay Dominated:

**- Regulador PI agresivo para sistemas Delay Dominated -> KP = 9.093, KI = 7.819, KD = 0**

Los resultados de las simulaciones pueden verse en las siguientes gráficas:

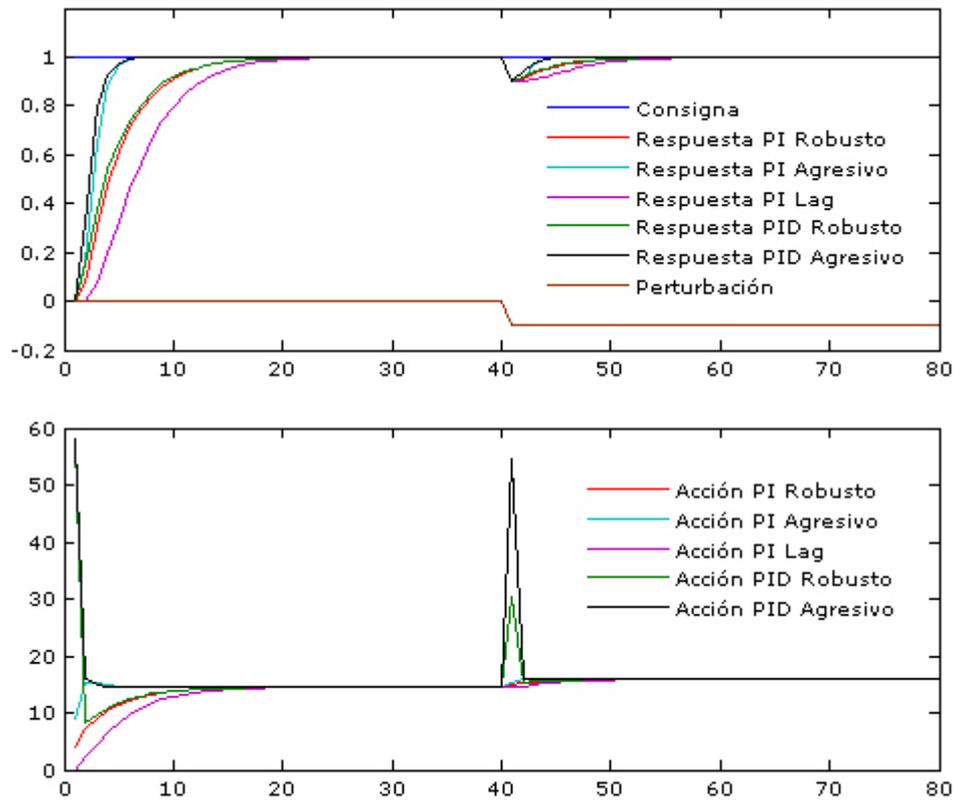


FIGURA 4.3.1-05  
- COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DEL SISTEMA CON LOS DIFERENTES AJUSTES  
DEL REGULADOR (ARRIBA) Y LAS ACCIONES DE LOS MISMOS (ABAJO).

### 4.3.2 – OTROS CONTROLES ALTERNATIVOS

#### • Internal Model Control (IMC)

El nombre de *Internal Model Control* hace referencia a una estructura de control que tiene internamente un modelo del sistema a controlar. Este modelo se conecta en paralelo con el sistema.

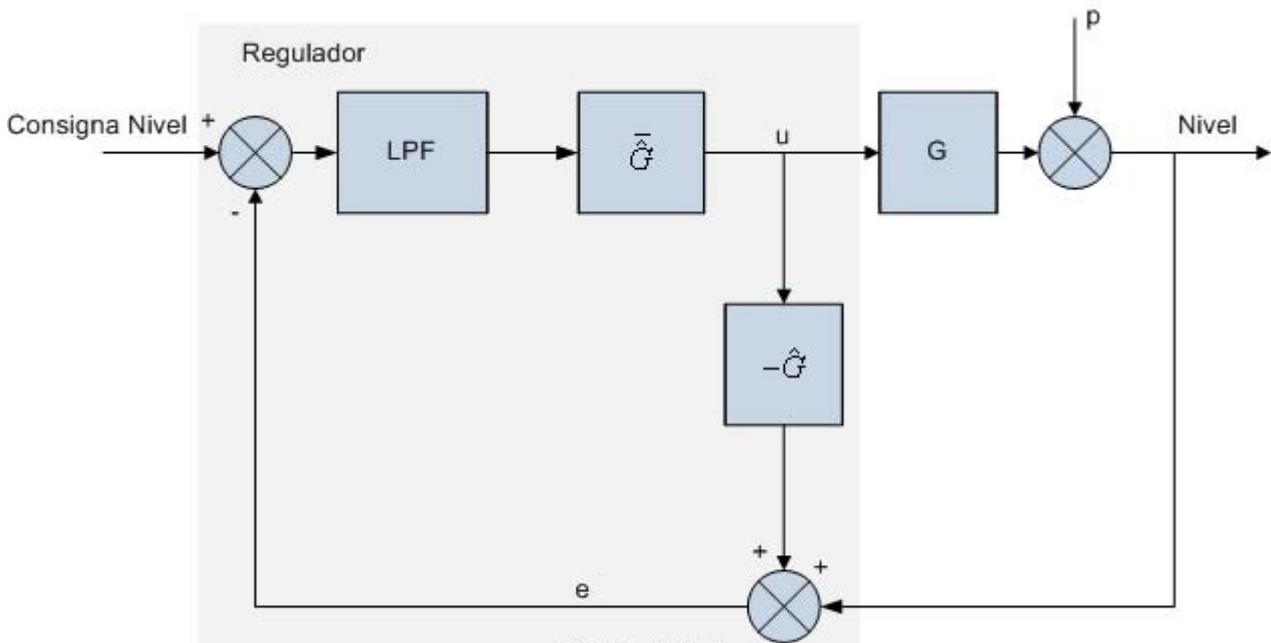


FIGURA 4.3.2-01  
- DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN REGULADOR IMC Y SISTEMA CONTROLADO CON EL MISMO.

En el diagrama de bloques  $G$  es el sistema a controlar,  $\hat{G}$  es una inversa aproximada del sistema a controlar,  $\hat{G}$  es una aproximación al sistema, las perturbaciones se representan por  $p$ , y LPF es un filtro paso bajo, cuya función es hacer menos sensible al controlador frente a errores en el modelado del sistema. En el diagrama  $e = u(G - \hat{G}) + p$ , por lo que cuando el modelo del sistema sea perfecto ( $G = \hat{G}$ ) y ante ausencia de perturbaciones ( $p=0$ ) se obtiene que  $e=0$ . De ahí que se elija  $\hat{G}$  como la inversa aproximada del sistema, ya que cuando esta inversa sea exacta la salida sería  $LPF * \hat{G} * G = LPF$ . Es decir, LPF representa el modelo del sistema deseado en lazo cerrado. Una elección común es  $LPF = 1/(1+sT_f)$ , donde  $T_f$  es un parámetro a tener en cuenta en el diseño.

El esquema de control IMC se puede representar también mediante el siguiente diagrama de bloques equivalente:

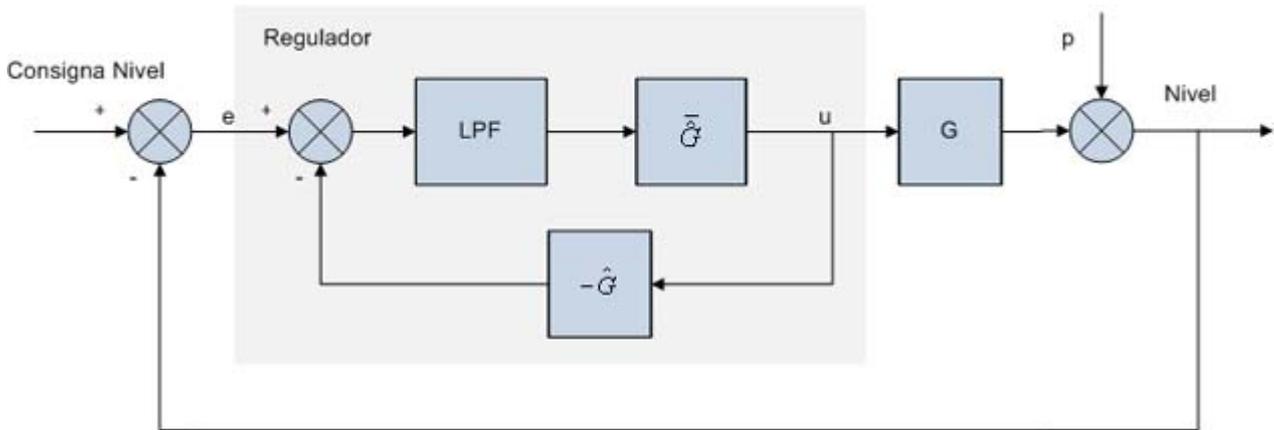


FIGURA 4.3.2-02  
- DIAGRAMA DE BLOQUES EQUIVALENTE DE UN REGULADOR IMC.

En este diagrama de bloques se puede observar el bloque equivalente al regulador de una estructura clásica de control. La función de transferencia de este regulador equivalente queda:

$$R = \frac{LPF \bar{G}}{1 - LPF \bar{G} G} \quad (4.44)$$

Partiendo del sistema a controlar que es del tipo (4.1), primer orden con retardo, la inversa aproximada será:

$$\bar{G}(s) = \frac{1 + Ts}{K} \quad (4.45)$$

Por lo tanto, con la elección del filtro anteriormente comentada y la aproximación de Taylor para  $e^{-Ls} \approx (1 - Ls)$ , la función de transferencia del regulador queda:

$$R(s) = \frac{\frac{1}{1 + sT_f} \frac{1 + Ts}{K}}{1 - \frac{1}{1 + sT_f} \frac{1 + sT}{K} (1 - Ls)} = \frac{1 + Ts}{K(T_f + L)s} \quad (4.46)$$

Se observa que la expresión anterior corresponde a la estructura de un regulador PI:  $R(s) = K_i \left( \frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s} \right)$ . Las reglas de ajuste de parámetros de este regulador son las siguientes:

$$\boxed{\begin{aligned} K_i &= \frac{1}{K} \frac{T}{L + T_f} \\ \tau_i &= T \end{aligned}} \quad (4.47)$$

Se puede observar que estos parámetros coinciden con los (4.31), obtenidos con el método de Lambda Tuning para el caso de un PI, haciendo  $T_{cl} = T_f$ .

Una característica del IMC es su robustez, la cual está considerada en el diseño. La robustez del regulador se puede ajustar mediante el Filtro paso bajo, es decir, mediante el parámetro  $T_f$

Con los parámetros del sistema:

$$K = 0,069, L = 0,6906, T = 1,163$$

La tabla con los valores de ajuste del regulador es la siguiente. Se especifican los parámetros  $K_P$  y  $K_I$  que son los funcionales en el ajuste del regulador (4.32) implementado en el PLC.

CONTROL PI. METODO INTERNAL MODEL CONTROL (IMC)					
$T_f$	Valor $T_f$	$K_i$	$\tau_i$	$K_P$	$K_I$
T	1.163	9.093	1.163	9.093	7.819
1.5T	1.745	6.922	1.163	6.922	5.952
2T	2.326	5.587	1.163	5.587	4.804
3T	3.489	4.033	1.163	4.033	3.467

En la siguiente gráfica de la simulación del sistema regulado con un PI con ajuste IMC se puede ver como al aumentar  $T_f$  el sistema se hace más robusto.

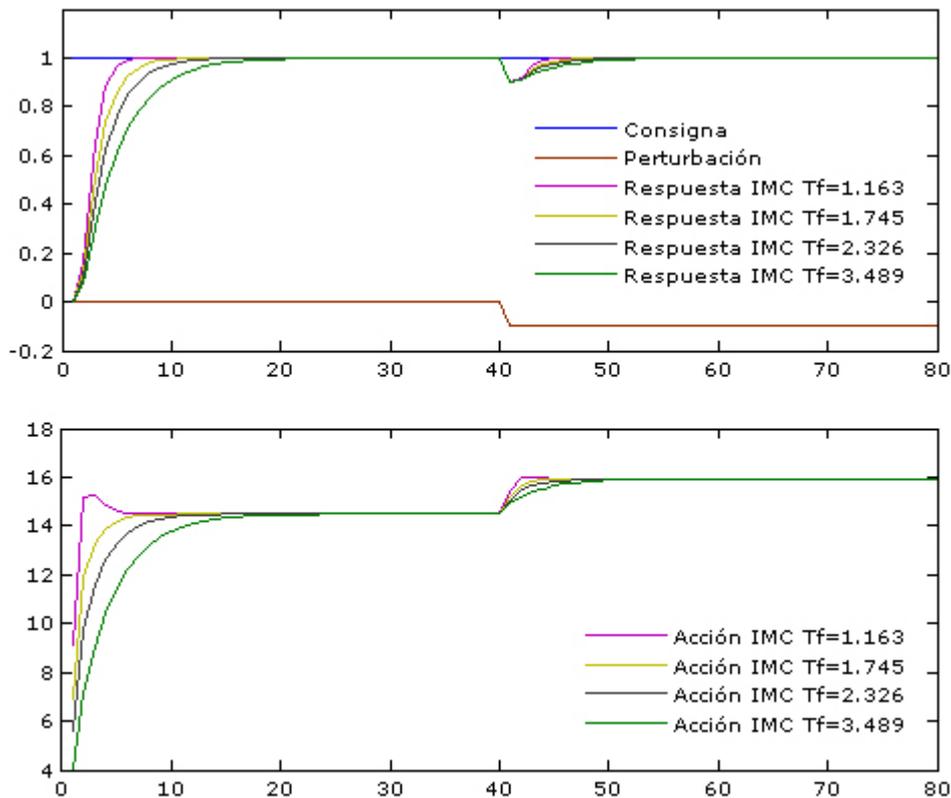


FIGURA 4.3.2-03  
- COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DEL SISTEMA CON LOS DIFERENTES AJUSTES CALCULADOS DEL REGULADOR IMC.

El mejor de los ajustes, en cuanto a respuesta a la perturbación, es con un  $T_f = 1.163$ . Con valores mayores de  $T_f$  el sistema es más robusto pero tiene una respuesta a la perturbación

más pobre. Por lo tanto se recomienda ajustar el regulador con los parámetros correspondientes al regulador PI en método IMC con un  $T_f = T = 1.163$ :

**- Regulador PI IMC -> KP = 9.093, KI = 7.819, KD = 0**

• **Skogestad's Internal Model Control (SIMC)**

Se trata de una variación del método IMC desarrollada por Skogestad. Esta orientado a sistemas de primer orden con retardo a regular con un PI. Se requiere que el sistema en lazo cerrado tenga la siguiente función de transferencia:

$$G_{SIMC}(s) = \frac{1}{1 + sT_{cl}} e^{-Ls} \tag{4.48}$$

De aquí se deduce la función de transferencia del regulador, usando la aproximación de Taylor para aproximar la exponencial:

$$R(s) = \frac{1 + sT}{K(1 + sT_{cl} - e^{-sL})} \approx \frac{1 + sT}{sK(T_{cl} + L)} \tag{4.49}$$

Se recomienda ajustar el valor de T<sub>cl</sub> a L, por lo que el ajuste para el regulador PI queda:

$$\boxed{\begin{matrix} K_i = \frac{T}{2KL} \\ \tau_i = \min(T, 8L) \end{matrix}} \tag{4.50}$$

Skogestad propone elegir la constante de tiempo integral al menor de los valores de T u ocho veces L, de forma que el método sea también válido para los sistemas *Lag Dominated* (T>8L) y se evite en estos sistemas la cancelación del polo, pues ocasionaría respuestas muy pobres a las perturbaciones.

Con los parámetros del sistema:

$$K = 0,069, L = 0,6906, T = 1,163$$

La tabla con los valores de ajuste del regulador es la siguiente. Se especifican los parámetros KP y KI que son los funcionales en el ajuste del regulador implementado en el PLC.

CONTROL PI. METODO SKOGESTAD'S INTERNAL MODEL CONTROL (SIMC)					
		Ki	τi	KP	KI
Ti=min(T,8L)	1.163	12.203	1.163	12.203	10.493

El resultado es idéntico al ajuste IMC con  $T_f = L$ . Los resultados de la tabla también se pueden obtener a partir de (4.31) con T<sub>cl</sub> = L. Como L < T el control se considera demasiado

agresivo. En la siguiente gráfica se puede ver la respuesta del sistema controlado ante una entrada en escalón.

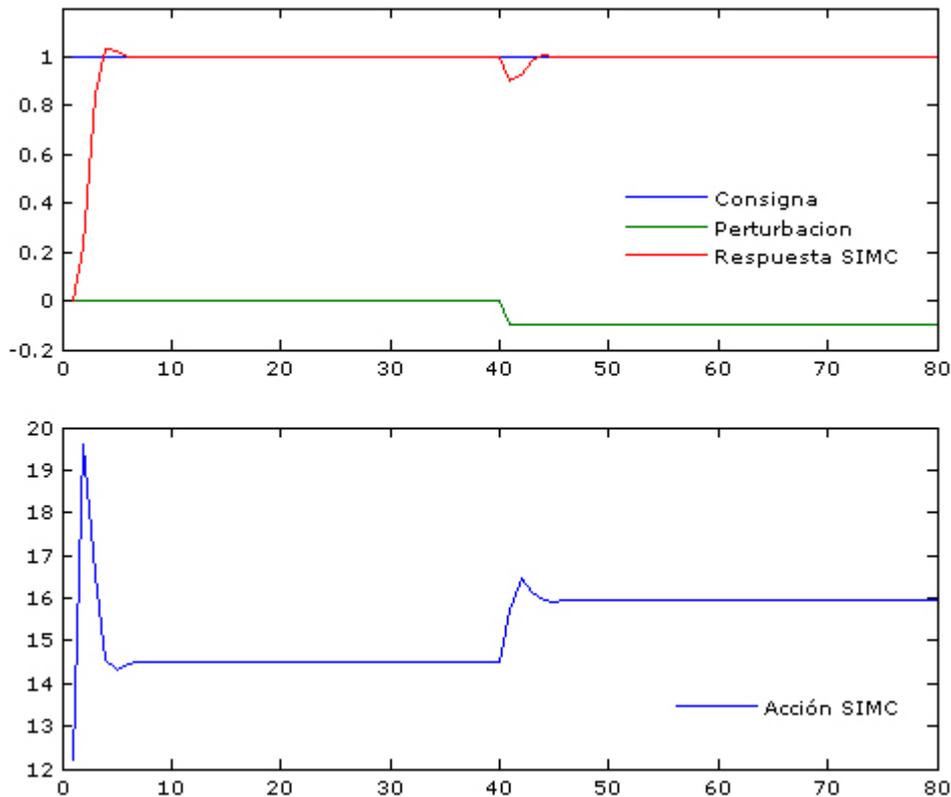


FIGURA 4.3.2-04  
- MAPA DE AJUSTE DEL REGULADOR.

### 4.3.3 - AJUSTE FINAL DE LOS PARÁMETROS DEL REGULADOR.

Los métodos anteriores pueden dar valores que no se ajusten exactamente al comportamiento deseado del sistema regulado. Por ello se hace necesario complementar los métodos mediante un ajuste manual o ajuste fino. El ajuste fino se puede realizar mediante pruebas ensayo-error, bien directamente sobre el sistema real, bien empleando simulación. Se prueba el sistema en lazo cerrado introduciendo un cambio en la consigna y se observa entonces la respuesta del sistema cuando los parámetros del regulador son ajustados. Los ajustes se basan en unas simples normas fruto de la experiencia empírica:

- Al aumentar la ganancia proporcional disminuye el tiempo de respuesta a la consigna, aumentando la sobreoscilación.
- Si se reduce el tiempo de integración (aumenta KI) el error decae más rápidamente y mejora la respuesta a la perturbación. Sin embargo el sistema corre el riesgo de inestabilizarse.

Sin embargo hay que tener en cuenta que estas reglas son generales y pueden no cumplirse en casos particulares (como ocurre en el ajuste del parámetro KP mostrado más abajo). Una forma de evitar falsas intuiciones es expresar las reglas de ajuste particularizadas a un sistema concreto mediante la utilización de mapas de ajuste o *Tuning Maps*. El propósito de

estos mapas es mostrar, de una forma intuitiva, cómo afectan los cambios introducidos en los parámetros del regulador al comportamiento del sistema en lazo cerrado. Estos mapas consisten en matrices de gráficas que muestran la respuesta del sistema frente a variaciones en los parámetros del regulador.

Las gráficas se ordenan de forma que en cada una de ellas solo cambia un parámetro respecto de la anterior. En las filas se va mostrando la respuesta frente a cambios de la constante integral y en las columnas la respuesta frente a cambios en la constante proporcional del regulador. El siguiente mapa obedece al ajuste del regulador PI para controlar el sistema Tramo de la Infraestructura Hidráulica a partir de los parámetros calculados para un PI agresivo mediante el método Lambda tuning, ver apartado 4.3.1 – CONTROL MEDIANTE LAMBDA TUNING.

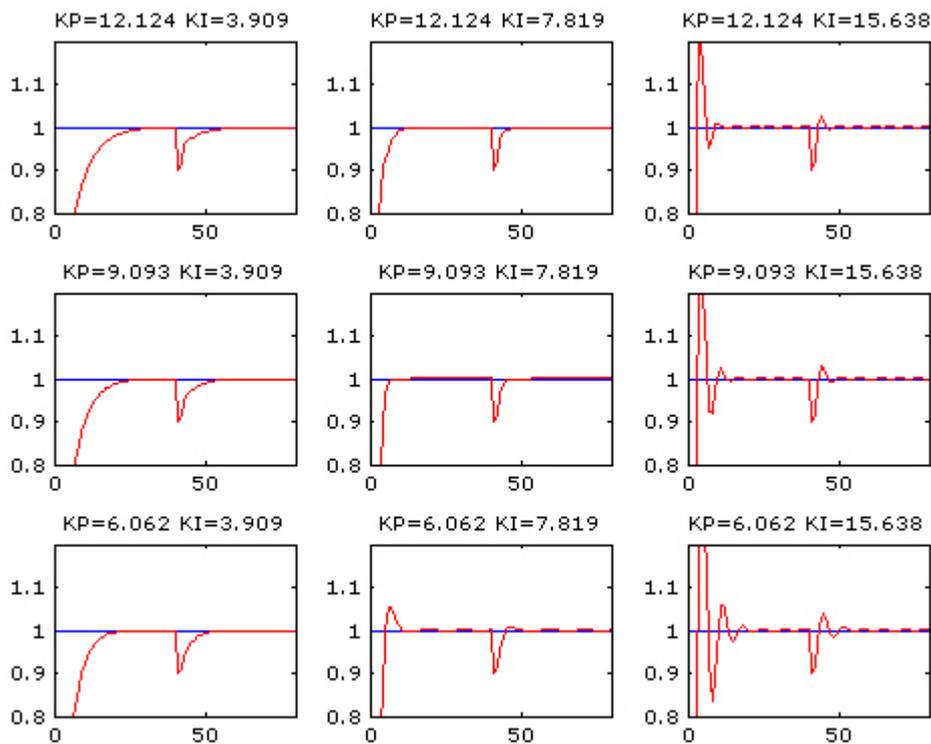


FIGURA 4.3.3-01  
 - MAPA DE AJUSTE DEL REGULADOR.

Con el mapa de ajuste se observa que la respuesta temporal a la perturbación y la consigna se hace más rápida al aumentar la constante integral pero esto provoca sobreoscilaciones. Por otro lado si la constante proporcional aumenta disminuyen las sobreoscilaciones (ejemplo de comportamiento que no sigue las reglas mostradas). Por lo tanto, partiendo de los parámetros del PI agresivo ( $KP = 9.093$ ,  $KI = 7.819$ ) si se aumenta  $KI$  la respuesta se hace más rápida y mejora sobretodo en la perturbación, algo que interesa en particular, sin embargo aparece un pequeño sobrepasamiento cuyo efecto se puede reducir aumentando la constante proporcional. De esta forma aplicando pequeñas variaciones progresivas de los parámetros, según el mapa, en diferentes ensayos, se obtiene un nuevo ajuste fino empírico tal que:

**Regulador PI agresivo con ajuste fino empírico ->  $KP = 10.5$ ,  $KI = 8.778$**

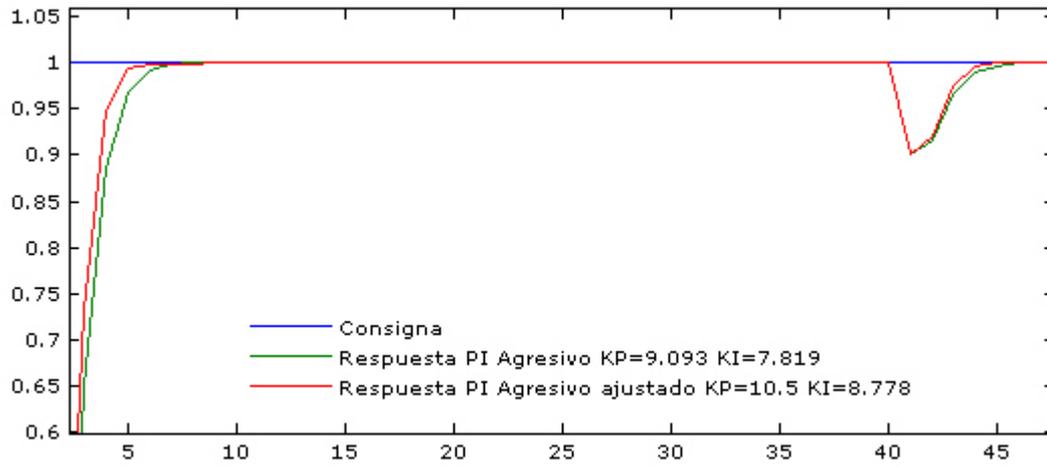


FIGURA 4.3.3-02  
- COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DEL SISTEMA CON AJUSTES DEL REGULADOR MEDIANTE LAMBDA TUNING Y REAJUSTE FINO DEL MISMO SIGUIENDO LA METODOLOGÍA DE AJUSTE FINO.

Comparando este nuevo regulador con el original obtenido por el método Lambda Tuning se puede ver la mejora del sistema frente a la consigna y la perturbación. Se recomienda este ajuste para el regulador.



## CAPITULO 5 - SISTEMA DE COMUNICACIONES

En un sistema de automatización y control, una comunicación fiable y robusta entre los diferentes elementos que lo componen es de vital importancia.

En los últimos años, el avance en tecnologías inalámbricas de comunicaciones ha sido importantísimo, y en la actualidad disponemos de tecnologías inalámbricas potentes, robustas y de rápida instalación que hace que la interconexión entre diferentes equipos tenga un bajo coste y una elevada fiabilidad.

### • Redes inalámbricas de comunicaciones

Las redes inalámbricas (Wireless Network) son aquellas que se comunican por un medio de transmisión no guiado (sin cables) mediante ondas electromagnéticas.

Las redes inalámbricas tienen como ventajas la rápida instalación de la red sin la necesidad de usar cableado, permitir la movilidad, y generar menos costes de mantenimiento que una red convencional.

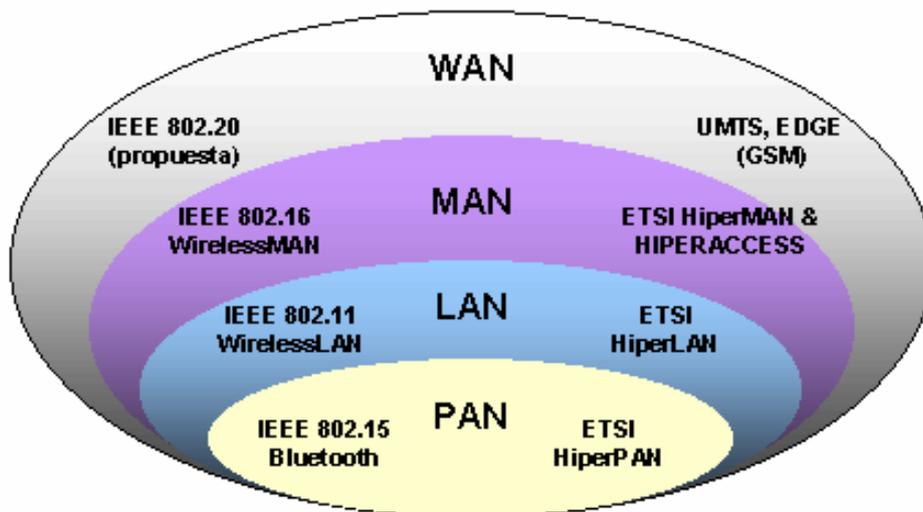


FIGURA 5-01  
- CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES REDES INALÁMBRICAS SEGÚN SU LONGITUD DE ALCANCE.

Dependiendo de su alcance podemos clasificarlas en los siguientes grupos.



FIGURA 5-02  
- LOGOTIPO GSM (Groupe Spécial Mobile).

### W-WAN (WIRELESS WIDE AREA NETWORK)

Redes móviles Celulares. Están ligadas a la Telefonía Móvil (GSM, GPRS). Permiten la comunicación desde cualquier punto geográfico siempre que haya cobertura y el usuario disponga de línea.

### W-MAN (WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK)

Se trata de una especificación para las redes de acceso metropolitanas sin hilos de banda ancha publicada en abril de 2002.

Habilitan la comunicación en un área geográfica extensa pero delimitada (menos de 70 Km). Engloba el estándar IEEE 802.16



FIGURA 5-03 - LOGOTIPO WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

### W-LAN (WIRELESS LOCAL AREA NETWORK)



FIGURA 5-04 - LOGOTIPO WIFI (Wireless Fidelity).

Engloba el estándar IEEE 802.11. La familia 802.11 actualmente incluye seis técnicas de transmisión por modulación que utilizan los mismos protocolos. El estándar original de este protocolo data de 1997, era el IEEE 802.11. Tenía velocidades de hasta 2 Mbps y trabajaba en la banda de frecuencia de 2,4 GHz.

La siguiente modificación apareció en 1999 y es designada como IEEE 802.11b, esta especificación tenía velocidades de 5 hasta 11 Mbps, también trabajaba en la frecuencia de 2,4 GHz. También se realizó una especificación sobre una frecuencia de 5 GHz que alcanzaba los 54 Mbps, era la 802.11a y resultaba incompatible con los productos de la b y por motivos técnicos casi no se desarrollaron productos. Posteriormente se incorporó un estándar a esa velocidad y compatible con el b que recibiría el nombre de 802.11g.

En la actualidad la mayoría de productos son de la especificación b y de la g. El siguiente paso se dará con la norma 802.11n que sube el límite teórico hasta los 600 Mbps. Actualmente ya existen varios productos que cumplen un primer borrador del estándar 802.11n con un máximo de 300 Mbps.

### W-PAN (WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK)

Las tecnologías inalámbricas basadas en la familia de estándares IEEE 802.15 (bluetooth, zigbee, etc) proporcionan, por un bajo costo y una baja potencia, un enlace radio de corto alcance para dispositivos móviles. De esta manera permite establecer conexiones de tiempo real de voz y datos mediante la banda libre de 2,400-2,483 GHz, alcanzando tasas de transferencia de hasta 1 Mbps.



FIGURA 5-05- LOGOTIPO BLUETOOTH.

Destacar que el estándar IEEE 802.16 (estándar usado por los equipos WIMAX) perteneciente a la categoría W-MAN (Wireless Metropolitan Area Network) es el que mejor se adapta a nuestras necesidades. Este estándar con capacidad para banda ancha es capaz de abarcar distancias de hasta 70 Km, a continuación pasamos a describirlo más detalladamente.

## 5.1.- RED INALAMBRICA DE COMUNICACIONES WIMAX

Para realizar la comunicación inalámbrica entre los diferentes puntos de control se ha elegido la tecnología WIMAX. Las características de los equipos de comunicaciones empleados han sido expuestas en los apartados 3.1 y 3.4.

WIMAX es una nueva tecnología muy adecuada para establecer radioenlaces en zonas rurales y de difícil acceso a las que no llegan las redes cableadas, dado su gran alcance y alta velocidad de transmisión, a un coste muy competitivo frente a otras alternativas.

WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es una marca comercial del WIMAXForum, cuyo objetivo fundamental es garantizar la interoperabilidad entre equipos de acceso inalámbrico de banda ancha. Ofrece total cobertura en áreas de hasta 70 kilómetros, con antenas direccionales de alta ganancia, y ofrece velocidades de transmisión de hasta 70Mbps con línea de visión directa.

Es conveniente, antes que nada, diferenciar entre una serie de términos que pueden llevar a confusión. Por una parte, no debemos confundir el estándar IEEE 802.16 con WIMAX, al igual que también hemos de diferenciar las entidades IEEE y WIMAXForum.

El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) es una organización técnico-profesional dedicada a la estandarización, entre otras cosas. Constituida principalmente por expertos que desarrollan y publican numerosos estándares mediante la creación de diferentes grupos de trabajo, como el IEEE 802.16, destinado al Acceso Inalámbrico de Banda Ancha para Redes Metropolitanas.

EL WIMAX Forum es una organización internacional sin ánimo de lucro, constituida por empresas del sector de las telecomunicaciones inalámbricas, y cuyo objetivo común es certificar la compatibilidad, y la interoperabilidad de productos de acceso inalámbrico de banda ancha para redes metropolitanas, específicamente, para aquellos descritos bajo la familia de estándares IEEE 802.16.

Así pues, las actividades del WIMAXForum pueden considerarse como una extensión de las del grupo de trabajo IEEE 802.16 para desarrollar y certificar la interoperabilidad entre fabricantes de equipos WIMAX.

Y por ultimo, destacar que el estándar IEEE 802.16 es un estándar publicado por el IEEE destinado al Acceso Inalámbrico de Banda Ancha para Redes Metropolitanas, y WIMAX es una marca comercial descrita por el WIMAXForum que englobaría los equipos que funcionan bajo el estándar IEEE 802.16.

### • Características principales

Entre las características más importantes de la tecnología WIMAX se pueden mencionar las siguientes:

- Utiliza modulación OFDM (Orthogonal División Multiplexing) que permite la transmisión en distintas frecuencias simultáneamente. Utiliza espaciamiento ortogonal con lo que se puede garantizar que no exista interferencia entre estas.

- Soporta antenas inteligentes las cuales mejoran la eficiencia espectral en sistemas inalámbricos.
- Soporta enlaces tipo Punto a Punto, Multipunto y redes malla.
- Presenta una calidad de servicio (QoS) para los operadores NLOS (sin línea de visión) tal que la señal no se distorsiona por la existencia de edificios ni otras posibles causas de interferencia.



FIGURA 5.1-01  
- DIFERENTES APLICACIONES DE LA TECNOLOGIA WIMAX.

- Soporta las multiplexaciones TDM (Time division multiplexing) y FDM (Frequency division multiplexing), que permiten la interoperabilidad entre los sistemas celulares y los inalámbricos.
- Presenta técnicas de modulación adaptativa que permiten ajustar el esquema de modulación de la señal dependiendo de las condiciones de la señal de ruido (SNR) que existen en el enlace. Cuando el enlace presenta una alta calidad, se usa la modulación más alta, dando el sistema la mayor capacidad. Y durante un desvanecimiento de la señal, el sistema puede desplazar a la señal a un esquema de modulación menor para mantener la calidad y estabilidad del enlace.
- El estándar posee medidas de seguridad que incluyen mecanismos de criptografía.
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión.
- Es capaz de transmitir servicios de voz, datos y video.

## • Estándares IEEE 802.16

A continuación pasamos a describir todas las variantes de la familia IEEE 802.16.

### ESTÁNDAR 802.16

Estándar publicado en 2002. Esta versión de WIMAX fue diseñada para conexiones punto a punto sin movilidad. Utilizando un espectro licenciado en el rango de 10 a 66 GHz. Es necesaria la línea de vista directa (LOS), y utilizaba técnicas de multiplexación ortogonal por división de frecuencia (OFDM). Soporta calidad de servicio (QoS, Quality of Service).

### ESTÁNDAR 802.16A

La actualización de 802.16a, completada 2003, consideró el rango del espectro de frecuencia de 2 a 11 GHz. Utiliza rangos de frecuencia tanto licenciados como no licenciados, además incorpora la capacidad sin línea de visión directa (NLOS) y características de calidad de servicio (QoS, Quality of Service). Se incorporó un soporte para FDD y TDD. Soporta diversos protocolos como Ethernet e IP y fue diseñado principalmente para conexiones fijas de última milla, punto a punto y punto multipunto.

### ESTÁNDAR 802.16C

Ampliación del 802.16 para definir las características y especificaciones en la banda 10-66GHz, fue publicado en 2003

### ESTÁNDAR 802.16D

Pensado para acceso fijo, este estándar es el reemplazo del estándar IEEE 802.16a. Teóricamente puede transmitir hasta un rango de datos de 70Mbps en condiciones ideales, aunque el rendimiento real podría no es superior a 40Mbps.

### ESTÁNDAR 802.16E

Extensión del 802.16D que incluye un soporte para banda ancha móvil.

## • Multiplexacion OFDM

OFDM es una técnica basada en la multiplexación por división en frecuencia (FDM), pero el hecho de que cada subportadora sea ortogonal al resto permite que el espectro de cada una estén solapadas y no exista interferencia, aumentando la eficiencia del uso del espectro debido a que no se introducen bandas de separación entre las subportadoras.

Un avance que ayudó al desarrollo del protocolo IEEE 802.16, fue la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing). La modulación OFDM presenta muchos beneficios que no presentan otras modulaciones previas a esta, y permite que las redes inalámbricas transmitan eficientemente con anchos de banda reducidos.

OFDM es una técnica de comunicación que divide un canal, de frecuencia, en un número determinado de bandas de frecuencias equidistantes, en cada banda se transmite un subportadora que transporta una porción de la información. Cada subportadora es ortogonal al resto, dándole el nombre a esta técnica de multiplexación por división de frecuencia.

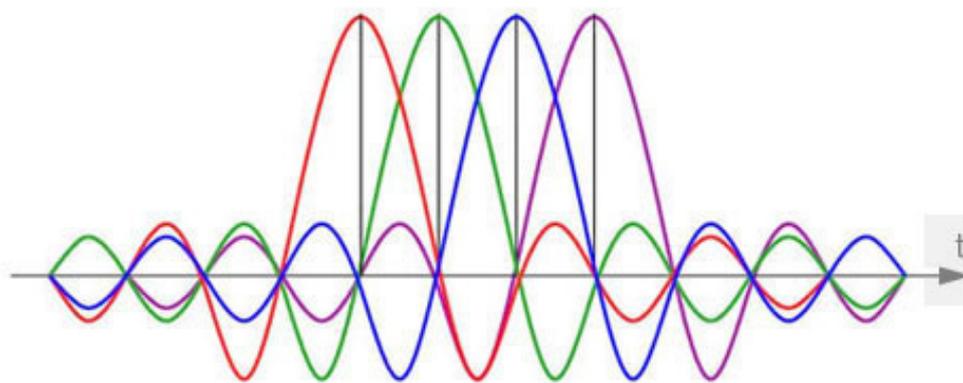


FIGURA 5.1-02  
- PORTADORAS ORTOGONALES SUPERPONIENDO SUS ESPECTOS SIN INTERFERENCIAS.

El hecho de que cada subportadora sea ortogonal al resto permite que el espectro de cada una pueda estar superpuesto al espectro de las demás, y no exista interferencia, aumentando la eficiencia del uso del espectro debido a que no se utilizan bandas de separación entre subportadoras.

### • Esquemas de modulación soportados por WIMAX

- BPSK (BiPhase Shift Keying)

Es una forma de desplazamiento de fase que permite cuatro grados posibles de los desplazamientos de fase de 0, 90, 180, 270 grados. Es el método menos eficiente, se emplea cuando los puntos a comunicar se encuentran a una distancia elevada. Requiere mayor potencia de transmisión.

- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

Es una forma de modulación en la que la señal se envía en cuatro fases, 45, 135, 225, y 315 grados. Una de sus principales ventajas es que ofrece la misma eficiencia de potencia, utilizando la mitad de ancho de banda.

- 16-QAM.- (16 Quadrature Amplitude Modulation)

Es una modulación digital en la que se tienen 4 fases y 4 amplitudes, de esta manera es como se obtienen 16 símbolos.

- 64-QAM.- (64 Quadrature Amplitude Modulation)

Al igual que la 16-QAM, esta es una modulación digital en la que se tienen 4 fases y en este caso 16 amplitudes. De esta manera es como se obtienen 64 símbolos. Se emplea para distancia cortas y requiere poca potencia.

### 5.1.1.- ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LOS RADIOENLACES

Para evaluar la viabilidad de los enlaces propuestos se han realizado unos cálculos para determinar la distancia máxima a la que es viable el radioenlace y a continuación una simulación con la herramienta de planificación radioeléctrica (Radio Mobile).

Partimos de las siguientes condiciones iniciales:

- Los radioenlaces a realizar se plantean en la banda de los 5,4 GHz (banda libre), utilizando una canalización de 20 MHz.

- El equipamiento estará basado en tecnología WiMAX, las características que deberán poseer los equipos evaluados son la multiplexación OFDM y la modulación adaptativa, es decir, la capacidad del enlace variará en función de la potencia en el receptor.

• **Cálculo de la distancia máxima teórica de transmisión en el espacio libre**

Lo primero, destacar que la Norma UN-128 perteneciente al CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias) 2007 impone una limitación en la banda 5470-5725 MHz que pasamos a señalar a continuación:

- La Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) será inferior o igual a 1W (30dBm). Este valor se refiere a la potencia promediada sobre una ráfaga de transmisión ajustada a la máxima potencia.

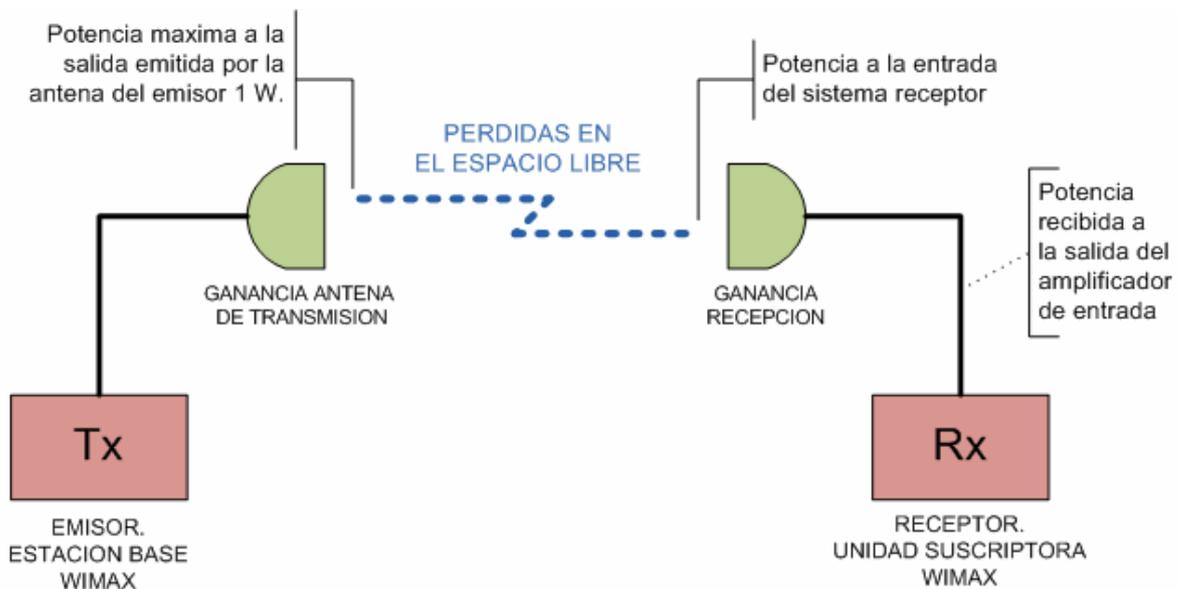


FIGURA 5.1.1-01  
- MODELO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES.

Tal como se ha indicado en el capítulo 3 en este proyecto se van a utilizar los equipos Wimax BreezeNET B100 de Alvarion para la comunicación inalámbrica. Para realizar los cálculos de atenuación partimos de las siguientes condiciones iniciales extraídas de las hojas de características de esos equipos, ver Anexo A. Documentación.

En transmisión,

- Potencia transmitida será 30 dBm (máximo permitido por norma UN-128).

En el enlace:

- Frecuencia de trabajo: 5,470 GHz

En recepción

- Ganancia de la antena receptora: 24 dBi
- Potencia recibida en la entrada del sistema receptor: -89 dBm, escogemos este valor para calcular la máxima atenuación posible, o sea, en las peores condiciones posibles.

$$\begin{aligned}
 P_R(dBm) &= P_T(dBm) + G_R(dB) - L_B(dB) \Rightarrow \\
 -89dBm &= 30dBm + 24dBi - L_B(dB) \Rightarrow \\
 L_B(dB) &= 143dB
 \end{aligned}$$

Donde:

$P_R$  (dBm): Potencia recibida en la entrada del sistema receptor.

$P_T$  (dBm): Potencia entregada a la salida por el sistema transmisor.

$G_R$  (dBi): Ganancia de la antena receptora.

$L_B$  (dB): Pérdidas de propagación en el espacio libre.

$$L_B (dB) = 20 \cdot \log \frac{4\pi}{3 \cdot 10^8} + 20 \cdot \log(D_{(Km)}) + 20 \cdot \log(f_{(MHz)}) \Rightarrow$$

$$143dB = 32.4 + 20 \cdot \log(D) + 20 \cdot \log(5470MHz) \Rightarrow$$

$$D = 62.733Km$$

Esta es la distancia máxima teórica a la que podemos garantizar una potencia recibida de -89 dBm en el receptor y por tanto establecer una transmisión fiable.

### • Simulación de los radioenlaces

La simulación con cualquier herramienta de planificación radioeléctrica ha de realizarse en un escenario real, con una cartografía real. Como el proyecto aquí tratado se realiza en un tramo genérico de un canal (sin concretar una ubicación real), hemos optado por escoger el tramo de un canal real cercano, el canal de Monegros.

Para realizar la simulación con Radio Mobile, partimos de las siguientes condiciones (estos datos han sido extraídos de las hojas de características de los equipos Wimax BreezeNET B100 de Alvarion):

En transmisión,

- Potencia transmitida será 30 dBm (máximo permitido por normativa). 30 dBm equivalen a 1 Watio.

En el enlace:

- Frecuencia de trabajo: 5,470 GHz
- Ancho de canal: 20 MHz

En recepción

- Ganancia de la antena receptora: 24 dBi
- Capacidad del enlace en función de la potencia recibida:

Clasificación	Modulación	Sensibilidad (dBm)	Capacidad (Mbps)
Tipo 1	BPSK 1/2	-89 dBm	5,2
Tipo 2	QPSK 1/2	-86 dBm	7,6
Tipo 3	QPSK 3/4	-83 dBm	10,1
Tipo 4	16QAM 1/2	-80 dBm	14,6
Tipo 5	16QAM 3/4	-77 dBm	19
Tipo 6	64 QAM 1/2	-77 dBm	26,7
Tipo 7	64 QAM 2/3	-73 dBm	33,5
Tipo 8	64 QAM 3/4	-71 dBm	33,5

Tabla 5.1.1-01 Relaciona el tipo de modulación, la potencia recibida y capacidad teórica.

En la figura (5.1.1-01), podemos ver toda la infraestructura de comunicaciones. Se proponen 3 enlaces Wimax Punto a Punto entre el Centro de control (Estación Base) y las diferentes Estaciones Remotas (Unidades Suscriptoras).

La elección de la ubicación de los puntos de control se hace atendiendo a la altitud, visibilidad y distancia del enlace. La ubicación de los puntos tendrá que ser confirmada en visitas de campo a los lugares elegidos.



FIGURA 5.1.1-02  
- MAPA CON LA UBICACIÓN DE TODOS LOS PUNTOS DE CONTROL.

ENLACE CENTRO DE CONTROL – ALMENARA 1

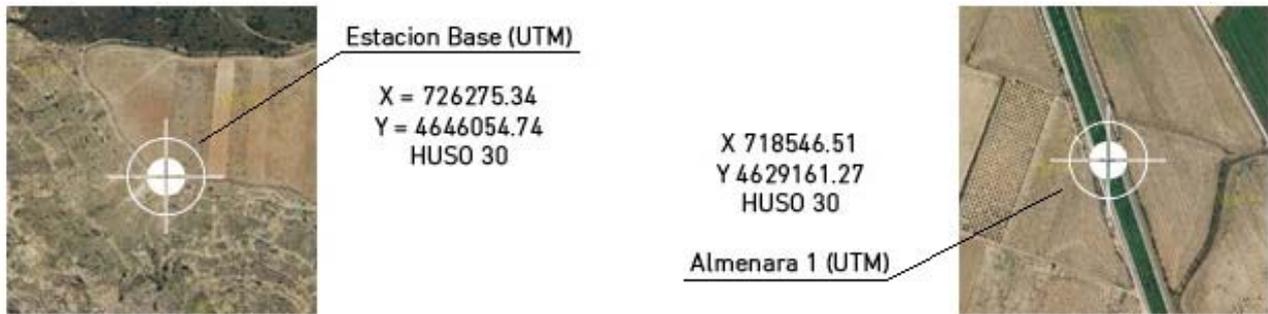


FIGURA 5.1.1-03  
- ENLACE 01 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA ALMENARA 1)

En la figura (5.1.1-04) podemos ver el perfil del enlace entre la estación Base y la estación Remota Almenara 1.

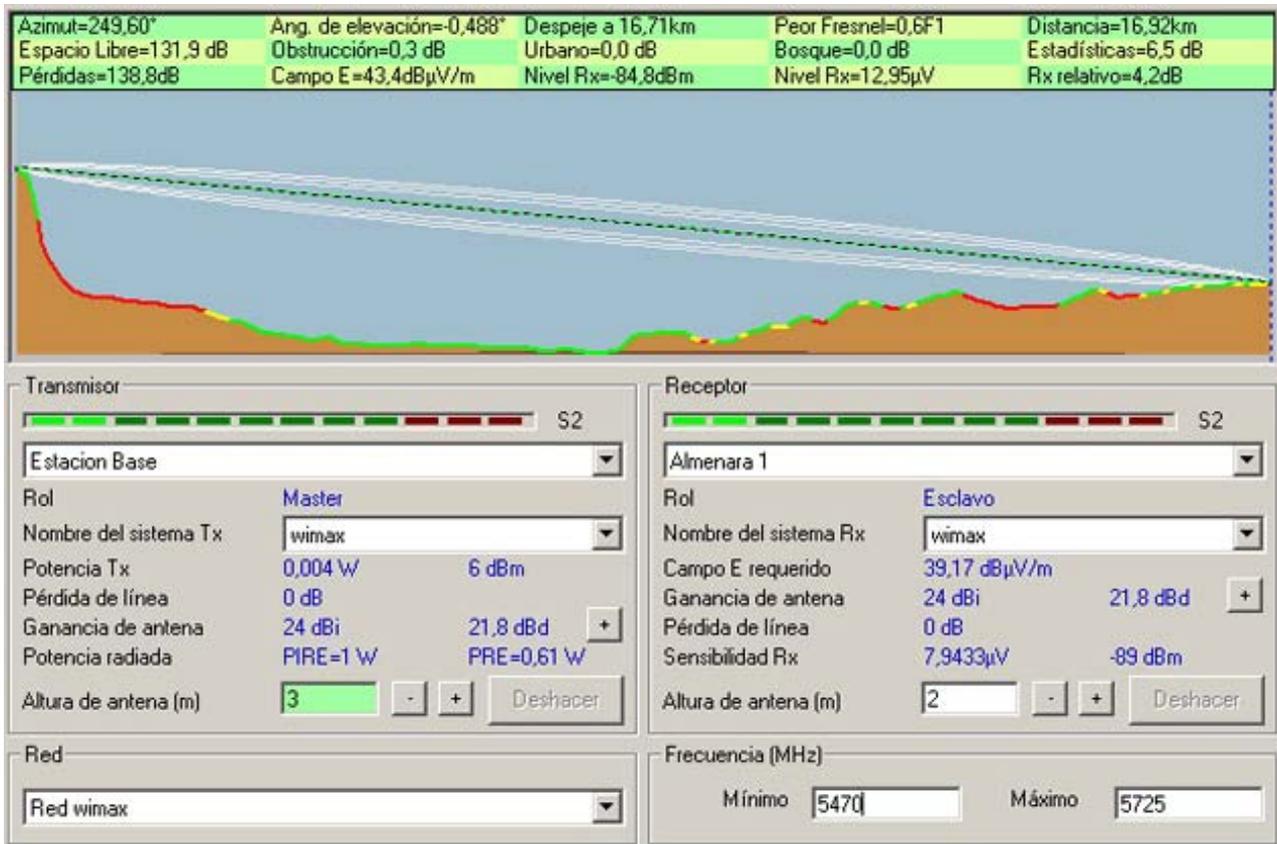


FIGURA 5.1.1-04  
- PERFIL ENLACE 01 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA ALMENARA 1)

Los datos calculados por el programa, referidos al enlace y visibles en la figura anterior son los siguientes:

Longitud del enlace: 16,92 Km

Perdidas: 138,8 dB

Potencia disponible en recepción: -84,8 dBm

Ante los resultados obtenidos (-84,8 dBm de potencia disponible en recepción) y según la correspondencia de capacidad teórica (ver Tabla 5.1.1-01), el enlace es viable con una capacidad máxima de 7,6 Mbps aproximadamente.

ENLACE CENTRO DE CONTROL – ALMENARA 2

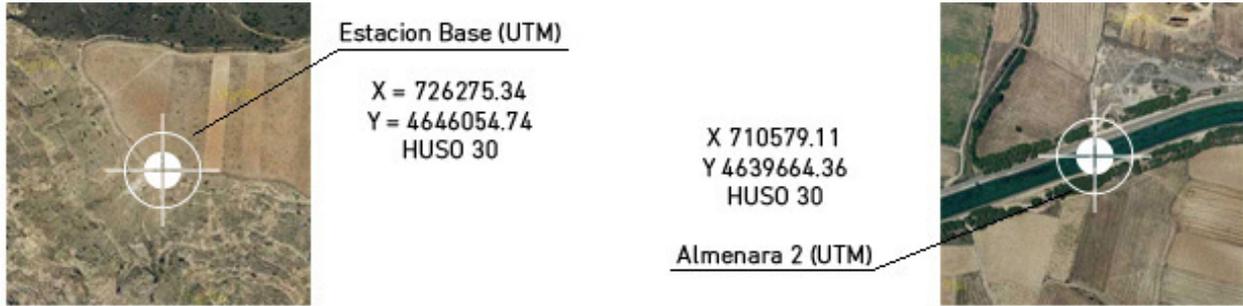


FIGURA 5.1.1-05  
- ENLACE 02 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA TOMA 1)

En la figura (5.1.1-06) podemos ver el perfil del enlace entre la estación Base y la estación Remota Almenara 2.

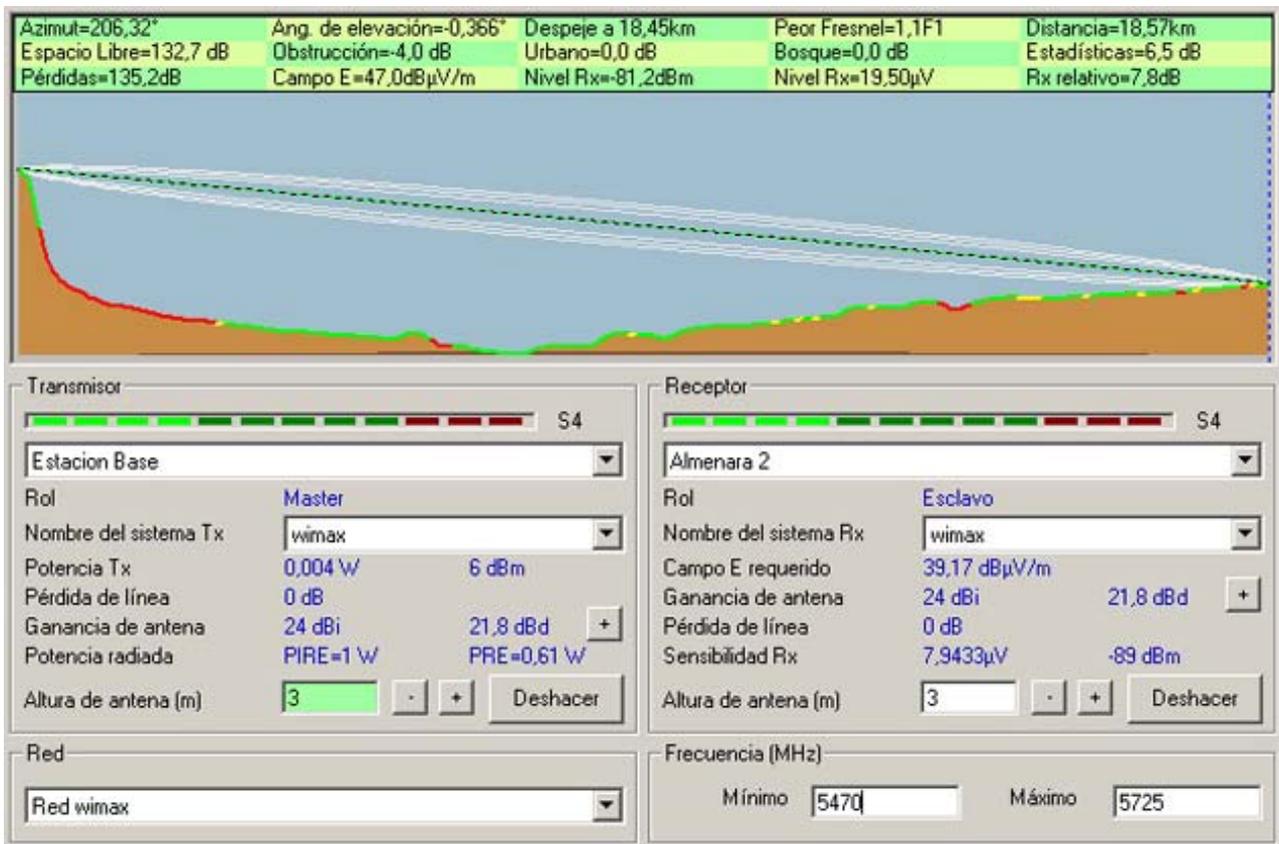


FIGURA 5.1.1-06  
- PERFIL ENLACE 02 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA TOMA 1)

Los datos calculados por el programa, referidos al enlace y visibles en la figura anterior son los siguientes:

Longitud del enlace: 18,57 Km

Perdidas: 135,2 dB

Potencia disponible en recepción: -81,2 dBm

Ante los resultados obtenidos (-81,2 dBm de potencia disponible en recepción) y según la correspondencia de capacidad teórica (ver Tabla 5.1.1-01), el enlace es viable con una capacidad máxima de 10,1 Mbps aproximadamente.

### ENLACE CENTRO DE CONTROL –TOMA 1

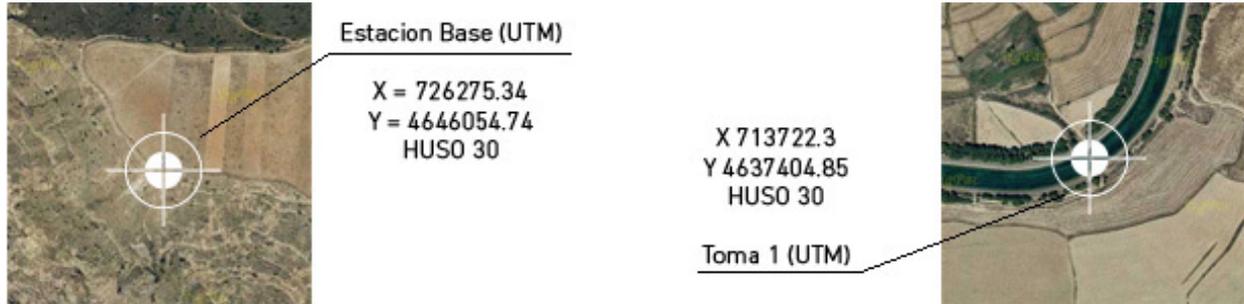


FIGURA 5.1.1-07  
- ENLACE 03 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA ALMENARA 2)

En la figura (5.1.1-08) podemos ver el perfil del enlace entre la Estación Base y la Toma 1.

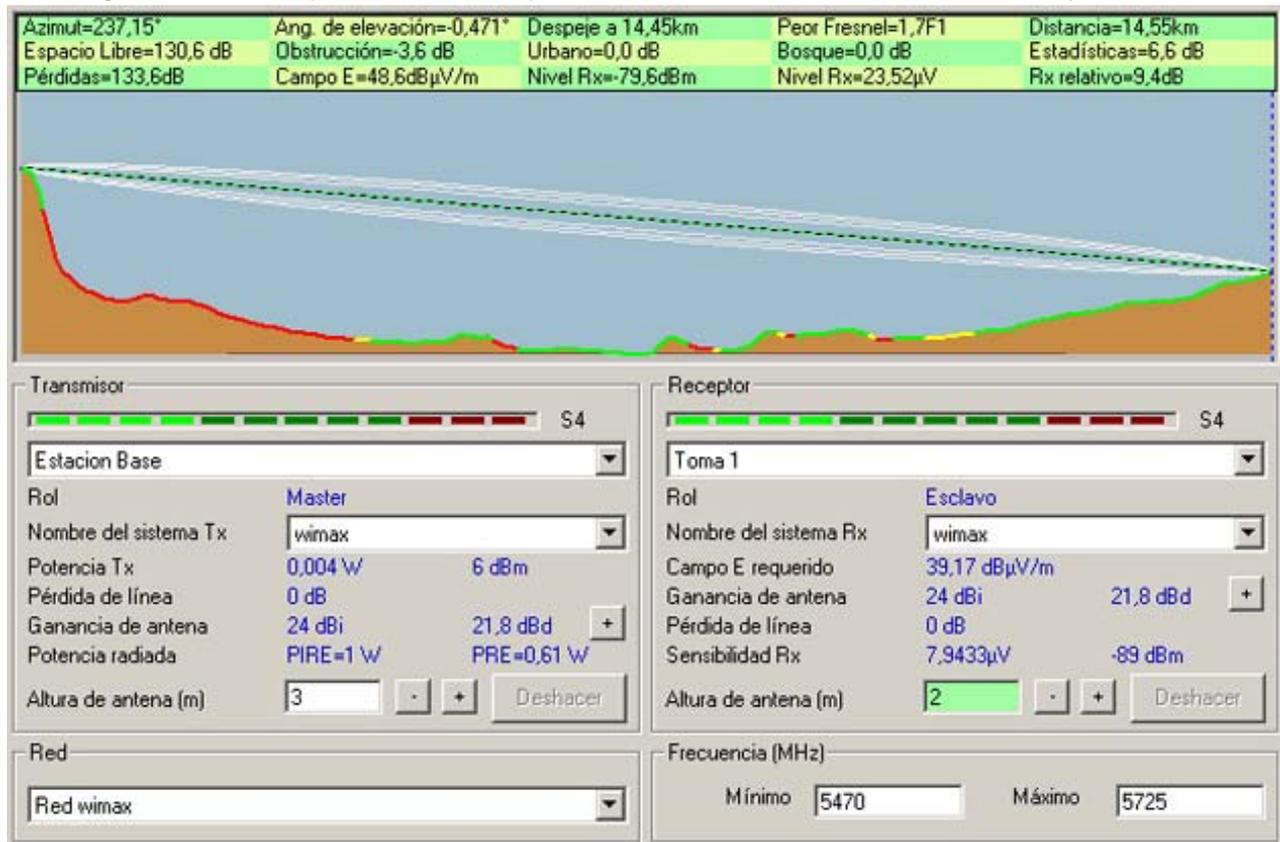


FIGURA 5.1.1-08  
- PERFIL ENLACE 03 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA ALMENARA 2)

Los datos calculados por el programa, referidos al enlace y visibles en la figura anterior son los siguientes:

- Longitud del enlace: 14,55 Km
- Atenuación en espacio libre: 133,6 dB
- Potencia disponible en recepción: -79,6 dBm

Ante los resultados obtenidos (-79,6 dBm de potencia disponible en recepción) y según la correspondencia de capacidad teórica (ver Tabla 5.1.1-01), el enlace es viable con una capacidad máxima de 14,6 Mbps aproximadamente.

Es importante dejar claro que se trata de un estudio teórico, el cual otorga una idea aproximada de la situación. Si se quieren determinar las capacidades reales de los enlaces con total exactitud serán necesarias medidas de campo.

## 5.2.- TELECONTROL.

### • Introducción al Telecontrol

Definimos telecontrol como aquel sistema en el que la información se obtiene por petición de un Centro de control a las diferentes estaciones remotas.

### FUNCIONES DEL TELECONTROL

Comúnmente se manejan distintos conceptos que se engloban dentro de un sistema de telecontrol: Telecontrol, Telemetría y Teleservicio.

- Telecontrol. Control y operación a distancia sobre estaciones remotas y sus elementos.
- Telemetría. Medición remota de señales para su posterior envío al centro de control
- Teleservicio. Acceso remoto a la estación para funciones de mantenimiento.

### • Arquitectura del sistema.

- Desde el punto de la arquitectura de sistemas el sistema de telecontrol se puede dividir en 3 niveles diferenciados.

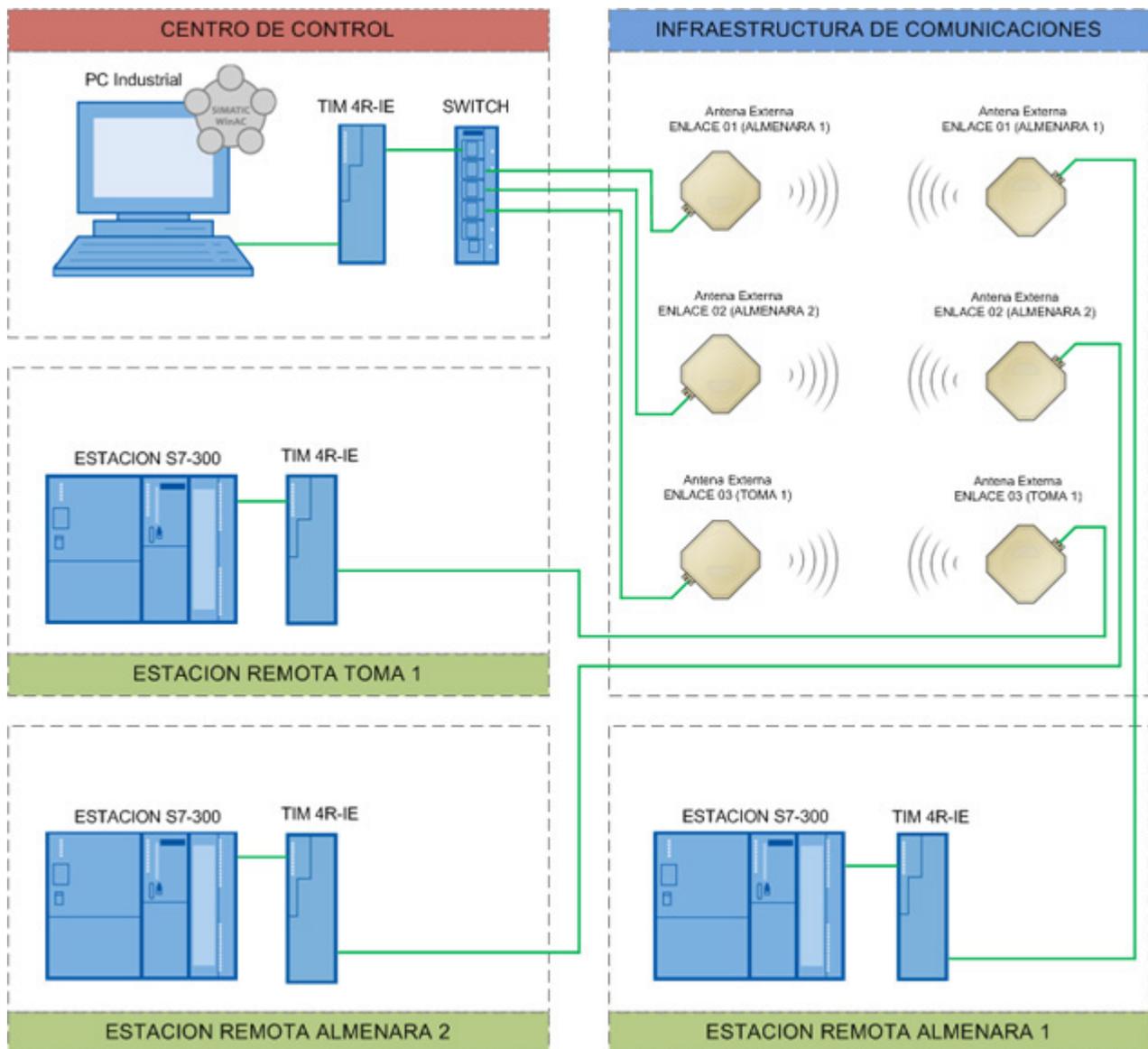


FIGURA 5.2-01 - TOPOLOGÍA DE TELECONTROL UTILIZADA.

- Centro de control, desde donde se realizan tareas de supervisión, control y monitorización de la red.
- Infraestructura de comunicaciones, permite la comunicación entre las distintas estaciones remotas y el centro de control
- Estación remota, estación o instalación remota telecontrolada que acciona distintos dispositivos.

La comunicación se establece de modo espontáneo y basada en IP.

Para la transmisión entre dos TIM o entre una TIM y un ST7cc/ST7sc a través de una red basada en IP, se establece una conexión S7 permanente. Estos módulos se intercambian paquetes de datos específicos de SINUAT ST7 utilizando el protocolo de transmisión TCP/IP.

Al enviar datos, estos se transmiten de inmediato a la estación correspondiente. El orden de transmisión se rige por el principio FIFO, con excepción de los mensaje con prioridad.

### 5.2.1.- SISTEMA DE TELECONTROL SINUAT ST7.

#### • Introducción a SINUAT ST7

Sinuat ST7 es el sistema de telecontrol basado en autómatas de la gama SIMATIC (S7-300 y S7-400) que permite el control automático de estaciones remotas que intercambian datos a través de distintos tipos de redes con una o varias centrales de mando. La configuración se realiza con STEP 7

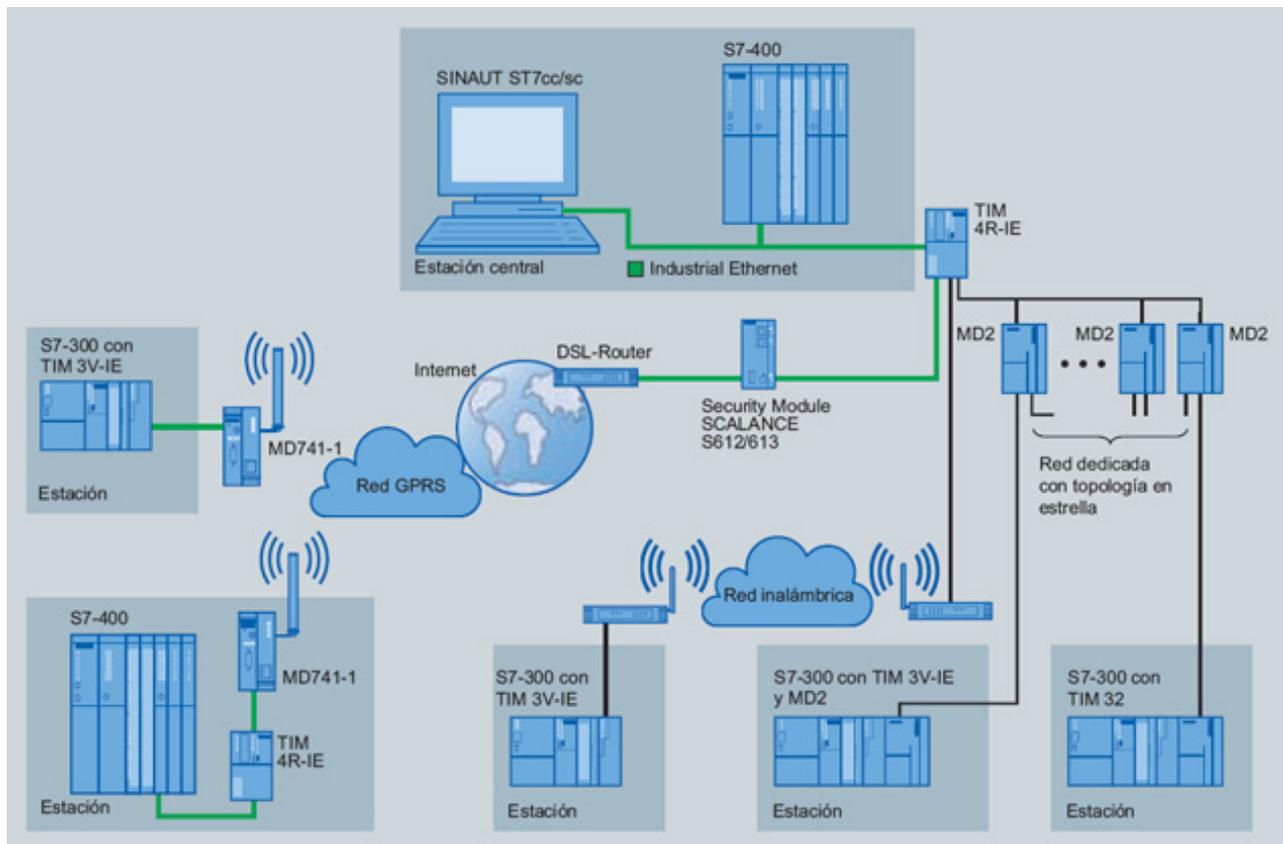


FIGURA 5.2.1-01  
- DIVERSOS TIPOS DE CONEXIONES DEL SISTEMA DE TELECONTROL SINUAT DE SIEMENS.

En SINAUT la comunicación funciona controlada por eventos. El operador será informado con alarmas, estados o valores del proceso, y podrá intervenir en cualquier momento introduciendo comandos o valores de consigna en el control del proceso. En paralelo es también posible enviar informaciones importantes a un teléfono móvil via SMS. También es posible el intercambio directo de datos entre las estaciones del proceso.

### ● Elementos del sistema SINAUT.

Los elementos que componen el sistema SINAUT, atendiendo al hardware son los siguientes:

- Módulos de comunicaciones TIM (TIM 3V-IE, TIM 3V-IE Advanced, TIM 4R/TIM 4RD, TIM 4R-IE)
- Módulos de Modem MD (Modem de línea dedicada MD2, Modem telefónico MD3, Modem RSDI MD4)
- Componentes para telefonía móvil (Modem GSM/GPRS MD720-3)
- Accesorios para líneas dedicadas (Protección contra sobretensiones LTOP, transformador de línea).
- Componentes de reloj controlado por radio (DCF77, GPS).

Los elementos que componen el sistema SINAUT, atendiendo al software son los siguientes:  
Software estándar para SINAUT ST7.

- SINAUT TD7 library, contiene bloques para S7.CPU.
- SINAUT ST7, software de configuración y diagnóstico para la programación del dispositivo.

SINAUT ST7cc, expansión para WinCC, consta de:

- ST7 Server, interface entre ST7 y WinCC.
- ST7CC Config, herramienta de configuración para ST7cc.

SINAUT ST7sc, software SCADA

- OPC server, interface entre ST7 y el cliente OPC.
- ST7sc Config, herramienta de configuración para ST7sc.

### ● Beneficios del telecontrol SINAUT

La utilización del telecontrol SINAUT aporta los siguientes beneficios:

- Permite flexibilidad a la hora de configurar y combinar diferentes redes de comunicación, pudiéndose adaptar a cualquier tipo de sistema (3G, GPRS, Radio UHF, Redes IP, etc).
- En caso de fallo en las comunicaciones las interfaces TIM almacenan los datos en su memoria. Los módulos reservan 56 Kb de memoria para almacenar estos datos.
- La información se intercambia como mensajes y son procesados atendiendo a su naturaleza: ordenes, consignas, valores medios, contadores, alarmas, valores almacenables, valores actuales, etc.
- Funcionalidad de interfaz hombre-maquina integrada mediante WinCC u OPC.
- Permite teleprogramación y telediagnóstico. Con los ahorros en costos que esto significa.
- Transmisión de Alarmas por SMS.

## • Tipos de Centro de control.

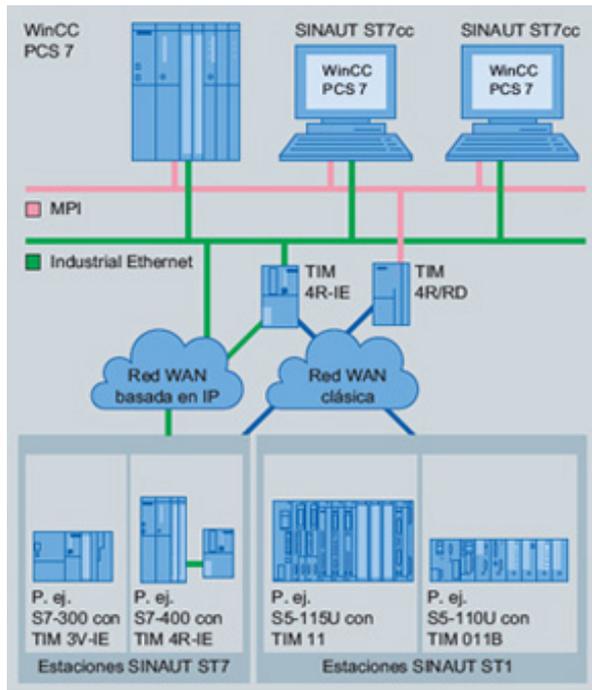


FIGURA 5.2.1-02  
- DIFERENTES CENTROS DE CONTROL SINAUT

Para configurar el centro de control existen distintas variantes para elegir:

-Con Controladores SIMATIC S7-300 y S7-400. Esta solución esta disponible para centros de control menos complejos, en los que solo se requiere el estado actual de las estaciones. Mediante la introducción de comandos, es posible intervenir en el proceso de control de las estaciones.

Con SINAUT ST7cc, centro de control integrado en PC y basado en WinCC. Este sistema de centro de control para SINAUT ST7 está especialmente orientado a eventos y la transmisión de datos con marca de tiempo (fecha y hora).

Con SINAUT ST7sc, centro de control integrado en PC para interactuar con otros fabricantes a través de OPC. Usando "Data Access Interface" puede también interactuar con los centros de control de otros fabricantes. Este sistema tiene mecanismos que prevén la pérdida de datos, ante fallos del cliente OPC.

Como se ha indicado en el apartado 3.1, al tratarse de un Centro de control relativamente complejo se ha optado por configurar el Centro de control con SINAUT ST7cc integrado en PC y basado en WinCC, descartando la configuración con SINAUT ST7sc, ya que no es necesario interactuar con otros fabricantes.

## • Tipos de Datos SINAUT

A continuación pasamos a describir los distintos tipos de datos que permite SINAUT. Todos los datos que queramos transmitir a través de SINAUT deberán pertenecer a esta clasificación, que se ordena en función del tamaño del dato que queremos transmitir. Cada dato va asociado a una posición de memoria y todos los datos que creamos, bien sea en el emisor o en el receptor, deberán tener su homologado en el lado opuesto, y mediante funciones de recepción y envío transmitiremos la información entre los diferentes puntos de control.

Tipo de Dato	Denominación	Descripción
Message objects (Datos Binarios)		
Message objects	Bin04B	Dato binario de 4 bytes
Analog value objects (Datos analogicos)		
Analog value objects	Ana04W	Dato Analógico con 4 Words. 1 Word equivale a 16 Bits.
Counted value objects (Datos de contaje y parámetros)		
Counted value objects	Cnt01D	Dato Real. (1 Número Real equivale a 32 Bits).
Counted value objects	Cnt04D	Dato con 4 Reales. (1 Número Real equivale a 32 Bits).
Command objects (Comandos)		
Command objects	Cmd01B	Comando de 1 byte

Setpoint/parameter objects (Consignas y parámetros)		
Setpoint objects	Set01W	Valor de consigna (1 valor de consigna equivale a 16 bits)
Parameter objects	Part12D	Un parámetro (1 parámetro equivale a 12DWords ó 48 bytes)
Other Data Objects (Consignas y parámetros)		
Data objects	Dat12D	Dato con 12 DWords. (1 DWord son 32 Bits).

Tabla 5.2.1-01. Tipo de Datos SINAUT

## • Tipo de Funciones SINAUT

A través del uso de las siguientes funciones, creamos los datos a enviar y posteriormente usando las funciones de envío y recepción, transmitiremos los datos de forma bidireccional desde el Centro de Control a las diferentes estaciones remotas.

Nº función	Nombre	Funciones Auxiliares requeridas	Descripción
FB Blocks Funtion			
FB82	Bin04B_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un dato de 4 Bytes.
FB83	Bin04B_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Recibe un dato de 4 Bytes.
FB84	Dat12D_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un dato con 12 DWords.
FB85	Dat12D_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Recibe un dato con 12 Dwords.
FB92	Ana04W_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un dato analógico de 4 Words.
FB93	Ana04W_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Recibe un dato analógico de 4 Words
FB100	Cnt01D_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un dato "real" con 1 Dword.
FB101	Cnt01D_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Recibe un dato "real" con 1 Dword.
FB102	Cnt04D_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un dato "real" con 4 Dwords.
FB103	Cnt04D_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Recibe un dato "real" con 4 Dwords.
FB110	Cmd01B_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un comando de 1 byte.
FB111	Cmd01B_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Recibe un comando de 1 byte.
FB116	Set01W_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un valor de consigna (16 bits) .
FB117	Set01W_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un valor de consigna (16 bits) .
FB118	Par12D_S	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Envía un parámetro con 12 Dwords.
FB119	Par12D_R	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC 126 Search	Recibe un parámetro con 12 Dwords.
FB124	SMS_Control	DB127 BasicData, FC 123 Create,, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función para enviar mensajes SMS.
FB125	PCom	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función de comunicaciones para gestionar conexiones a buses externos (utiliza SFCs WR_REC and RD_REC).
FB126	XCom	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función de comunicaciones para gestionar conexiones sin configurar (utiliza SFCs X_SEND and X_RCV).
FB127	BCom	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función de comunicaciones para gestionar conexiones configuradas (utiliza SFBs BSEND and BRCV).
FC Functions			
FC113	PartnerMonitor	DB127 BasicData, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función que permite obtener información de los suscriptores.

FC114	Trigger	DB127 BasicData, FC125 Diagnose	Pone a uno una salida según un intervalo de tiempo definido
FC115	PartnerStatus	DB127 BasicData, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función que permite obtener información del estado de los suscriptores.
FC116	Safe	DB127 BasicData,	Función que salva comandos y valores de consigna.
FC117	PulseCounter	DB127 BasicData,	Función para adquirir 8 contadores de entrada.
FC118	TestCopy	DB127 BasicData,	Función para chequear datos enviados y recibidos..
FC119	ListGenerator300	DB127 BasicData,	Función que genera listas datos. Para versión S7-400.
FC120	ListGenerator400	DB127 BasicData,	Función que genera listas datos. Para versión S7-400.
FC121	TimeTask	DB127 BasicData, FC125 Diagnose	Función para gestionar la sincronización de la CPU.
FC122	Startup	DB127 BasicData,	Función para inicializar.
FC123	Create	DB127 BasicData, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función para crear mensajes y enviarlos al buffer.
FC124	Distribute	DB127 BasicData, FC125 Diagnose, FC 126 Search	Función para distribuir los mensajes recibidos.
FC125	Diagnose	DB127 BasicData,	Función para realizar diagnosticos.
FC126	Search	-	Función para realizar busquedas.
FC127	BasicTask	DB127 BasicData, FC 123 Create, FC125 Diagnose, FB 125 PCom, FB126 XCom, FB127 BCom	Función para manejar las tareas básicas SINAUT en la CPU.
<b>System function blocks SFB</b>			
SFB12	BSEND	-	Función orientada a enviar datos a conexiones configuradas.
SFB13	BRCV	-	Función orientada a recibir datos de conexiones configuradas.
<b>System functions SFC</b>			
SFC0	SET_CLK	-	Activa "CPU Clock"
SFC1	READ_CLK	-	Lee "CPU Clock"
SFC20	BLKMOV	-	Copia variables.
SFC22	CREAT_DB	-	Crea "data block"
SFC23	DEL_DB	-	Borrar "data block"
SFC24	TEST_DB	-	Chequea "data block"
SFC25	COMPRESS	-	Comprime memoria.
SFC46	STP	-	Activa "CPU to STOP"
SFC52	WR_USMSG	-	Escribe un diagnostico
SFC64	TIME_TCK	-	Lee "system time".
SFC65	X_SEND	-	Envía datos sobre una conexión sin configurar.
SFC66	X_RCV	-	Recibe datos de una conexión sin configurar.

Tabla 5.2.1-02.Tipo de Funciones SINAUT.

## • Comunicación entre datos SINAUT

Tanto en el Centro de Control como en las distintas estaciones remotas, se crean datos de acuerdo a los tipos de datos establecidos por SINAUT. Estos datos irán asociados a posiciones de memoria (DB), y a través de funciones de recepción y envío (FB), serán leídos y posteriormente escritos en estas posiciones.

El programa SINAUT de la CPU, configurado con bloques de la librería SINAUT TD7, capta los datos de proceso que se van a transferir, comprueba si se han modificado y los transfiere a la TIM para la transmisión a través de la WAN. Los mensajes recibidos por la TIM, sin errores y a través de la WAN, se entregan a la CPU local.

De forma opcional, a los datos registrados por TD7onCPU se les pueden asignar etiqueta de fecha y hora. También se permite identificar los datos muy importantes con la prioridad "Alarma".

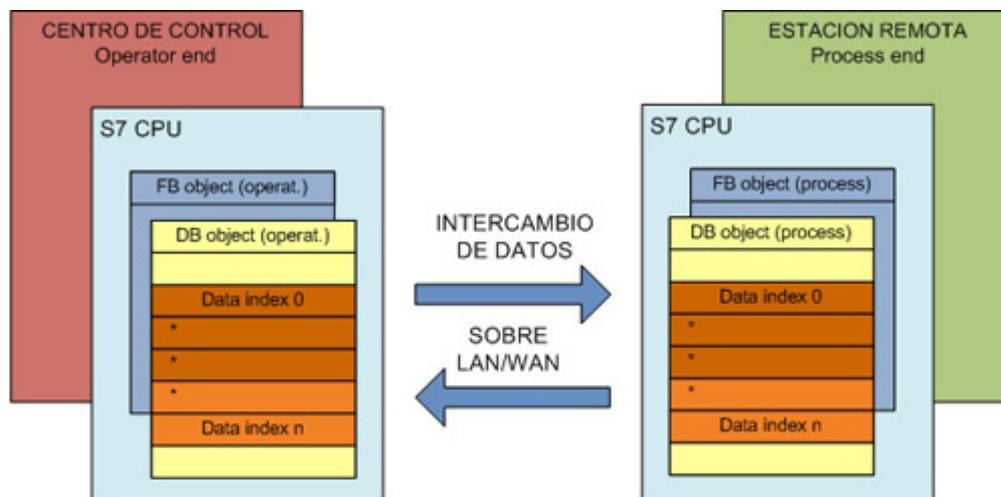


FIGURA 5.2.1-03  
- COMUNICACIÓN ENTRE DATOS SINAUT

En el caso del PC de Control Central con (SINAUT ST7cc/ST7sc), los datos a enviar son transformados en mensajes de datos de acuerdo con la configuración ST7cc/ST7sc y transmitidos a la TIM principal con la dirección de destino configurada. Estos mensajes recibidos por las TIM de las estaciones remotas, a través de la WAN, finalmente se entregan al autómatas de la estación remota.

## • Direccionamiento y ordenación de datos SINAUT

Una vez creados los datos SINAUT, pasaremos a transmitirlos a través de las funciones (Function Block, ver Tabla 5.2.1-02. Tipo de Funciones SINAUT). Cuando llamemos a dichas funciones, también deberemos aportar información sobre el lugar al que deseamos enviar o recibir dichos datos. Para esto, SINAUT asigna una serie de parámetros a los datos para que el direccionamiento y ordenación de los datos sea el correcto.

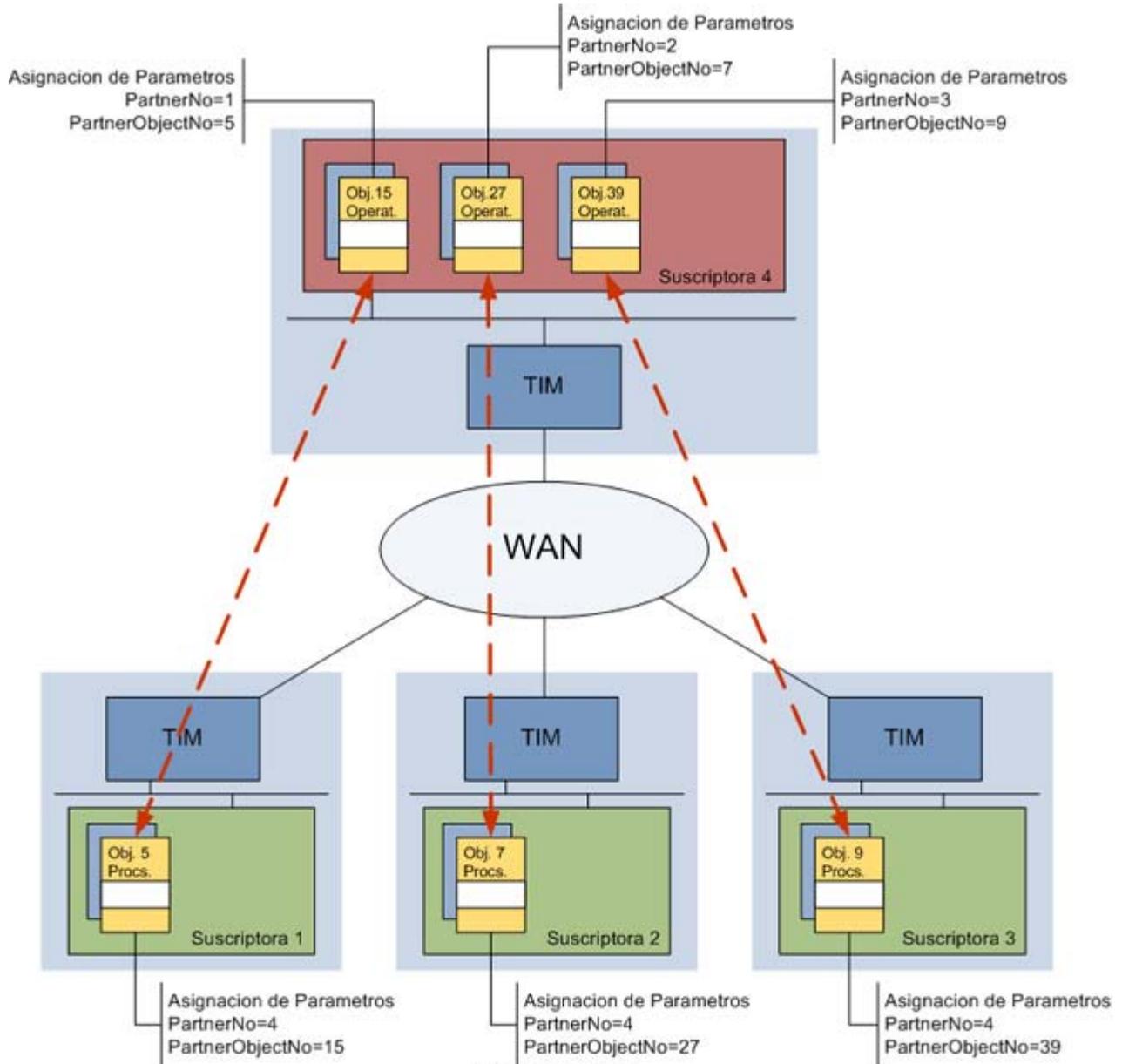


FIGURA 5.2.1-04  
- ORDENACIÓN Y DIRECCIONAMIENTO DE DATOS SINAUT

Mediante el parámetro PartnerNo, se define el número de estación con la que se intercambiará el dato.

Mediante el parámetro PartNerObjectNo, se define el número de dato que queremos transmitir.

A parte de estos 2 parámetros, también puede ser requerido el parámetro TimeStamp, que etiqueta con fecha/hora los mensajes enviados.

## • Estructura de un programa SINAUT

A continuación se muestra la estructura tipo de un programa SINAUT.

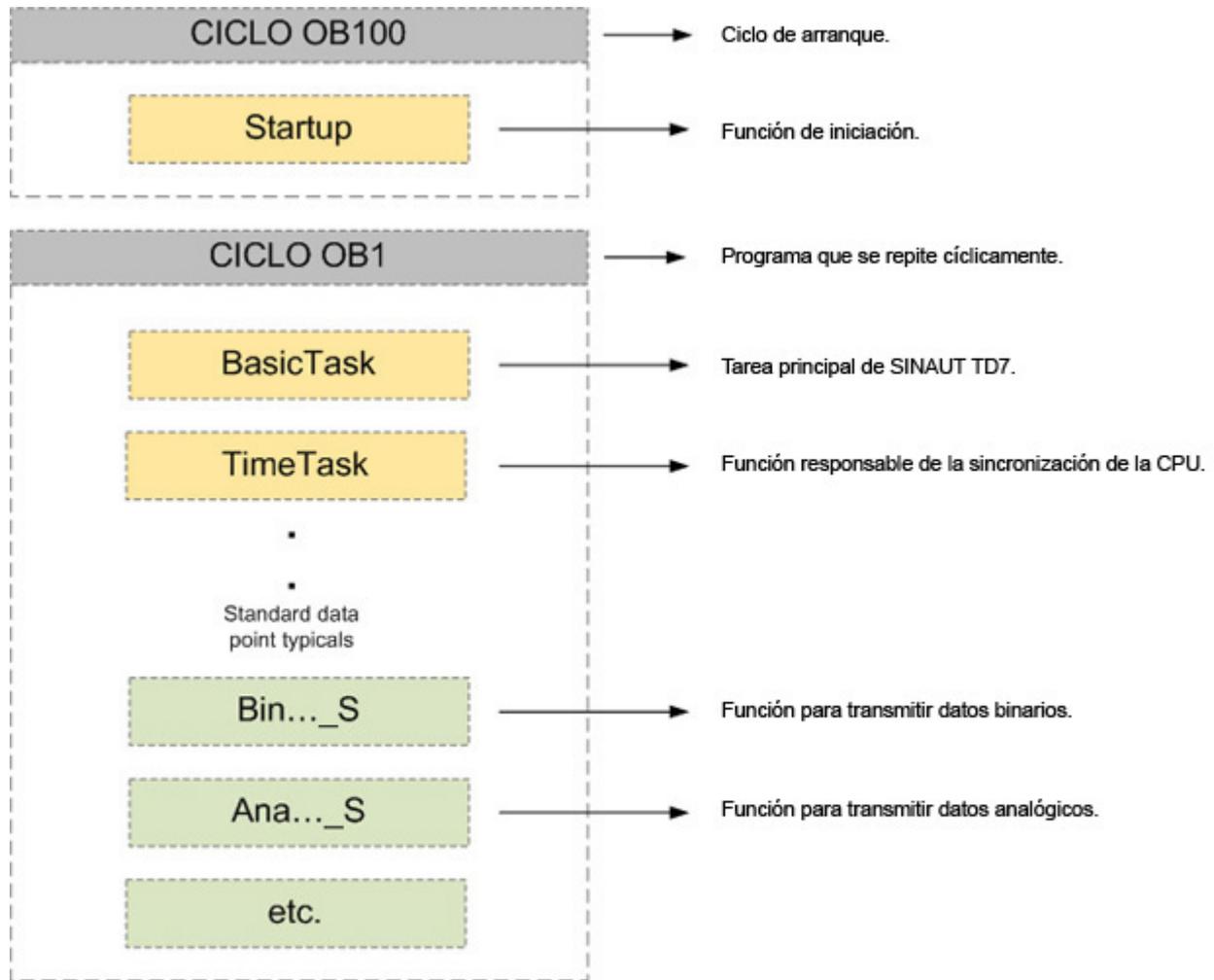


FIGURA 5.2.1-05  
- ESTRUCTURA TIPO DE UN PROGRAMA SINAUT.

## • Sincronización mediante Fecha/Hora

En los sistemas SINAUT ST7, es posible realizar una sincronización de fecha/hora unitaria de todos los participantes SINAUT. De esta forma, la información del proceso tiene marcas de tiempo unívocas.

La sincronización se realiza de la siguiente forma:

La fecha/hora se sincroniza a través del PC de Control Central con (SINAUT ST7cc/ST7sc). Es decir, el PC de Control Central es el reloj maestro para la TIM central que está conectada a este PC a través de Ethernet. Este PC también es el reloj maestro para las estaciones TIM de las estaciones remotas. El PC de Control central tiene que tener en este caso una fecha/hora exacta o el propio PC tiene un reloj vía radio o recibe la fecha/hora actual de un servidor NTP (Network Time Protocol).

Es necesario llamar en el programa SINAUT de la CPU (TD7onCU) a la función "TimeTask" de la librería SINAUT, para que la CPU pueda recibir la fecha/hora actual de las TIM.

## 5.2.2.- COMUNICACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES PUNTOS DE CONTROL.

### • Transferencia de datos entre el Centro de Control y la Estación Remota Almenara

En la figura (5.2.2-01) se muestra de forma gráfica el flujo de datos entre el Centro de Control y una Estación Remota Almenara.

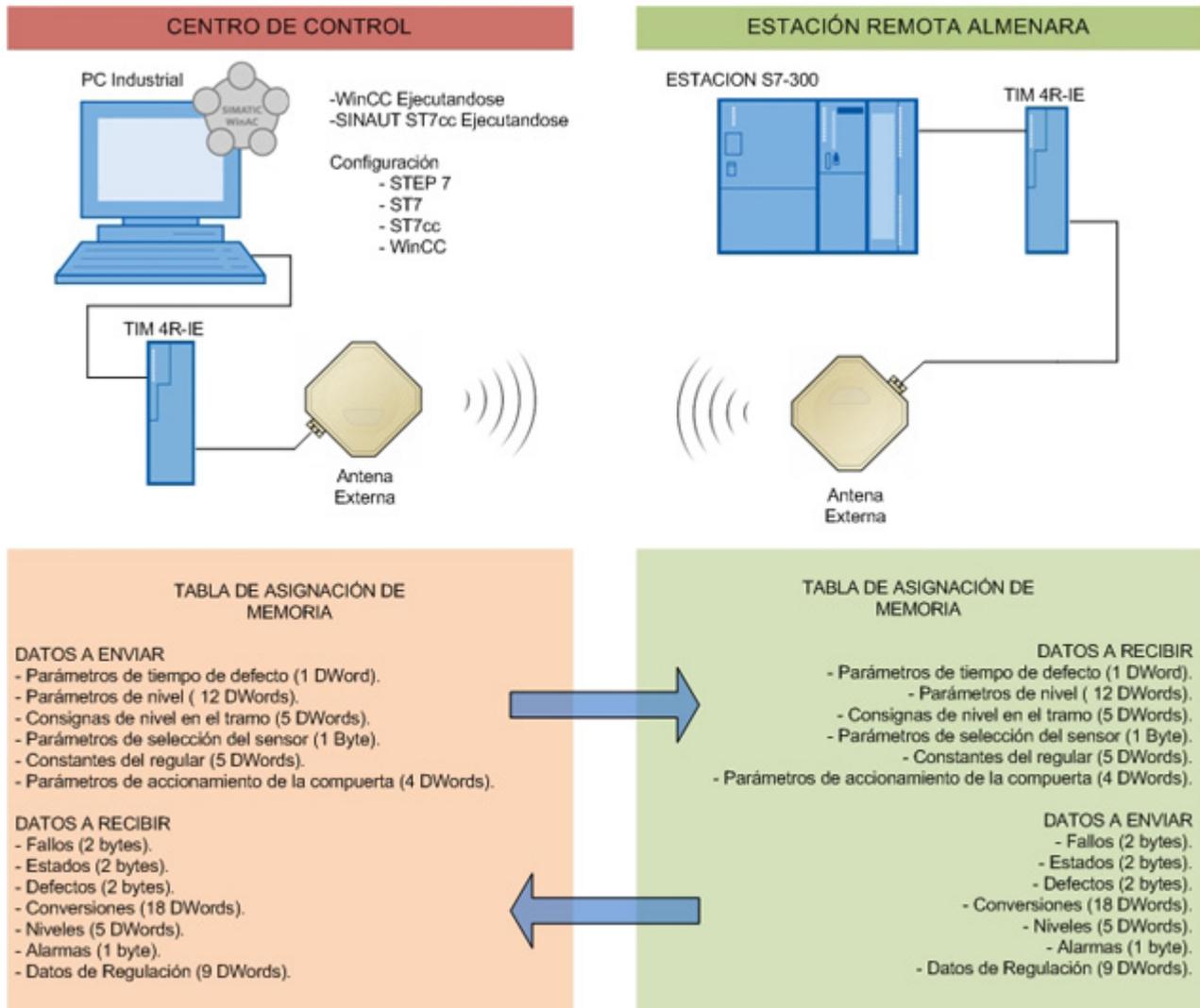
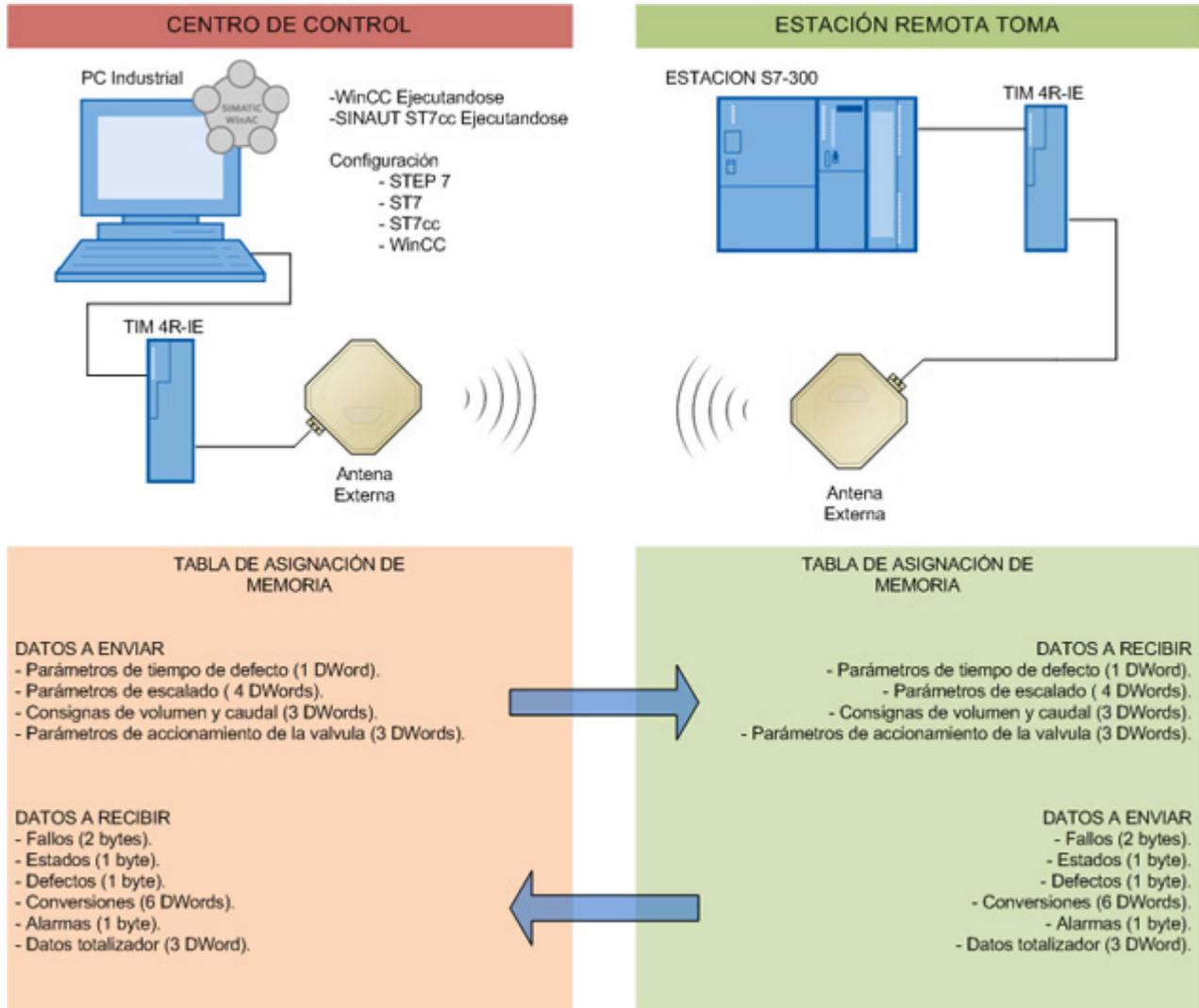


FIGURA 5.2.2-01  
- COMUNICACIÓN (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA ALMENARA).

Para ver detalladamente la designación de variables y la implementación programada de esta tarea ver el Capítulo 6, apartado 6.2.5- FC40 COMUNICACIONES.

## • Transferencia de datos entre el Centro de Control y la Estación Remota Toma

En la imagen que se muestra a continuación podemos ver de forma gráfica el flujo de datos entre el Centro de Control y una Estación Remota Almenara.



**FIGURA 5.2.2-02**  
- COMUNICACIÓN (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA TOMA).

Para ver detalladamente la designación de variables y la implementación programada de esta tarea ver el Capítulo 6, apartado 6.3.4- FC40 COMUNICACIONES.



## CAPITULO 6 - DESCRIPCION FUNCIONAL DE PROGRAMACION

En este apartado se recoge la descripción funcional necesaria para la programación de los PLCs de las estaciones remotas concernientes a este proyecto.

El proyecto se circunscribe a un tramo de canal, limitado por dos almenaras, y una toma de abastecimiento. Las estaciones remotas se instalarán en cada una de las almenaras y en la toma. Esto implica la existencia de programas para:

- La estación remota Almenara.
- La estación remota Toma.

Todas las estaciones se comunican con la estación Centro de Control, desde donde se controlan todos los procesos relativos a la infraestructura hidráulica. El programa de dicha estación no es cometido de este proyecto, sin embargo si se han empleado y asignado variables pertenecientes a este programa.

Los programas no se han implementado en ningún lenguaje de programación concreto. La forma de presentar estos programas es mediante diagramas de flujo, fácilmente entendibles por cualquier programador. Esto permite transcribir los programas a los PLCs en el lenguaje más cómodo para los programadores. A su vez no delimita la aplicación de estos programas a un lenguaje y PLC concreto sino que permite su implementación en cualquier familia de PLCs de cualquier fabricante. En este caso se han empleado PLCs Siemens y por lo tanto las nomenclaturas y la estructuración está orientada a estos autómatas.

### • Procesamiento cíclico

El funcionamiento de los PLC es cíclico. El ciclo se divide en tres partes fundamentales:

- Lectura de las entradas
- Ejecución del programa
- Escritura de las salidas

El PLC antes de ejecutar el programa lee las entradas, después ejecuta el programa y finalmente escribe las salidas para posteriormente comenzar el ciclo de nuevo. Esto significa que no se activan las salidas durante la ejecución del programa y que no se ve afectado por un cambio en una entrada durante el ciclo. También es posible ejecutar un programa de forma periódica, es decir, que se ejecute cada cierto intervalo de tiempo. Se puede controlar la ejecución del ciclo esperando a una variable temporal (marca de ciclo) para iniciar de nuevo la ejecución del siguiente ciclo o escribiendo el programa en un bloque de organización periódico que se ejecuta cada cierto tiempo.

Los autómatas Siemens están estructurados en diferentes bloques de programación. Los bloques principales donde tiene lugar esta forma de operar se denominan OB (*Organization Block*, bloque de organización). Así el bloque principal de programa es el OB1, que se ejecuta cíclicamente.

Dentro del OB1 se pueden escribir directamente las instrucciones del programa o se pueden llamar a otros bloques destinados a ejecutar subprogramas. Estos bloques se llaman FC

(*FunCtion*, función) o FB (*Function Block*, bloque de función). Una forma de escribir un programa de forma ordenada es llamar a diferentes FC o FB desde el bloque principal OB1. De esta forma se ejecuta cíclicamente el OB1 que a su vez va llamando a los diferentes FCs.

Debido a la forma de trabajo de los PLC se pueden eliminar las operaciones de bucle o salto hacia atrás causantes de bucles sin fin y fallos de operación.

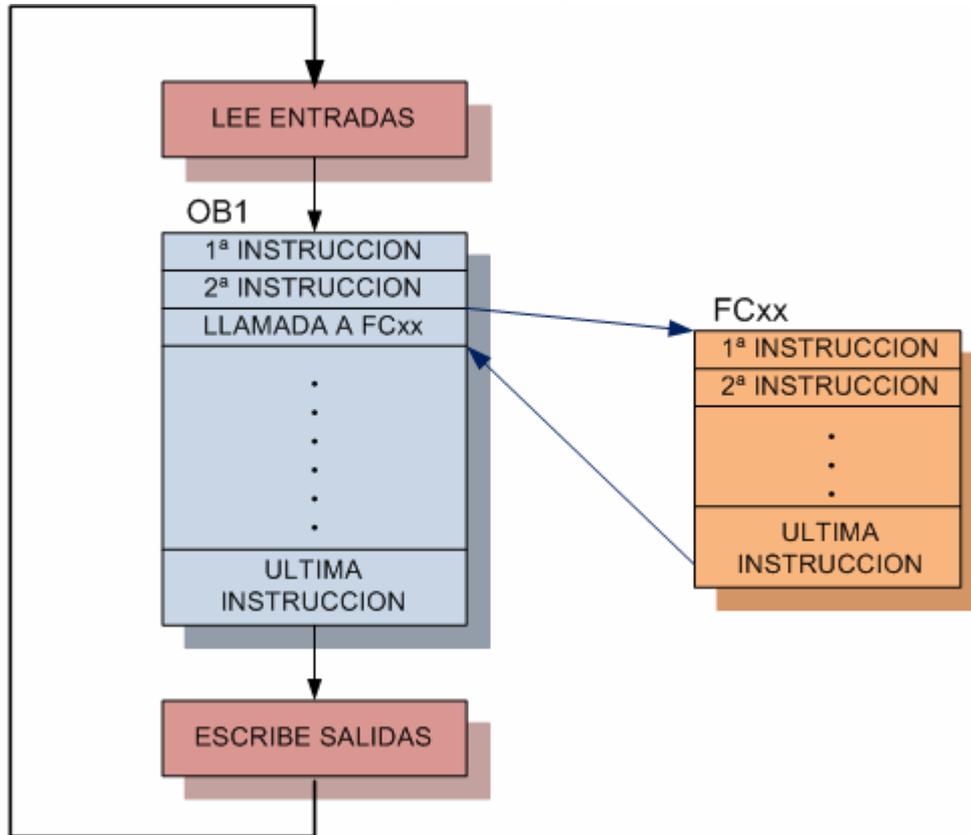


FIGURA 6-01  
- EJEMPLO DE PROCESAMIENTO CÍCLICO EN UN PLC SIEMENS.

El funcionamiento y las diferentes partes del PLC se explican más en detalle en el capítulo 3, apartado 3.2.1 – PLC (Programmable Logic Controller).

## 6.1- DIRECTRICES DE PROGRAMACION

### ● Estructuración de los programas

Todos los programas han de estructurarse de la misma forma. Se separarán las diferentes tareas en funciones, siguiendo el siguiente orden:

- Comunicación con Control Central.
- Verificación de fallos, emergencias, intrusismos.
- Comprobación de estados.
- Lectura de la instrumentación.
- Cálculos, regulaciones, etc.
- Actuación de compuertas.

Todas las señales de entrada deben tener una variable auxiliar de memoria (marca) evitando así utilizar la dirección física de la entrada en el programa. Esto conlleva las siguientes ventajas:

Una modificación o error en el cableado supone únicamente el cambio de una línea de programa.

La verificación de señales en campo queda delimitada a una pequeña parte del programa reduciendo el número de pruebas y errores.

### • Denominación de bloques de programación

Debido al uso de PLCs Siemens la programación, así como la denominación de los bloques de programación, está orientada al software de programación STEP 7.

Este software permite estructurar el programa de usuario, es decir, subdividirlo en distintas partes. Esto aporta las siguientes ventajas:

- los programas de gran tamaño se pueden programar de forma clara
- se pueden estandarizar determinadas partes del programa
- se simplifica la organización del programa
- las modificaciones del programa pueden ejecutarse más fácilmente
- se simplifica el test del programa, ya que puede ejecutarse por partes
- se simplifica la puesta en marcha.

En el caso de la programación de las estaciones remotas se pueden subdividir los procesos de automatización en tareas individuales. Las partes de un programa estructurado equivalen a las distintas tareas y se definen como los bloques del programa.

### • Tipos de bloques

Bloque	Descripción breve de la función
Bloques de organización (OB, Organization Block)	Los bloques de organización (OB) constituyen el interface entre el sistema operativo y el programa de usuario. Son llamados por el sistema operativo y controlan el procesamiento cíclico. Programando los bloques de organización se define el comportamiento de la CPU. Los bloques de organización determinan la secuencia en la que habrán de ejecutarse las diferentes partes del programa.
Funciones (FC, FunCtion)	Las FCs contienen rutinas de programa para funciones frecuentes. Las funciones son bloques programables. Una función es un bloque lógico "sin memoria". Las variables temporales de las FCs se memorizan en la pila de datos locales. Estos datos se pierden tras el tratamiento de las FCs. Para fines de memorización de datos, las funciones pueden utilizar bloques de datos (DB).

<p>Bloques de función (FB, Function Block)</p>	<p>Los bloques de función son bloques programables. Un FB es un bloque "con memoria". Dispone de un bloque de datos asignado como memoria (bloque de datos de instancia, DB). Los parámetros que se transfieren al FB, así como las variables estáticas, se memorizan en el DB de instancia. Las variables temporales se memorizan en la pila de datos locales. Los datos memorizados en el DB de instancia no se pierden al concluir el tratamiento del FB. Los datos memorizados en la pila de datos locales se pierden al concluir el tratamiento del FB. (DB de instancia = memoria del FB).</p>
<p>Bloques de datos (DB, Data Block)</p>	<p>Al contrario de los bloques lógicos, los bloques de datos (DB) no contienen instrucciones. En cambio, sirven para depositar datos de usuario, es decir que los bloques de datos contienen datos variables con los que trabaja el programa de usuario.</p>
<p>Bloques de datos de instancia (DBs de instancia)</p>	<p>Al llamarse a un FB/SFB, los DBs de instancia se asocian al bloque. Los DBs de instancia se generan automáticamente al efectuarse la compilación.</p>
<p>Bloques de función del sistema (SFB, System Function Block) y funciones de sistema (SFC, System FunCtion)</p>	<p>Las CPUs ofrecen bloques preprogramados que se pueden llamar desde el programa de usuario. Un SFB es un bloque de funciones integrado en la CPU S7. Como los SFBs forman parte del sistema operativo, no se cargan como parte integrante del programa. Al igual que los FBs, los SFBs son bloques "con memoria". Para los SFBs se han de crear también bloques de datos de instancia y cargar en la CPU como parte integrante del programa. Una función del sistema es una función preprogramada integrada en la CPU. La SFC se puede llamar desde el programa. Como las SFCs forman parte del sistema operativo, no se cargan como parte integrante del programa. Al igual que las FCs, las SFCs son bloques "sin memoria".</p>

En el programa el bloque principal recibe la denominación de OB1. El resto de funciones se denominarán FCxx. Utilizando las decenas para tareas diferentes. Por ejemplo, FC10 para comprobación de fallos, FC20 para comprobación de estados. Si dentro de FC20 hiciese falta llamar a otro bloque relacionado sería FC21, 22, 23, etc.

Las funciones que necesiten una tabla de variables o base de datos asociada (DB) se denominarán FBxx, siguiendo el mismo criterio anterior.

Las tablas de variables o bases de datos se numeraran según su función asociada. FB40, DB40.

### • Criterio de denominación de mnemónicos

La denominación de mnemónicos para las variables de programación, ya sean entradas, salidas o marcas, debe seguir la siguiente estructura:

- Origen de la señal. A excepción de las señales de Control Central que irán acompañadas de destino.
- Tipo de variable. Entrada, Salida, Digital o analógica, bit de marca, byte de marcas, etc.
- Tipo de señal. Fallos, Estados, Defectos, Conversiones de valores, Niveles, Alarmas, Datos de la regulación, etc.
- Elemento al que hace referencia. Compuerta izquierda o derecha, entrada analógica 1, 2, etc.

Como ejemplo sirvan los siguientes supuestos:

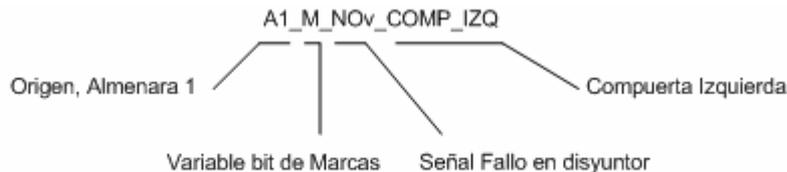


FIGURA 6.1-01

- MNEMÓNICO PARA LA MARCA DE FALLO EN EL DISYUNTOR DE LA COMPUERTA IZQUIERDA DE LA ALMENARA 1.

En este caso el origen de la señal es la almenara 1, se trata de una variable tipo bit de marcas que indica que ha saltado el disyuntor que corta la alimentación al actuador de la compuerta izquierda de dicha almenara.



FIGURA 6.1-02

- MNEMÓNICO PARA LA VARIABLE CONSIGNA DEL LÍMITE SUPERIOR PARA LA ENTRADA ANALÓGICA 3.

En este otro caso se trata de una señal emitida por el Centro de Control. La mayoría de las señales provenientes del Centro de Control serán consignas. Esta variable es la consigna de límite superior para la entrada analógica 3. Indica mediante un número el valor límite correspondiente al máximo de dicha entrada (20mA).

### Origen de la señal

Almenara nº	Ax
Toma nº	Tx
Balsa nº	Bx
Control Central	CC

### Tipo de variable

Entrada digital	ED
Salida digital	SD
Entrada analógica	EA
Salida analógica	SA
Bit de Marcas	M
Byte de Marcas (8bits)	MB
Palabra de Marcas (16bits)	MW
Doble Palabra de Marcas (32bits)	MD

### Tipo de señal

Fallos	Sobretensión	SOBRET
	Fallo de fase, asimetría	FALLO_FASE
	Disyuntor activado	NOv
	Señal de emergencia	EMERG
	Intrusismo	INTRUSO
	Batería baja	BAT_BAJA

Estados	Compuerta abierta	COMP_ABIER
	Compuerta cerrada	COMP_CERR
	Par sobrepasado	PAR
	Compuerta maniobrando	COMP_MANIO
	Compuerta en manual	MAN
	Compuerta en automático	AUTO

Defectos	Defecto de apertura	DEF_AP
	Defecto de cierre	DEF_CI
	Hilo roto	HROTO
	Valor anómalo	VANOM

Conversiones	Señal analógica convertida a valor decimal (escalado)	OUT
	Límite superior (escalado)	HI_LIM
	Límite inferior (escalado)	LO_LIM

Cálculo de Niveles	Banda muerta de nivel	BM_NIVEL
	Valor medio de nivel en arqueta de medidas	NIVEL
	Banda muerta superada	BM_SUP

Alarmas	Alarma de nivel mínimo	ALARM_NMIN
	Alarma de nivel máximo	ALARM_NMAX
	Cerrar compuertas	CERRAR
	Abrir compuertas	ABRIR
Datos de regulación	Nivel medido ponderado	NIVEL_PONDERADO
	Área mojada medida ponderada	AM_MEDIDA
	Área mojada consigna	AM_CONSIGNA
	Error calculado	ERROR
	Valor de la constante proporcional	KP
	Valor de la constante integral	KI
	Cálculo de la integral	INTEGRAL
	Cálculo de la acción	ACCION
	Valor de la acción convertido a valor de la salida analógica (escalado)	ACCION_ESCALADO

Elemento al que hace referencia	
Compuerta izquierda	IZQ
Compuerta derecha	DCH
Comunicaciones	COM
Sistema de alimentación ininterrumpida	SAI
Fuente de alimentación	FA
Entrada analógica número	EAX
Aguas arriba	AARR
Aguas abajo	AABJ

En el software de programación de Siemens STEP 7 los mnemónicos reciben la denominación de "simbólicos".

En los apartados 6.2.9 y 6.3.8 se muestra el conjunto de señales empleado en la programación de este capítulo junto con los correspondientes mnemónicos asociados.

### • Inicialización Del Ciclo

Para evitar que en el primer ciclo del PLC después de un arranque, o rearranque debido a una falta de tensión, las marcas relacionadas con las comunicaciones así como las relacionadas con los movimientos de las compuertas se encuentren reseteadas, estas deben asignarse al área de memoria remanente.

El área de memoria remanente es un área en NVRAM (RAM no volátil). A tal efecto, la CPU se ha de ajustar de tal manera que los datos siguientes sean memorizados en la RAM no volátil. Esta configuración se realiza en el software de programación STEP-7 asignando las marcas utilizadas al área de memoria remanente correspondiente.

Esta área de memoria no afecta al funcionamiento normal del programa. Así pues cuando se establezca comunicación y la estación remota almenara reciba consignas y parámetros estos datos "pisarán" los datos del área de memoria remanente. En caso de arranque permanecen los últimos datos que se hayan escrito en dicha memoria. De esta forma se asegura un funcionamiento normal en caso de fallos, faltas de comunicaciones, e inicio del sistema después de la puesta en marcha. A este respecto debe ser durante la puesta en marcha donde se asignen valores a las marcas asignadas al área de memoria remanente.

## **6.2.- PROGRAMACIÓN DE ESTACIÓN REMOTA (ALMENARA)**

Se describe a continuación el programa completo subdividido en sus correspondientes funciones. El bloque principal de programa OB1 engloba todas las funciones y rutinas necesarias para el funcionamiento de la almenara.

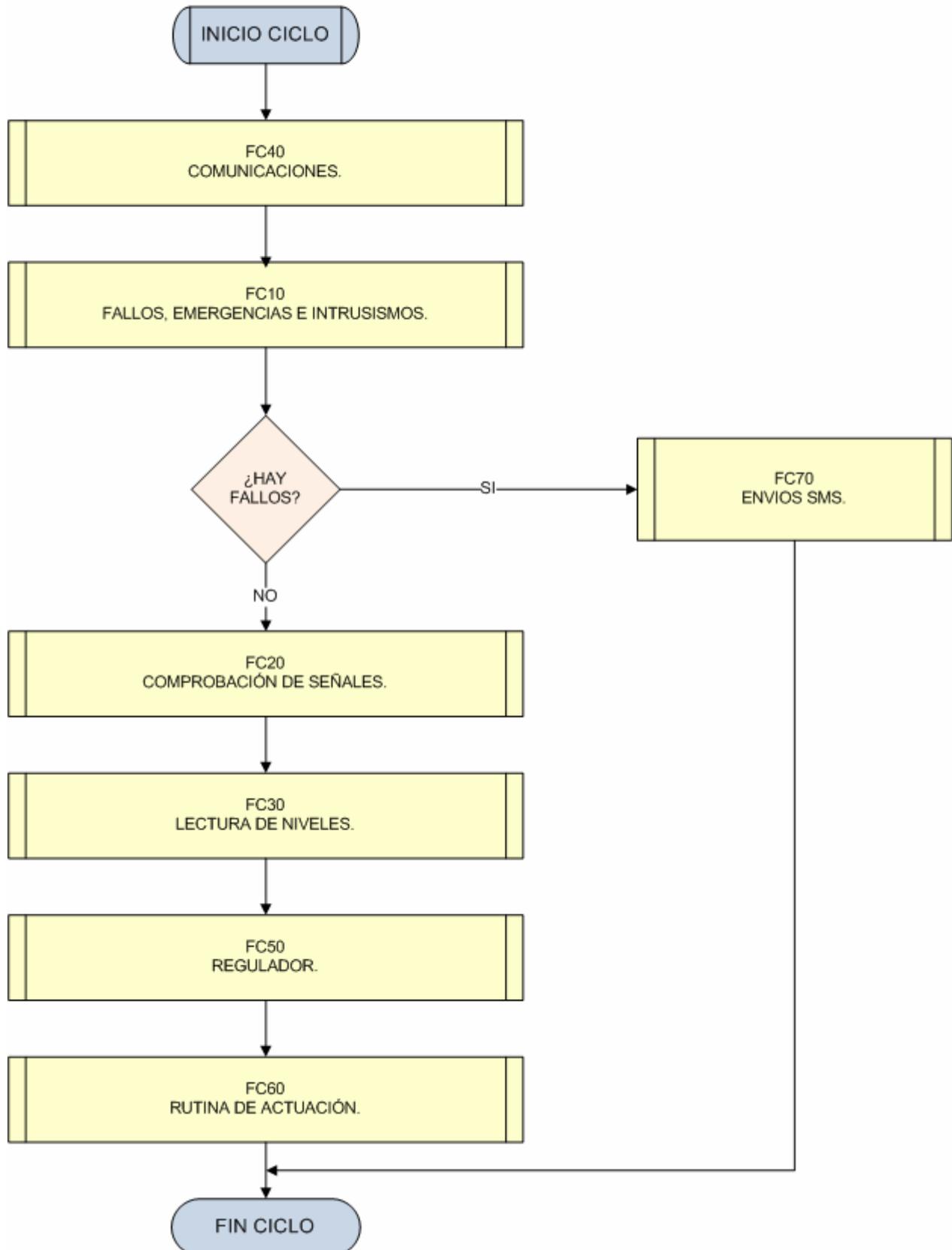
### **6.2.1- OB1, BLOQUE PRINCIPAL**

Este bloque es por defecto el que primero se ejecuta por el PLC, por lo tanto todo el programa se implementa en el mismo. Debido a la forma de trabajo de los PLCs de Siemens, en donde el bloque OB1 se ejecuta cíclicamente, se eliminan las operaciones de bucle, siendo el bucle el propio ciclo de programa. Se ha estructurado el programa en diferentes funciones para facilitar la programación y el mantenimiento del mismo. Cada función corresponde con una serie de operaciones a realizar como son comprobaciones de fallos, señales, cálculos, actuación, etc. El programa llamará a cada función desde el OB1 para volver al mismo cuando finalice dicha función.

El programa comienza con la función de comunicaciones para solicitar todos los parámetros y consignas necesarias. La función de comunicaciones establece una recepción de datos que se hará efectiva al inicio de ciclo y un envío que se hará efectivo al final de ciclo, por lo tanto al iniciar el ciclo se dispondrá de las consignas y parámetros recibidos desde el Centro de Control. El envío de los fallos, las mediciones, etc, se ejecutará al finalizar el ciclo debido al procesamiento cíclico del PLC, explicado al inicio del capítulo 6 y en el capítulo 3, apartado 3.2.1 – PLC (Programmable Logic Controller).

La siguiente operación es la comprobación de fallos de la estación remota almenara. Faltas de tensión, emergencias o intrusismos se consideran suficientemente importantes como para no ejecutar el resto del programa y comunicar dichos fallos al Centro de Control y al personal de mantenimiento mediante mensajes SMS. El resto de funciones de comprobación de señales no conllevan un salto de programa. El programa en su ejecución normal sigue por orden todas las funciones.

## Diagrama de flujo del bloque principal OB1 Almenara



## 6.2.2- FC10, FALLOS, EMERGENCIAS E INTRUSISMOS

Esta función comprueba las entradas digitales destinadas a la detección de fallos eléctricos de sobretensiones, de alimentación de equipos, de activación del SAI, de la activación de la emergencia, de la señal de intrusismo y de las señales de fallo de los actuadores. Ver Anexo B. PLANOS, planos eléctricos de 103 a 116.

### • Fallos

Cada entrada digital tiene asociada un bit de marcas, de modo que si existe un fallo el bit asociado se pone a 1. De esta forma queda en memoria el fallo. Al final de la función se comprueba si hay alguna marca activada, de ser así se envían las variables al Centro de Control dando constancia a este de los fallos y emergencias surgidos y del estado de la almenara en el momento del fallo o emergencia. Además se envían mensajes SMS al personal de mantenimiento.

Los fallos relacionados con sobretensiones, fallos de fase o asimetrías en la acometida, faltas de tensión en equipamientos, o emergencias activan además las lámparas de Fallo/Emergencia del cuadro eléctrico siguiendo un código de identificación. De esta forma el personal de mantenimiento puede averiguar rápidamente la causa del fallo. El código es el siguiente:

Señal	Lámpara Fallo Comp. Izq.	Lámpara Fallo Comp. Dch.
Sobretensión o Emergencia	Luz Fija	Luz Fija
Fallo Fase, Asimetría	Discontinuo consecutivo	Discontinuo consecutivo
No hay tensión en actuador Comp. Izq.	Luz Fija	Apagada
No hay tensión en actuador Comp. Dch.	Apagada	Luz Fija
No hay tensión de entrada en el SAI	Destellos rápidos	Destellos rápidos
Fallo en SAI	Intermitencia rápida	Intermitencia rápida
Fallo en alimentación de comunicaciones (PoE)	Pulsos largos	Pulsos largos

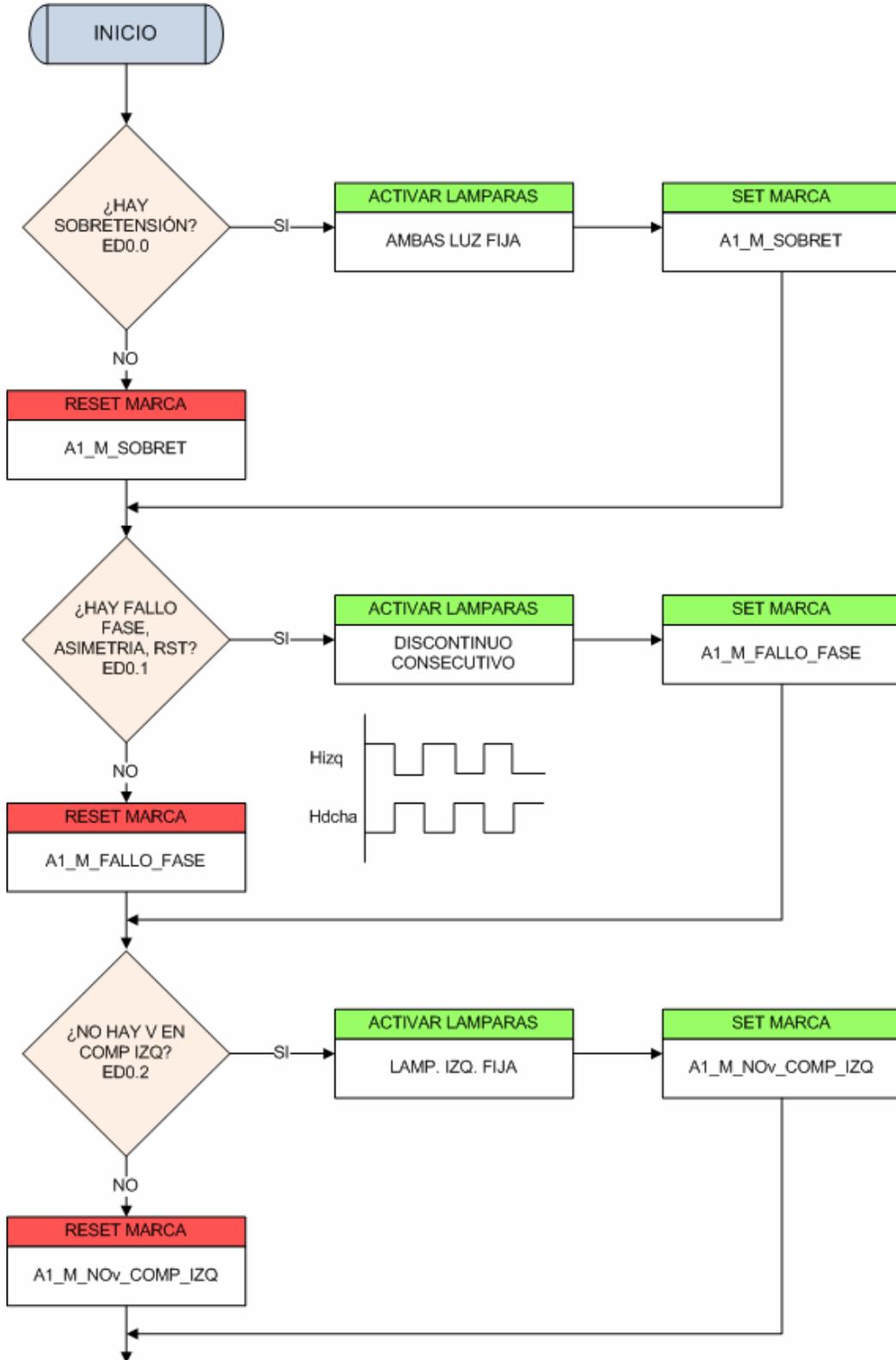
### • Intrusismo

Se entiende por intrusismo la apertura no autorizada del armario de la estación remota. La forma de detectar esta acción es mediante un final de carrera colocado en la puerta del armario de forma que cuando esta se abre da la señal de intrusismo (A1\_M\_INTRUSO). En el interior del armario existe un interruptor-cerraja para inhabilitar la señal de intrusismo (A1\_M\_NO\_INTRUSO). Todo el personal de mantenimiento debe llevar consigo la llave que permite la desactivación del intrusismo, identificando así que la apertura del armario está autorizada. Dispone para ello de un tiempo predeterminado de 10 segundos.

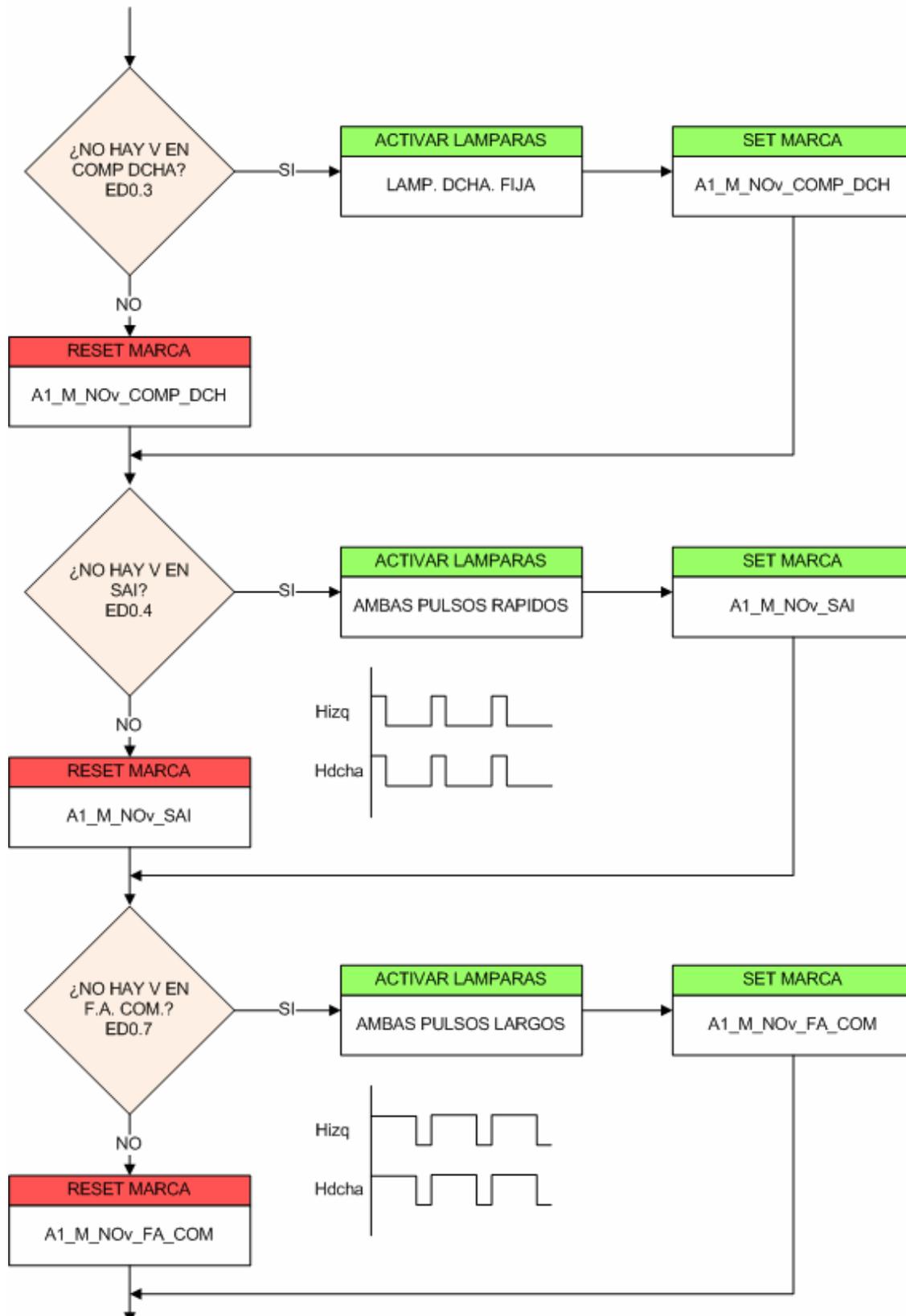
Las señales relacionadas con el intrusismo siguen una estructura diferente ya que conllevan una temporización. En el momento en que hay un flanco en la señal de intruso se inicia una temporización de 10 segundos. Si durante ese tiempo no hay una identificación mediante la señal "no intruso" se activará la marca A1\_M\_INTRUSO. La señal se enviará al Centro de Control y se saltará el resto de programa.

Se expone a continuación el diagrama de flujo de la función FC10:

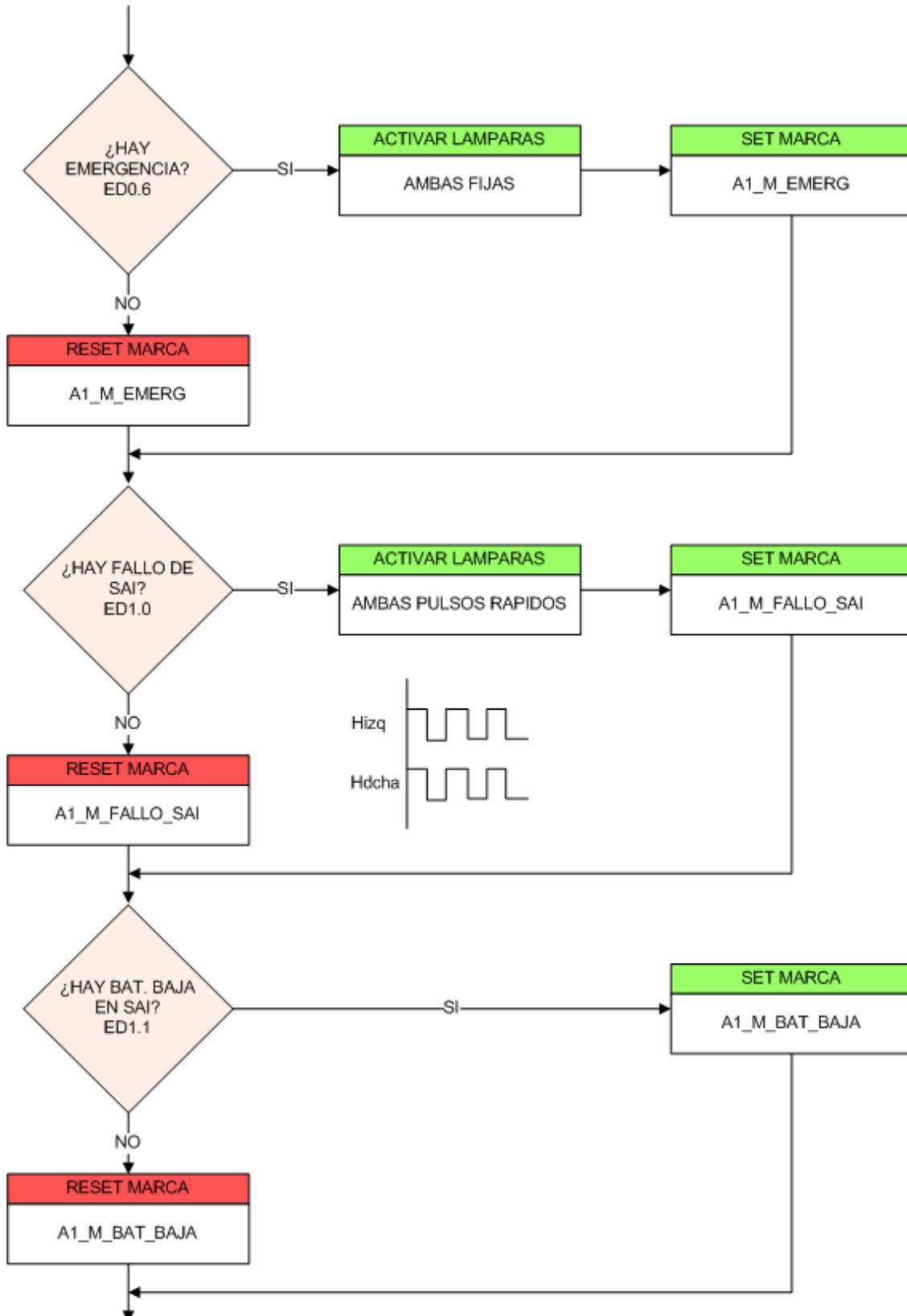
## Función FC10 Fallos, emergencias e intrusismos. 1/6.



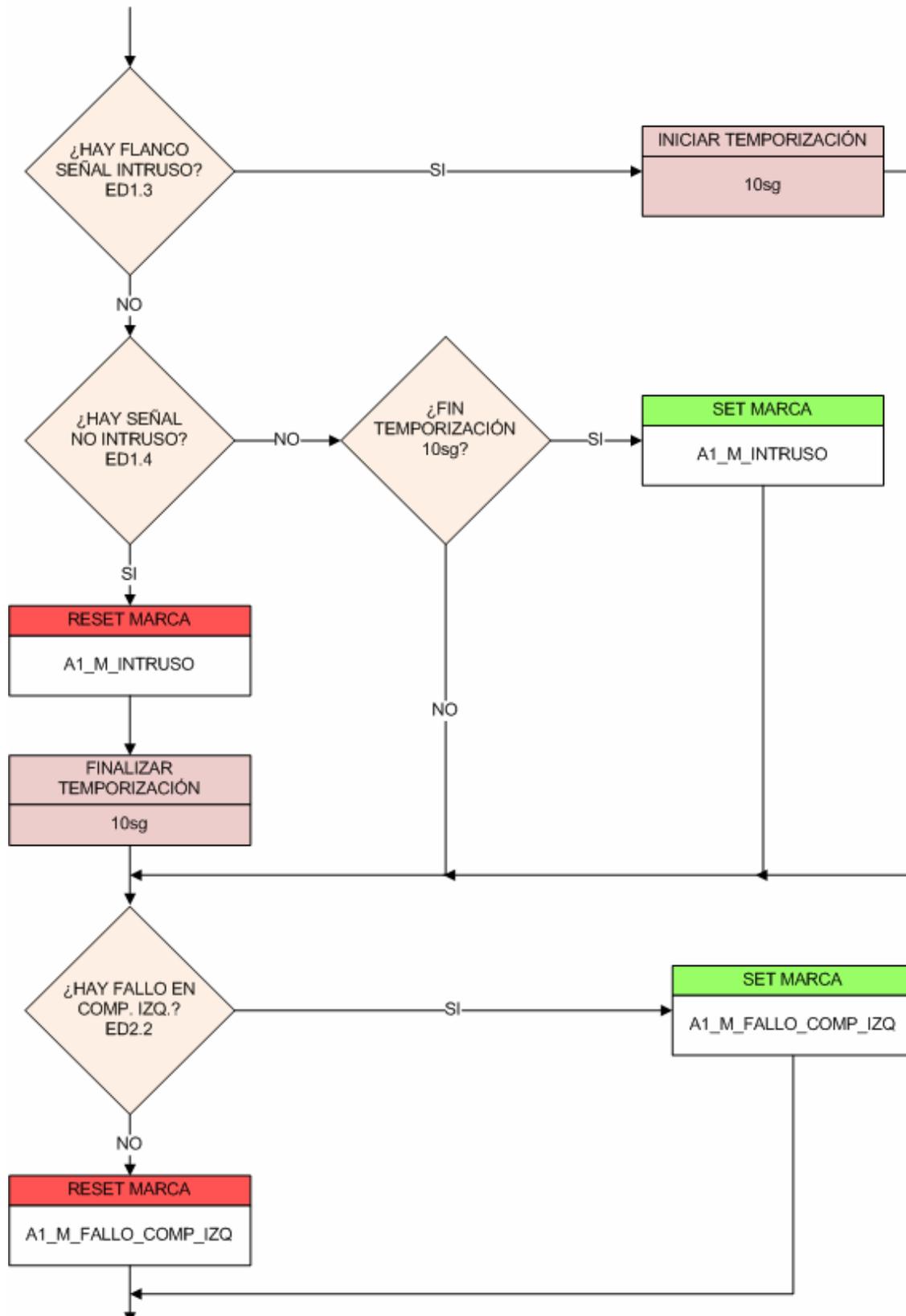
## Función FC10 Fallos, emergencias e intrusismos. 2/6.



## Función FC10 Fallos, emergencias e intrusismos. 3/6.

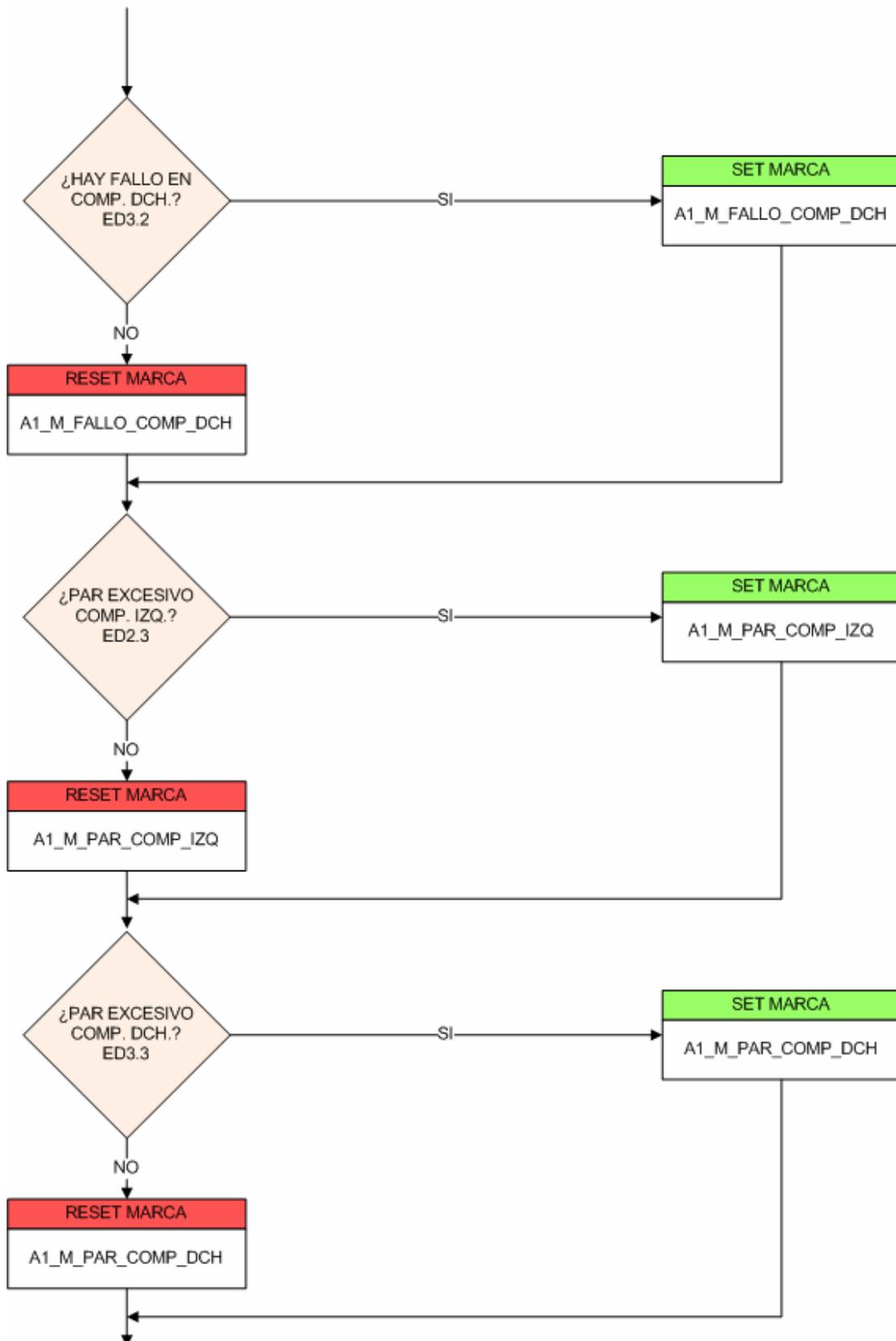


## Función FC10 Fallos, emergencias e intrusismos. 4/6.

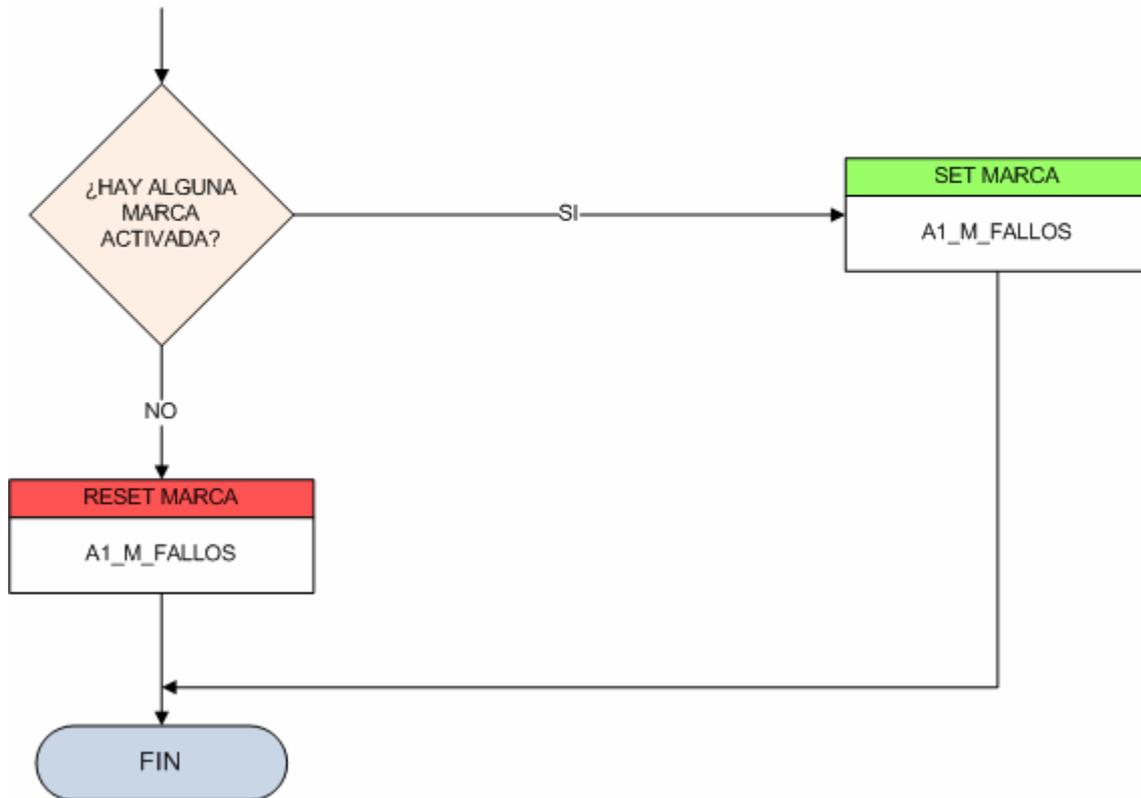


## Función FC10

### Fallos, emergencias e intrusismos. 5/6.



## Función FC10 Fallos, emergencias e intrusismos. 6/6.



### 6.2.3- FC20, COMPROBACIÓN DE SEÑALES.

La FC20 está destinada a la obtención de los estados de las compuertas de las almenaras. Se añaden además la comprobación de defectos de apertura y cierre y la verificación de los valores obtenidos por las entradas analógicas.

La función se divide en tres secciones; estados y defectos de la compuerta izquierda, estados y defectos de la compuerta derecha y conversión de las señales analógicas y comprobación de las mismas.

#### ● Estados

En la comprobación de señales digitales para la obtención de los estados de las compuertas se asocian dos marcas de memoria a las entradas digitales que indican el estado automático de las compuertas. De esta manera se descarta entre modo automático y modo manual. Como físicamente solo se puede elegir entre estos dos estados solo es necesario señalar uno de ellos. Ver planos 110 a 114. Por lo tanto si está activada la entrada ED1.5 significará que la compuerta izquierda estará en automático y se activará la marca A1\_M\_AUTO\_IZQ. En caso contrario se borra esta variable y se activa la marca A1\_M\_MAN\_IZQ.

De igual forma se comprueban las posiciones de compuerta abierta o cerrada. En este caso el actuador señala cuando la compuerta ha llegado a abrirse totalmente o cerrarse totalmente, mediante una señal para abierta y otra para cerrada. ED2.0 y ED2.1 para la compuerta izquierda. Se tiene en cuenta en este caso que mientras la compuerta se mueve el actuador da un señal, "maniobrando", que indica el movimiento de la compuerta. Por tanto cuando la compuerta llega a fin de movimiento se borra la marca asociada a la señal maniobrando A1\_M\_COMP\_MANIO\_IZQ.

#### ● Defectos

La señal "maniobrando" se utiliza en la comprobación del defecto de apertura o cierre de la compuerta. Se entiende por defecto al fallo de una señal vigilada por tiempo, es decir, el defecto de apertura de la compuerta consiste en la vigilancia de la apertura de la misma mediante temporización. Durante la puesta en marcha se estima el tiempo que necesita la compuerta en abrirse desde que esta cerrada hasta su apertura máxima. Luego por programa se vigila este tiempo, si hay orden de abrir y la compuerta tarda más del tiempo estimado en abrirse significa que existe un fallo. A esto se le llama defecto de apertura. El caso del cierre es idéntico.

El diagrama de flujo de este sistema de seguridad es el siguiente.

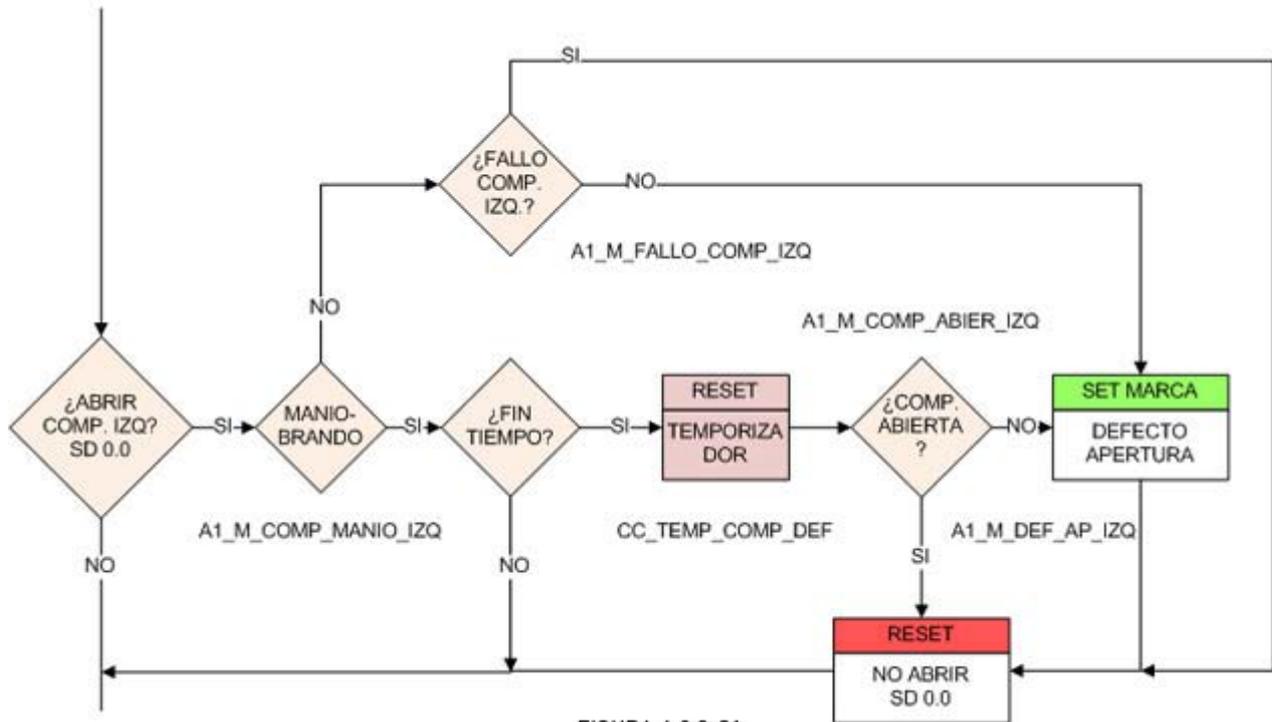


FIGURA 6.2.3-01  
- FRAGMENTO DEL DIAGRAMA DE BLOQUES DONDE SE COMPRUEBA EL DEFECTO DE APERTURA.

Se comprueba la señal de salida que activa la apertura directa de la compuerta, si está activada y además está en movimiento el actuador, señal maniobrando, se comprueba la temporización. Si la temporización ha terminado y la compuerta no ha llegado a su tope se marca el defecto de apertura A1\_M\_DEF\_AP\_IZQ y se detiene la orden de abrir. Si existe orden de abrir pero no hay movimiento puede ser porque exista una señal digital de fallo (ED2.2), que queda reflejada en la marca A1\_M\_FALLO\_COMP\_IZQ, en ese caso se detiene la orden de abrir.

Los defectos son enviados al Centro de Control en la rutina de comunicaciones. Al tratarse de una señal de seguridad secundaria no detiene la ejecución del programa. El defecto de una compuerta no impide el funcionamiento de la otra. Sin embargo estas señales solo pueden ser acusadas y resetadas desde el Centro de Control o mediante el terminal de mantenimiento.

La estructura de los diagramas de flujo es idéntica para el caso de la compuerta izquierda y la compuerta derecha.

### • Comprobación de señales analógicas

En el caso de las señales analógicas se comprueban los valores anómalos que estas puedan dar y el caso de la rotura del cable de la señal. Para determinar estos fallos es necesario convertir el valor de la señal analógica a valores a manejar en el proyecto, es decir, en el caso de las entradas analógicas destinadas a la medición del nivel se debe convertir los valores comprendidos entre 4 y 20mA en valores de nivel de fluido. En el caso de señales de posición entre 0 y 100% de apertura por ejemplo.

Para realizar esta conversión los autómatas Siemens de la gama S7-300 disponen de una función específica para el escalado de señales analógicas. Dicha función es la FC105 "SCALE".

### ● Funcion FC105 scale

La función "Escalar valores" (SCALE) toma un valor entero en la entrada IN y lo convierte en un valor real, convirtiéndolo a escala en un rango comprendido entre un límite inferior y un límite superior (LO\_LIM y HI\_LIM). El resultado se escribe en la salida OUT. La función SCALE aplica la fórmula siguiente:

$$OUT = [ ((FLOAT (IN) - K1)/(K2-K1)) * (HI\_LIM-LO\_LIM)] + LO\_LIM$$

Las constantes K1 y K2 se aplican de forma diferente, dependiendo de si el valor de entrada es BIPOLAR o UNIPOLAR.

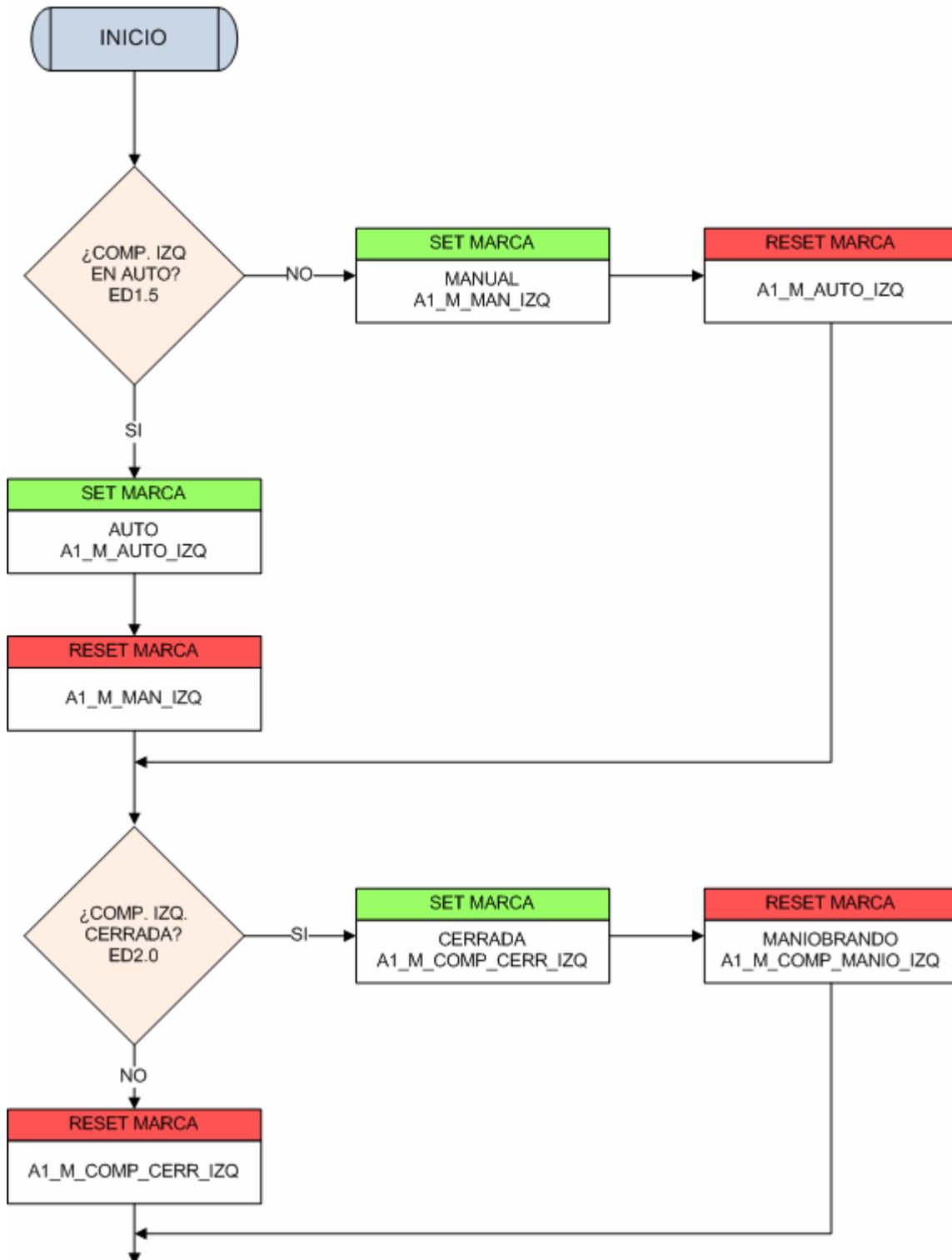
- BIPOLAR: Se supone que el valor entero de entrada debe estar entre -27648 y 27648, por lo tanto, K1 = -27648.0 y K2 = +27648.0
- UNIPOLAR: Se supone que el valor entero de entrada debe estar entre 0 y 27648, por lo tanto, K1 = 0.0 y K2 = +27648.0

Se puede efectuar la conversión escalar inversa programando los límites de tal forma que el límite inferior sea mayor que el límite superior (LO\_LIM > HI\_LIM). En la conversión escalar inversa el valor de la salida disminuye cuando aumenta el valor de la entrada.

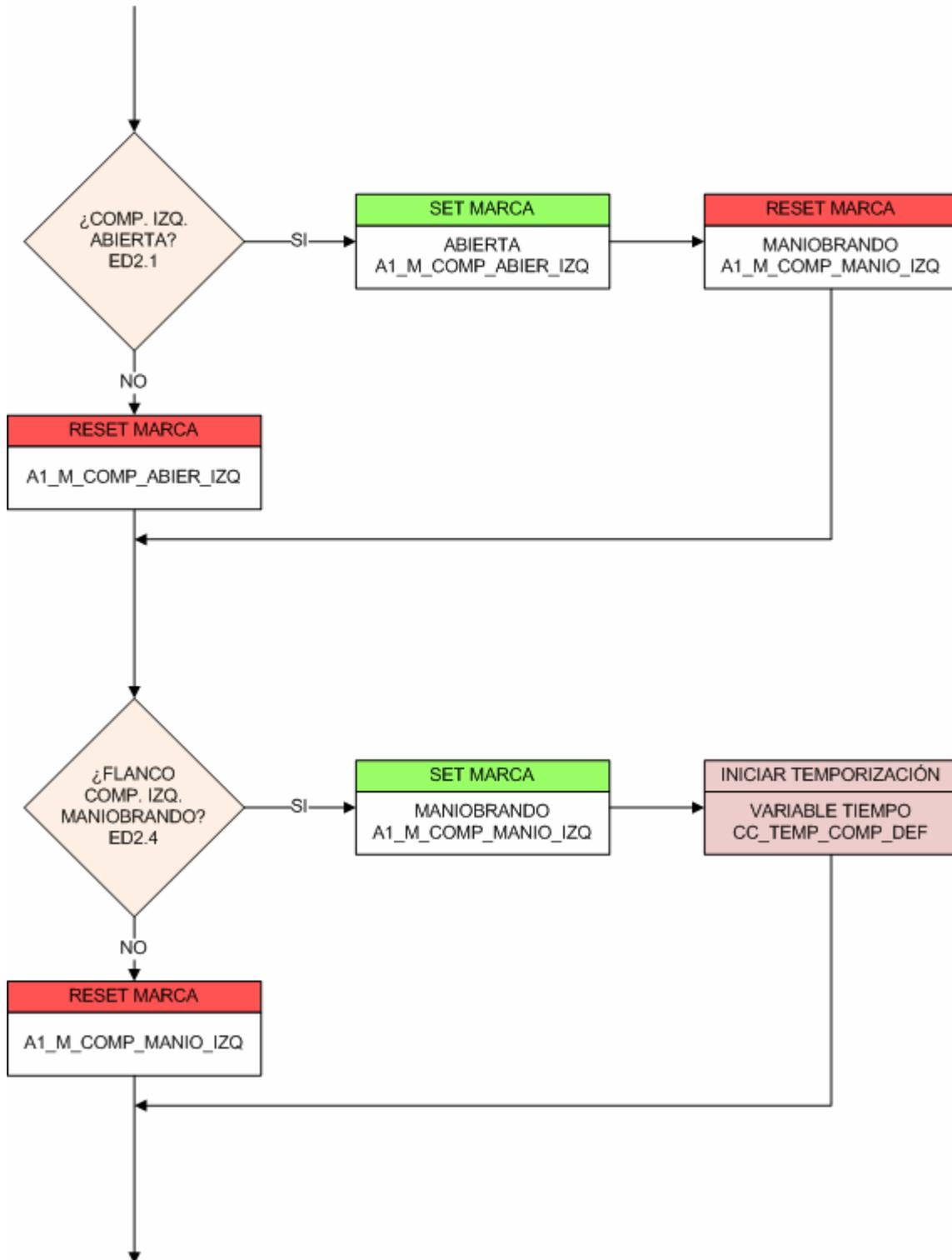
Una vez obtenido el valor convertido o valor de salida la comprobación del hilo roto se consigue gracias a la elección de señal analógica de corriente 4-20mA, donde 4mA corresponde al mínimo valor a medir por lo que si se obtienen 0mA, hilo roto, el escalado dará un valor negativo.

Si los valores de salida obtenidos están por encima o por debajo de los establecidos por las consignas de máximo y mínimo (HI\_LIM, LO\_LIM) se consideran anómalos.

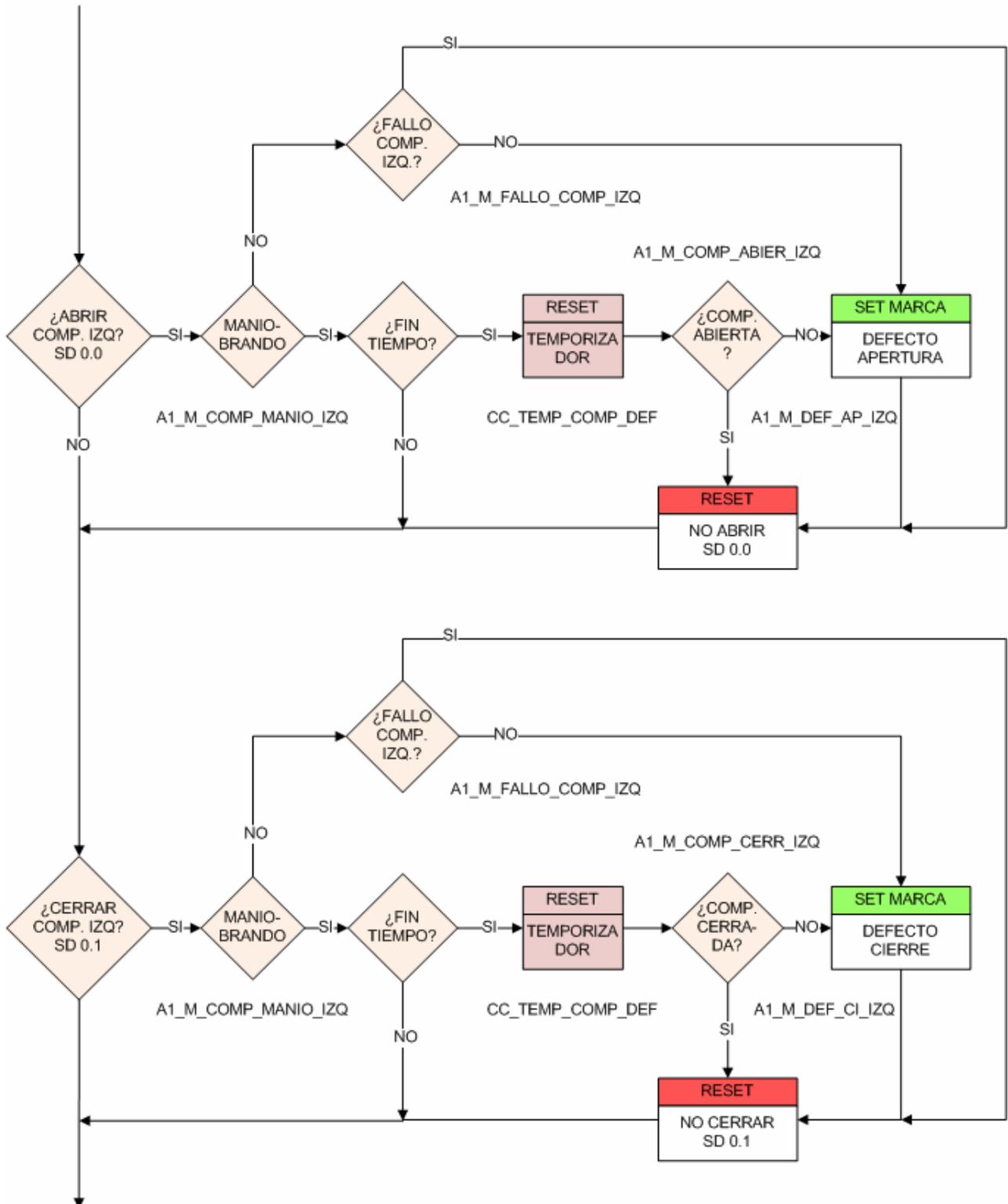
## FC20 Comprobación de señales. 1/9



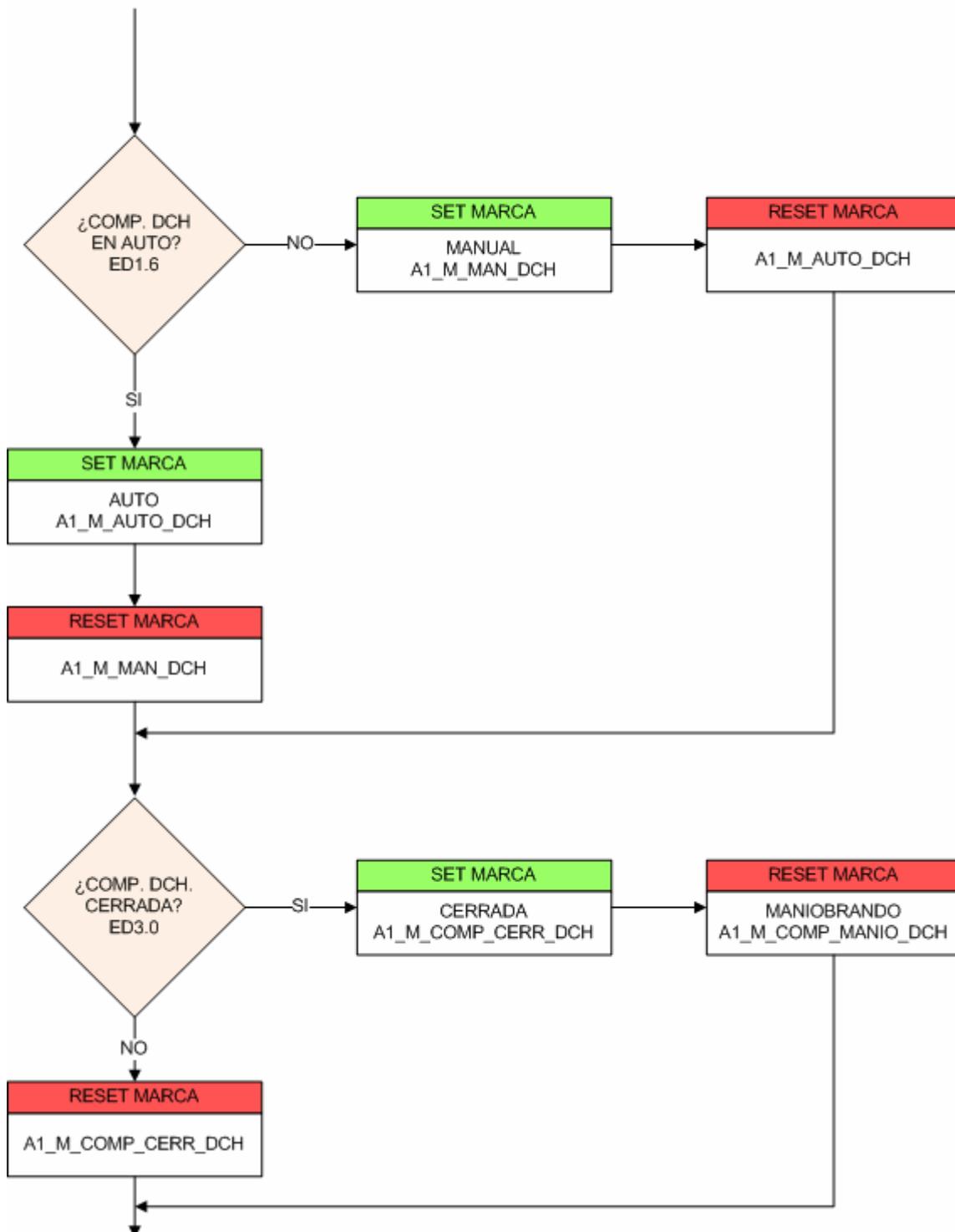
## FC20 Comprobación de señales. 2/9



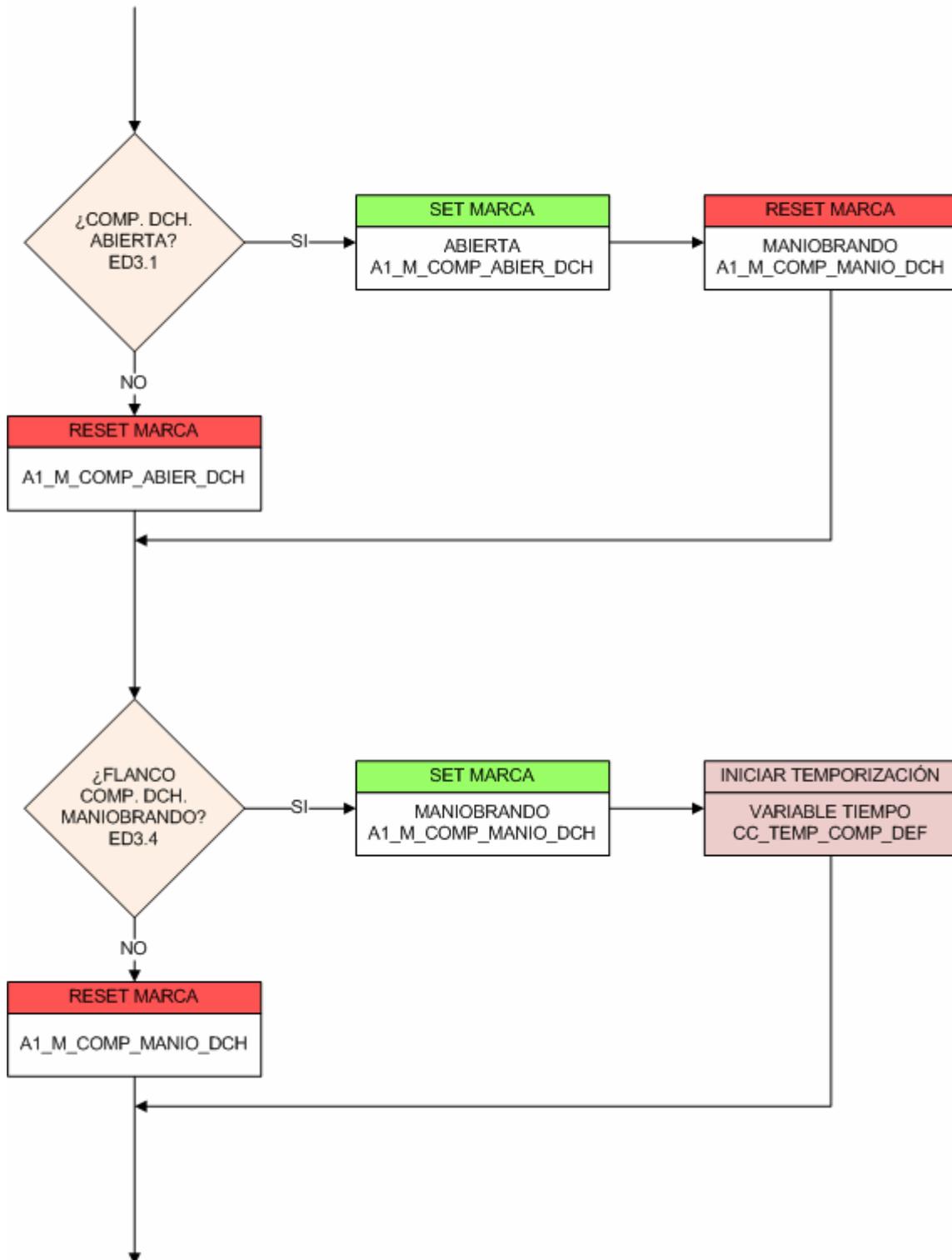
## FC20 Comprobación de señales. 3/9



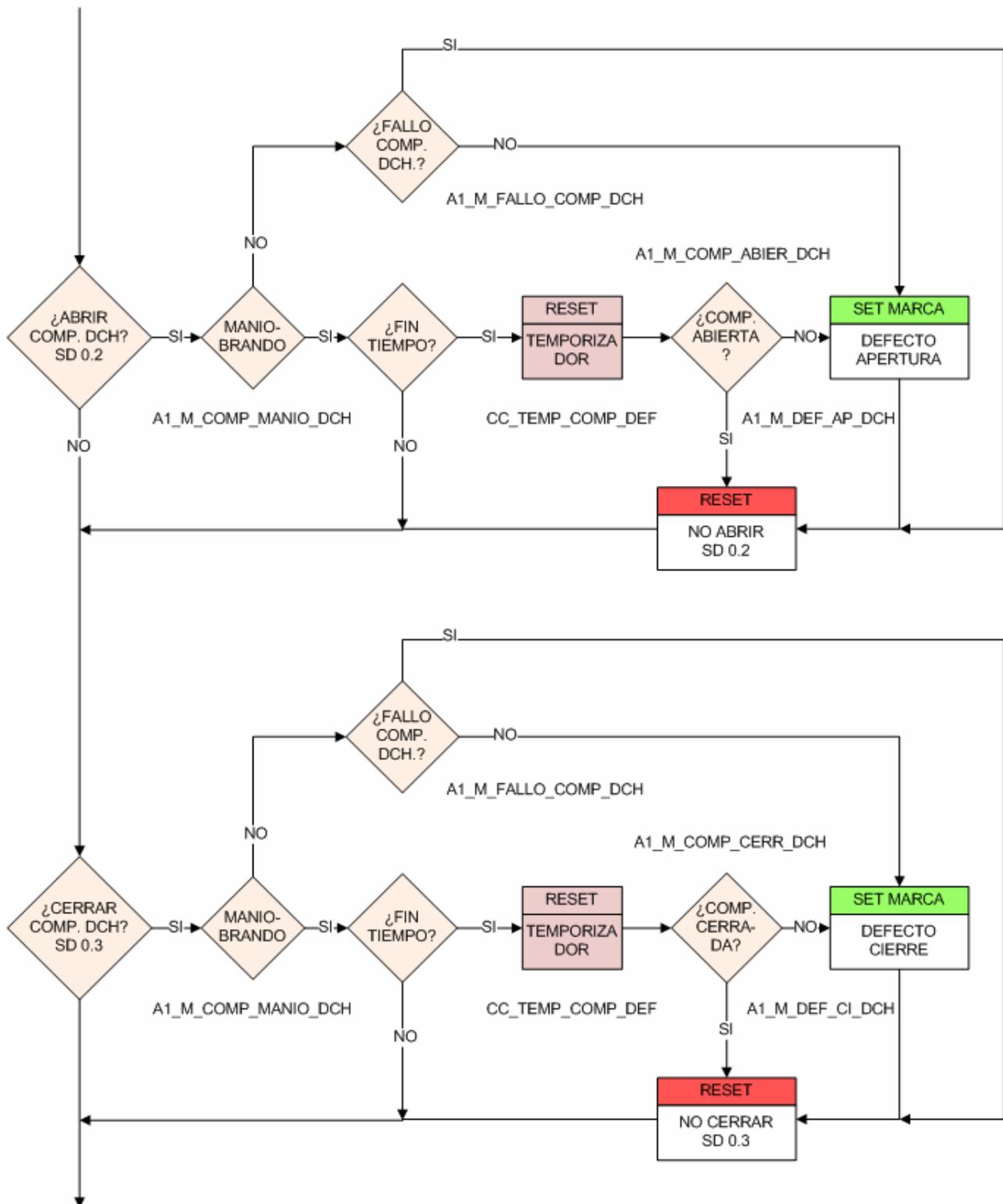
## FC20 Comprobación de señales. 4/9



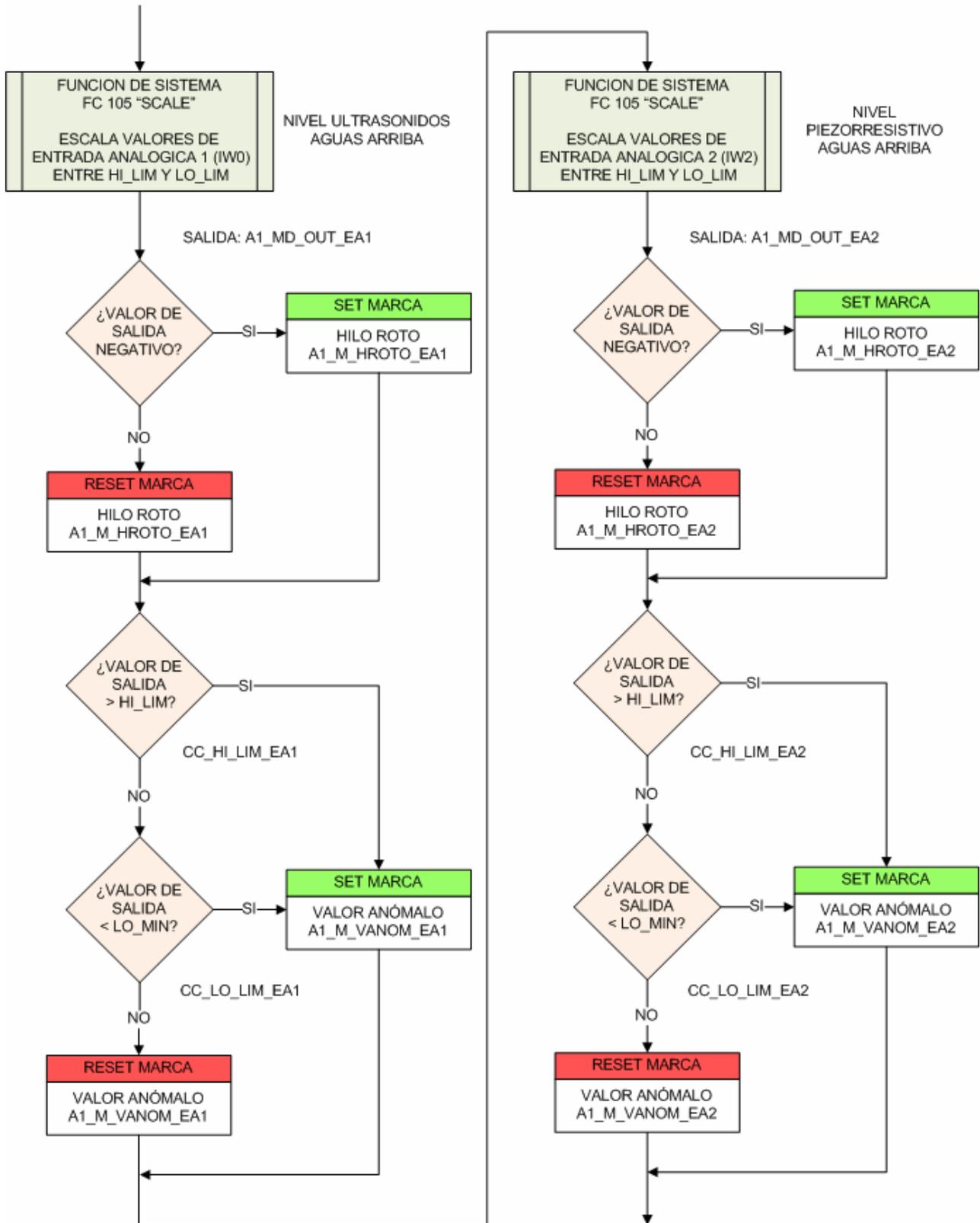
## FC20 Comprobación de señales. 5/9



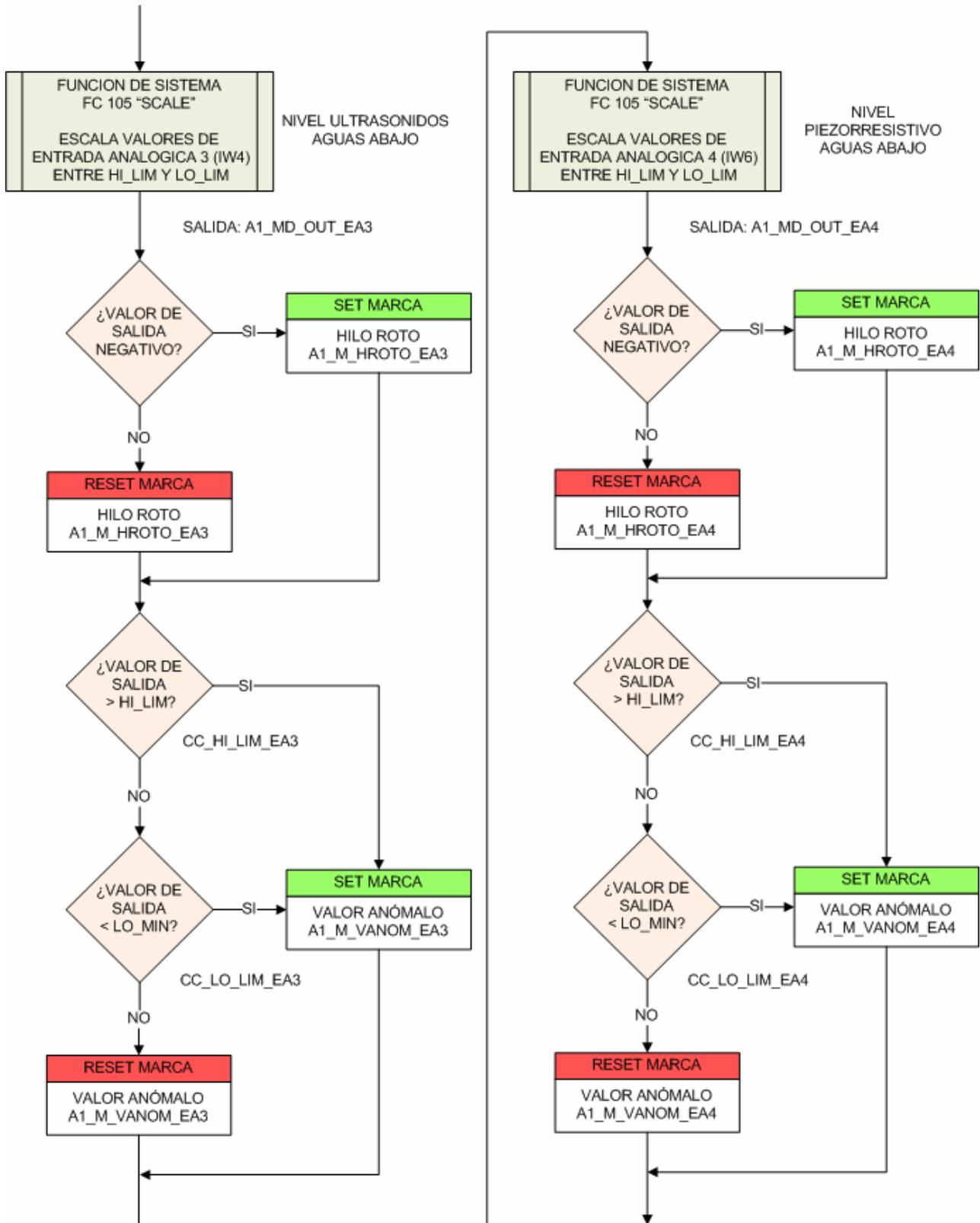
## FC20 Comprobación de señales. 6/9



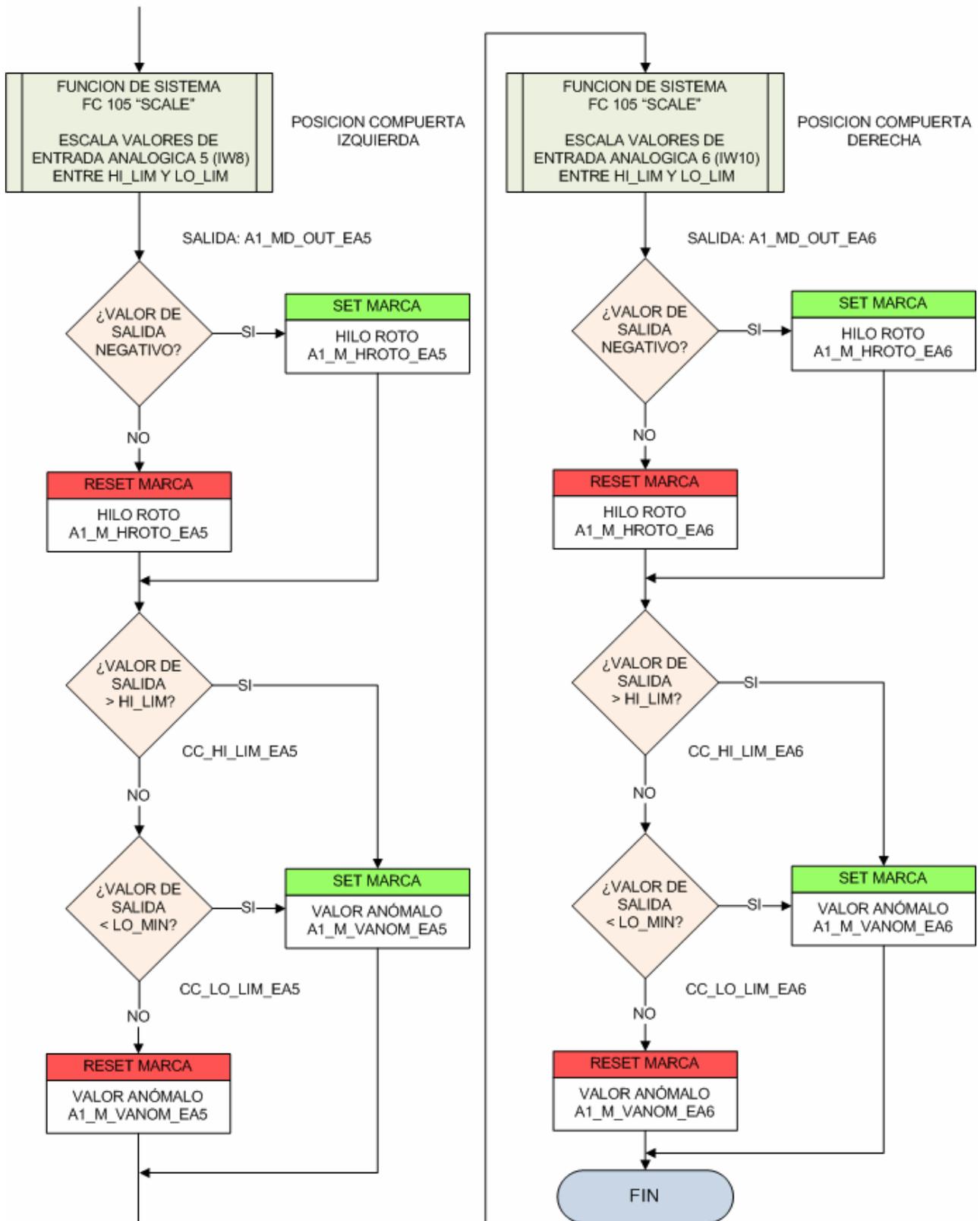
## FC20 Comprobación de señales. 7/9



## FC20 Comprobación de señales. 8/9



## FC20 Comprobación de señales. 9/9



## 6.2.4- FC30, LECTURA DE NIVELES.

Esta función realiza la lectura de los niveles aguas arriba y aguas abajo de la almenara. Debido a la redundancia de medida es necesario realizar un cálculo y una vigilancia de valores para obtener una medida de nivel correcta.

La función esta dividida en dos partes. Se tratan primero los valores relativos a aguas arriba de la almenara y posteriormente se trabaja con los valores aguas abajo.

La medida de nivel se obtiene de la media aritmética del valor medido en ambos sensores de nivel, ultrasónico y piezorresistivo. Antes de realizar esta media se comprueba que la diferencia medida por ambos, la banda muerta, no exceda el valor consignado desde Centro de Control.

### • Banda muerta

Como medida de seguridad para cerciorarse del correcto funcionamiento de los sensores de medida se establece una banda muerta de nivel, es decir, si la diferencia entre ambas medidas (ultrasonidos – piezorresistivo) supera un determinado valor significará que uno de los dos sensores está funcionando incorrectamente, bien por una descalibración o por una avería. El valor de la banda muerta se decide en el Centro de Control. Si el cálculo de banda muerta supera el valor consignado se activa la marca A1\_M\_BM\_SUP y el programa debe elegir entre uno de los sensores para asumir su medida como medida de nivel aguas arriba. La variable que determina qué sensor se elige como valido es CC\_EA\_AARR, consigna de entrada analógica para aguas arriba. Esta variable que se establece en el Centro de Control determinará el sensor del cual se tomará la medida de nivel.

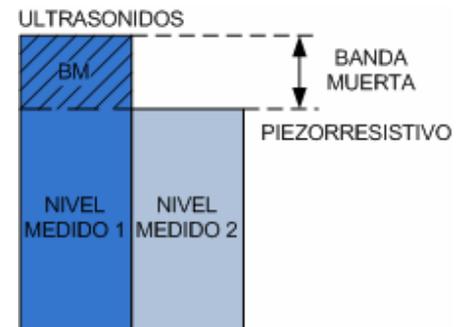


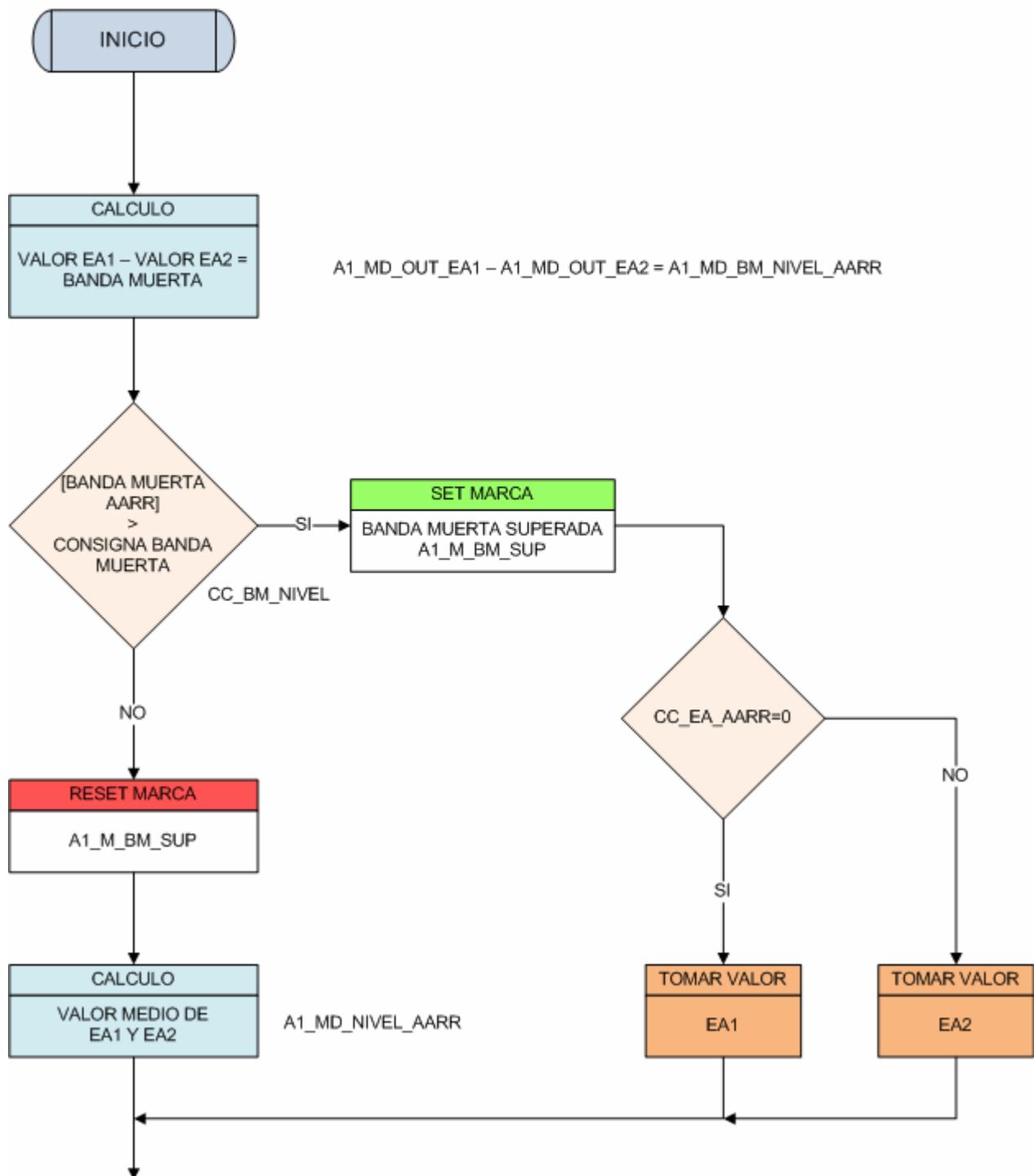
FIGURA 6.2.4-01  
- BANDA MUERTA EN LA LECTURA DE NIVELES.

Valor de CC_EA_AARR	Sensor
0	Ultrasonidos
1	Piezorresistivo

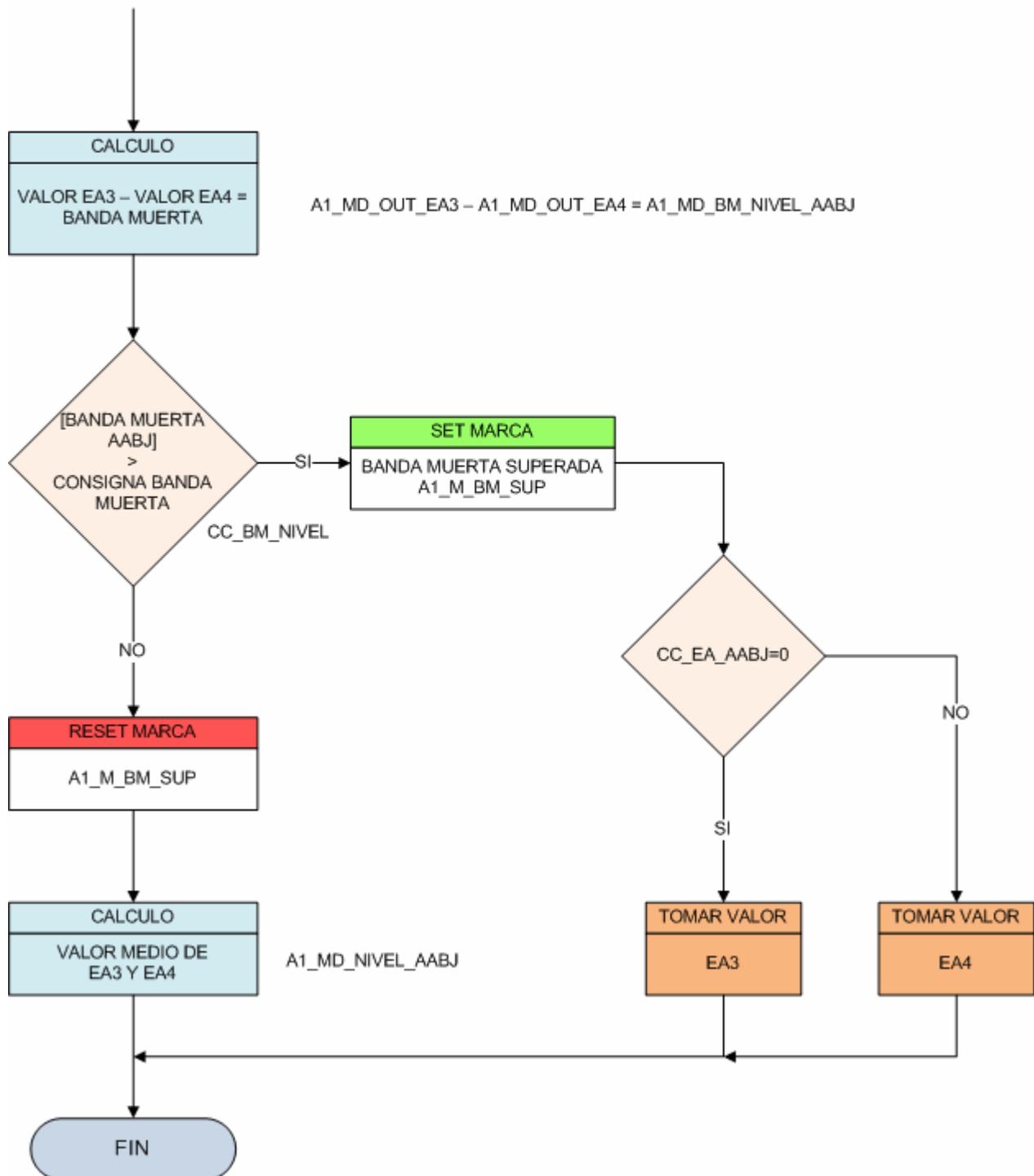
El funcionamiento para la medida de nivel aguas abajo es idéntico al funcionamiento de la medida de nivel aguas arriba. En este caso la variable que determina el sensor es CC\_EA\_AABJ.

El diagrama de flujo es el siguiente:

## FC30 Lectura de niveles. 1/2



## FC30 Lectura de niveles. 2/2



## 6.2.5- FC40 COMUNICACIONES.

Primero, pasamos a describir detalladamente los datos que son necesarios tanto enviar como recibir, desde la estación remota almenara.

### • Datos a enviar por la Estación Remota Almenara al Centro de Control.

#### FALLOS

La estación Remota Almenara envía al Centro de Control 2 bytes de Fallos, de esta forma el personal de mantenimiento puede averiguar rápidamente la causa de los posibles fallos. En estos 2 bytes hay información sobre los fallos eléctricos de sobretensiones, accionamiento de distintos dispositivos y señales de intrusismo y emergencia.

FALLOS		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
M 0.0	SOBRETENSION 400VAC	A1_M_SOBRET
M 0.1	FALLO FASE/ASIMETRIA/NO R-S-T	A1_M_FALLO_FASE
M 0.2	DISYUNTOR COMPUERTA IZQ	A1_M_NOv_COMP_IZQ
M 0.3	DISYUNTOR COMPUERTA DCHA	A1_M_NOv_COMP_DCH
M 0.4	DISYUNTOR S.A.I.	A1_M_NOv_SAI
M 0.5	DISYUNTOR FUENTE ALIMENTACION	A1_M_NOv_FA
M 0.6	SEÑAL DE EMERGENCIA	A1_M_EMERG
M 0.7	DISYUNTOR F.A. COMUNICACIONES	A1_M_NOv_FA_COM
M 1.0	FALLO EN S.A.I.	A1_M_FALLO_SAI
M 1.1	BATERIA BAJA EN S.A.I.	A1_M_BAT_BAJA
M 1.2	S.A.I. EN MODO BATERIA	A1_M_MODO_BAT
M 1.3	SEÑAL DE INTRUSISMO	A1_M_INTRUSO

#### ESTADOS

Mediante el envío de estos 2 bytes se obtiene el estado de las compuertas de las almenaras. El primer byte corresponde a la compuerta izquierda y el segundo a la compuerta derecha.

ESTADOS		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
M 2.0	COMPUERTA IZQ. CERRADA	A1_M_COMP_CERR_IZQ
M 2.1	COMPUERTA IZQ. ABIERTA	A1_M_COMP_ABIER_IZQ
M 2.2	FALLO EN COMPUERTA IZQ.	A1_M_FALLO_COMP_IZQ
M 2.3	PAR SOBREPASADO EN COMP. IZQ.	A1_M_PAR_COMP_IZQ
M 2.4	COMPUERTA IZQ. MANIOBRANDO	A1_M_COMP_MANIO_IZQ
M 2.5	COMPUERTA IZQ. EN MANUAL	A1_M_MAN_IZQ
M 2.6	COMPUERTA IZQ. EN AUTOMATICO	A1_M_AUTO_IZQ
M 3.0	COMPUERTA DCHA. CERRADA	A1_M_COMP_CERR_DCH
M 3.1	COMPUERTA DCHA. ABIERTA	A1_M_COMP_ABIER_DCH
M 3.2	FALLO EN COMPUERTA DCHA.	A1_M_FALLO_COMP_DCH
M 3.3	PAR SOBREPASADO EN COMP. DCHA.	A1_M_PAR_COMP_DCH
M 3.4	COMPUERTA DCHA. MANIOBRANDO	A1_M_COMP_MANIO_DCH
M 3.5	COMPUERTA DCHA. EN MANUAL	A1_M_MAN_DCH
M 3.6	COMPUERTA DCHA. EN AUTOMATICO	A1_M_AUTO_DCH

#### DEFECTOS

Se envían 2 bytes al Centro de Control. Mediante este envío se detectan defectos en el sistema, entendiendo por defecto el fallo de una señal vigilada por tiempo.

DEFECTOS		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
M 4.0	DEFECTO APERTURA IZQ	A1_M_DEF_AP_IZQ
M 4.1	DEFECTO CIERRE IZQ	A1_M_DEF_CI_IZQ
M 4.2	DEFECTO APERTURA DCH	A1_M_DEF_AP_DCH
M 4.3	DEFECTO CIERRE DCH	A1_M_DEF_CI_DCH
M 4.4	HILO ROTO EA 1	A1_M_HROTO_EA1
M 4.5	VALOR ANOMALO EA 1	A1_M_VANOM_EA1
M 4.6	HILO ROTO EA 2	A1_M_HROTO_EA2
M 4.7	VALOR ANOMALO EA 2	A1_M_VANOM_EA2
M 5.0	HILO ROTO EA 3	A1_M_HROTO_EA3
M 5.1	VALOR ANOMALO EA 3	A1_M_VANOM_EA3
M 5.2	HILO ROTO EA 4	A1_M_HROTO_EA4
M 5.3	VALOR ANOMALO EA 4	A1_M_VANOM_EA4
M 5.4	HILO ROTO EA 5	A1_M_HROTO_EA5
M 5.5	VALOR ANOMALO EA 5	A1_M_VANOM_EA5
M 5.6	HILO ROTO EA 6	A1_M_HROTO_EA6
M 5.7	VALOR ANOMALO EA 6	A1_M_VANOM_EA6

## CONVERSIONES

Conversiones usadas por el Centro de Control para realizar cálculos, se envían 18 DWords.

CONVERSIONES		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD6	VALOR DECIMAL ESCALADO EA1	A1_MD_OUT_EA1
MD10	VALOR DECIMAL ESCALADO EA2	A1_MD_OUT_EA2
MD14	VALOR DECIMAL ESCALADO EA3	A1_MD_OUT_EA3
MD18	VALOR DECIMAL ESCALADO EA4	A1_MD_OUT_EA4
MD22	VALOR DECIMAL ESCALADO EA5	A1_MD_OUT_EA5
MD26	VALOR DECIMAL ESCALADO EA6	A1_MD_OUT_EA6
MD30	LIMITE SUPERIOR EA1	A1_MD_HI_LIM_EA1
MD34	LIMITE INFERIOR EA1	A1_MD_LO_LIM_EA1
MD38	LIMITE SUPERIOR EA2	A1_MD_HI_LIM_EA2
MD42	LIMITE INFERIOR EA2	A1_MD_LO_LIM_EA2
MD46	LIMITE SUPERIOR EA3	A1_MD_HI_LIM_EA3
MD50	LIMITE INFERIOR EA3	A1_MD_LO_LIM_EA3
MD54	LIMITE SUPERIOR EA4	A1_MD_HI_LIM_EA4
MD58	LIMITE INFERIOR EA4	A1_MD_LO_LIM_EA4
MD62	LIMITE SUPERIOR EA5	A1_MD_HI_LIM_EA5
MD66	LIMITE INFERIOR EA5	A1_MD_LO_LIM_EA5
MD70	LIMITE SUPERIOR EA6	A1_MD_HI_LIM_EA6
MD74	LIMITE INFERIOR EA6	A1_MD_LO_LIM_EA6

## NIVELES

Se envían 5 DWords con la lectura de los niveles aguas arriba y aguas abajo de la almenara. Estas medidas son necesarias para realizar cálculos y vigilancia del nivel.

NIVELES		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD78	BANDA MUERTA NIVEL AGUAS ARRIBA	A1_MD_BM_NIVEL_AARR
MD82	BANDA MUERTA NIVEL AGUAS ABAJO	A1_MD_BM_NIVEL_AABJ
MD86	VALOR MEDIO EA1 Y EA2	A1_MD_NIVEL_AARR
MD90	VALOR MEDIO EA3 Y EA4	A1_MD_NIVEL_AABJ
M 94.0	BANDA MUERTA NIVEL SUPERADA	A1_M_BM_SUP

## ALARMAS

Se envía 1 byte de alarmas al Centro de Control.

ALARMAS		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
M 95.0	ALARMA NIVEL MINIMO	A1_M_ALARM_NMIN
M95.1	ALARMA NIVEL MAXIMO	A1_M_ALARM_NMAX
M95.2	CERRAR COMPUERTAS	A1_M_CERRAR
M95.3	ABRIR COMPUERTAS	A1_M_ABRIR

## DATOS DE REGULACION

Se envían 9 DWords al Centro de Control, con estos datos se realiza la regulación del sistema.

DATOS DE REGULACION		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD104	ERROR CALCULADO	A1_MD_ERROR
MD108	VALOR CONSTANTE DERIVATIVA KD	A1_MD_KD
MD112	VALOR CONSTANTE PROPORCIONAL KP	A1_MD_KP
MD116	VALOR CONSTANTE INTEGRAL KI	A1_MD_KI
MD120	CALCULO INTEGRAL	A1_MD_INTEGRAL
MD124	CALCULO ACCION	A1_MD_ACCION
MD128	VALOR ACCION ESCALADO SA	A1_MD_ACCION_ESCALADO
MD132	LIMITE SUPERIOR SA	A1_MD_HI_LIM_SA
MD136	LIMITE INFERIOR SA	A1_MD_LO_LIM_SA

## • Datos a recibir en la Estación Remota Almenara desde el Centro de Control

### PARÁMETROS DE TIEMPO DE DEFECTO

Recibe 1 DWord.

PARAMETROS DE TIEMPO DE DEFECTO		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD200	TIEMPO PARA DETERMINAR DEFECTO	CC_Ax_MD_TEMP_COMP_DEF

### PARÁMETROS DE NIVEL

Recibe 12 DWords.

PARAMETROS DE NIVEL		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD224	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA1	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA1
MD228	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA1	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA1
MD232	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA2	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA2
MD236	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA2	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA2
MD240	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA3	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA3
MD244	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA3	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA3
MD248	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA4	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA4
MD252	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA4	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA4
MD256	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA5	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA5
MD260	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA5	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA5
MD264	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA6	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA6
MD268	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA6	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA6

## CONSIGNAS DE NIVEL EN EL TRAMO

Recibe 5 DWords.

CONSIGNAS DE NIVEL EN EL TRAMO		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD220	VALOR NIVEL AGUAS ARRIBA A2	A2_MD_NIVEL_AARR
MD272	CONSIGNA LIMITE BANDA MUERTA MEDIDA NIVEL	CC_Ax_MD_BM_NIVEL
MD276	CONSIGNA DE NIVEL MINIMO EN TRAMO	CC_Ax_MD_NIVEL_MIN
MD280	CONSIGNA DE NIVEL MAXIMO EN TRAMO	CC_Ax_MD_NIVEL_MAX
MD284	CONSIGNA DE NIVEL EN TRAMO	CC_Ax_MD_CONSIGNA_NIVEL

## PARÁMETROS DE SELECCIÓN DEL SENSOR

Recibe 1 Byte.

PARAMETROS DE SELECCIÓN DEL SENSOR		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
M204.0	OPCION SENSOR ULTRASONIDOS O PIEZO AARR	CC_Ax_M_EA_AARR
M204.1	OPCION SENSOR ULTRASONIDOS O PIEZO AABJ	CC_Ax_M_EA_AABJ

## CONSTANTES DEL REGULADOR

Recibe 5 DWords, con los valores de las constantes utilizadas por el regulador.

CONSTANTES DEL REGULADOR		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD208	KP CONSTANTE PROPORCIONAL	CC_Ax_MD_CONS_KP
MD212	KI CONSTANTE INTEGRAL	CC_Ax_MD_CONS_KI
MD216	KD CONSTANTE DERIVATIVA	CC_Ax_MD_CONS_KD
MD304	h0 REFERENCIA DE NIVEL	CC_Ax_REF_NIVEL
MD308	Q0 REFERENCIA DE CAUDAL	CC_Ax_REF_CAUDAL

## PARÁMETROS DE ACCIONAMIENTO DE LA COMPUERTA

Recibe 4 DWords

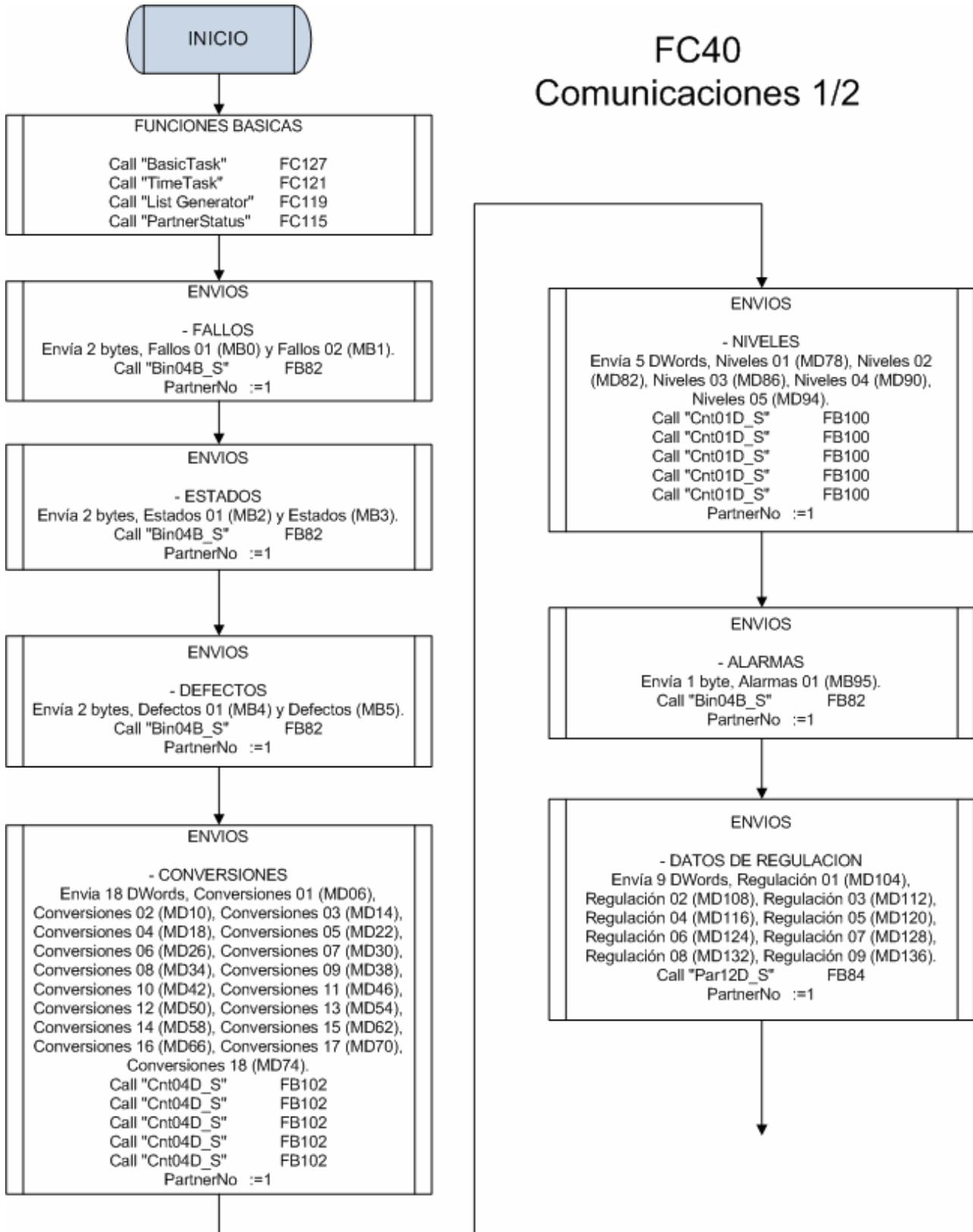
PARAMETROS DE ACCIONAMIENTO COMPUERTA		
DATO	DESCRIPCIÓN	NEMÓNICO
MD288	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR ACCION	CC_Ax_MD_ACCION_MAX
MD292	CONSIGNA LIMITE INFERIOR ACCION	CC_Ax_MD_ACCION_MIN
MD296	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR SA	CC_Ax_MD_HI_LIM_SA
MD300	CONSIGNA LIMITE INFERIOR SA	CC_Ax_MD_LO_LIM_SA

A continuación pasamos a enumerar los distintos puntos de control (Subscriber no.).

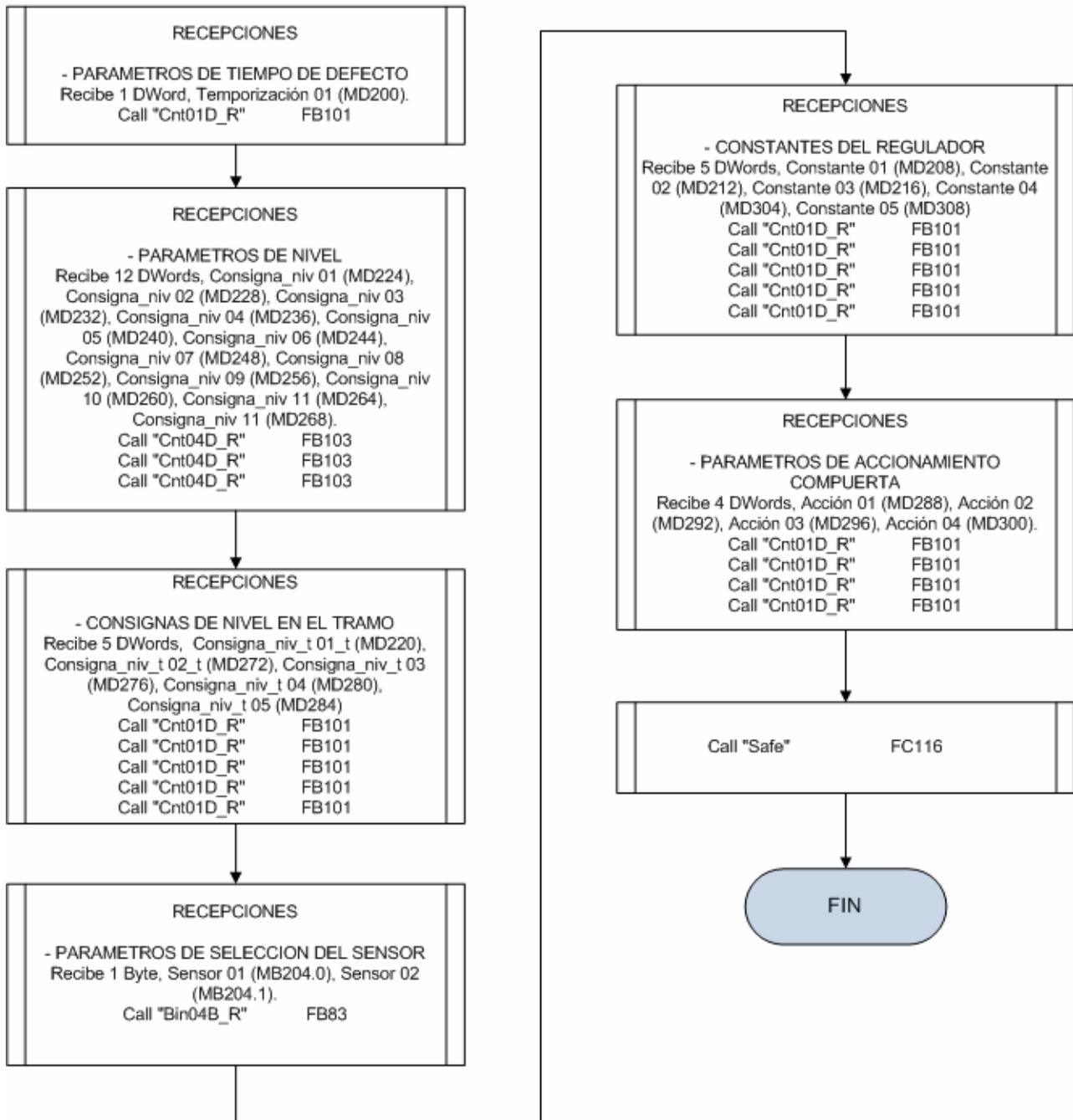
Control Central = SuscriptorNo 1  
Estación Remota Almenara 01 = SuscriptorNo 2  
Estación Remota Almenara 02 = SuscriptorNo 3

● **Función FC40 Comunicaciones para CPU de estación Almenara**

Desarrollo de la función FC40, la cual se encuentra integrada dentro del programa principal. Para consultar el programa principal acudir al apartado 6.2.1 (OB1, BLOQUE PRINCIPAL).



## FC40 Comunicaciones 2/2



Primero, se llama a una serie de funciones necesarias para el correcto funcionamiento del entorno SINAUT, para a continuación pasar a llamar a las funciones de envío. Se enviarán datos de los fallos, estados, defectos, conversiones, niveles, alarmas y datos de regulación. Una vez realizadas las llamadas a las funciones de envío se pasará a las recepciones. Se recibirán parámetros de tiempo de defecto, parámetros de nivel, consignas de nivel en el tramo, parámetros de selección del sensor, constantes del regulador y por último parámetros de accionamiento de la compuerta.

## 6.2.6- FC50, REGULADOR.

Esta es la función de regulación del sistema. Aquí se calcula la acción necesaria para que el sistema alcance el nivel consignado por el Centro de Control. La función contiene varios cálculos como son el error, los cálculos de la integral en automático y en manual, y por último la acción. Además incluye un sistema de seguridad frente a desbordamiento o rotura del canal.

### • Sistemas de seguridad por niveles aguas arriba y abajo de la almenara

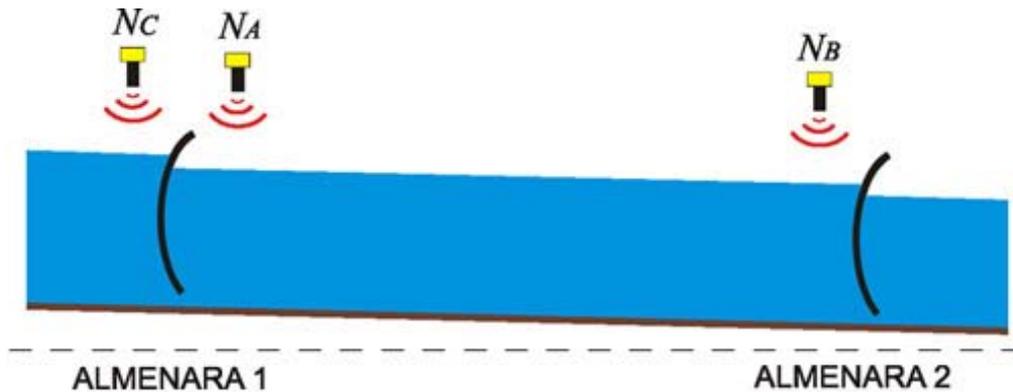


FIGURA 6.2.6-01  
- TRAMO DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA. POSICIÓN DE LOS SENSORES DE NIVEL.

Los controles del nivel aguas arriba  $N_c$  y  $N_b$  tienen la siguiente función:

- Control superior, si se supera el nivel establecido como límite máximo se abre la compuerta. Permite el funcionamiento desde aguas arriba e impide posibles desbordamientos.
- Control inferior, si el calado descende por debajo del nivel prefijado la compuerta se cierra. Este nivel de seguridad impide el vaciado del canal aguas arriba de la compuerta y en caso de rotura del canal en el tramo precedente evita que se produzcan flujos en sentido contrario.

El control del nivel aguas abajo  $N_a$  determina el cierre de la compuerta si el calado descende por debajo de un nivel establecido. Se trata de un sistema de seguridad que cierra la compuerta ante previsible anomalías como roturas en el canal en el tramo aguas abajo de la compuerta. Lógicamente este nivel prefijado será situado a escaso calado.

### • Implementación Programada Del Regulador.

Como se ha visto anteriormente la mejor forma de regular el Tramo de la Infraestructura Hidráulica es mediante un regulador proporcional integral, ver el capítulo 4, apartado 4.3 – CONTROL DEL SISTEMA MEDIANTE REGULADOR en la sección *Comportamiento del sistema tramo de la infraestructura hidráulica con un regulador proporcional integral*. Sin embargo para permitir todos los ajustes posibles se va a implementar un regulador PID.

La forma del regulador en el campo transformado de Laplace es tal que:

$$R(s) = K_{pid} \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (6.1)$$

Pero es necesario extrapolar estas expresiones a un lenguaje entendible por el PLC, ya que será este quien realice las funciones de regulador. Una forma sencilla de implementar reguladores de forma programada se basa en encontrar el equivalente discreto de los correspondientes reguladores. Para discretizar un regulador existe el siguiente método.

*R(s) → ecuaciones diferenciales → ecuaciones en diferencias → programación*

Este método consiste en averiguar la expresión del regulador en el campo transformado (s) de Laplace, una vez obtenido hallar su expresión en ecuaciones diferenciales mediante la antitransformada de Laplace. El siguiente paso es convertir la expresión en el dominio del tiempo en ecuaciones en diferencias, que es una forma de discretizar las ecuaciones. Según las diferencias hacia atrás:

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_k = \frac{f_k - f_{k-1}}{\Delta t} \quad (6.2)$$

$$\int f(t) dt = \sum_{k=1}^n f_k \Delta t$$

Es decir, la derivada se convierte en la resta de la función menos la función en el instante de tiempo anterior y la integral se convierte en suma de la función más la función en el instante de tiempo anterior.

Con el regulador expresado en ecuaciones en diferencias la interpretación del mismo en un lenguaje de programación o diagrama de flujo es obvia.

### • Emulación programada del regulador proporcional integral.

Partiendo de la ecuación (6.1) la acción proporcionada por el regulador será:

$$U(s) = R(s)\varepsilon(s), \text{ donde } \varepsilon(s) \text{ es el error} \quad (6.3)$$

$$U(s) = K_{pid}\varepsilon(s) + \frac{K_{pid}}{\tau_i s} \varepsilon(s) + K_{pid}\tau_d s \varepsilon(s)$$

Siguiendo la metodología explicada anteriormente obtenemos ahora la expresión en ecuaciones diferenciales:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.4)$$

Corresponde con la acción proporcionada por un regulador proporcional integral, donde esta acción es proporcional al error y proporcional a la integral del error. Las constantes Kp y Ki son la constante proporcional e integral respectivamente y e(t) el error.

Aplicando las diferencias hacia atrás (6.2) la conversión de la expresión anterior queda:

$$u_k = K_p e_k + K_i \sum_{k=1}^n e_k T + K_d \left( \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right) \quad (6.5)$$

$$K_p = K_{pid} \quad K_i = \frac{K_{pid}}{\tau_i} \quad K_d = K_{pid} \tau_d$$

Donde  $u_k$  representa el valor de la acción durante el intervalo  $k$  que dura  $T$  segundos. No confundir esta  $T$  con la  $T$  constante de tiempo de la función de transferencia del sistema. En el caso de este proyecto la acción se calculará cada ciclo. Como se explicó en la introducción del capítulo 6, *Procesamiento cíclico*, la ejecución del programa y por tanto el cálculo de la acción podría realizarse periódicamente, sin embargo no se estima necesario pues el PLC dispone de recursos suficientes. El cálculo de la acción quedará expresado en la forma:

$$\boxed{\text{Acción} = K_p \times \text{error} + K_i \times \text{integral} + K_d \left( \frac{\text{error} - \text{error}_{\text{anterior}}}{T} \right)} \quad (6.6)$$

Donde:

$$\text{integral} = \text{integral} + T * \text{error} \quad (6.7)$$

El error se obtiene de la diferencia entre la salida deseada y la salida del sistema obtenida, es decir, de la consigna de nivel y el nivel obtenido en el tramo

Como se explica en el capítulo 2 apartado 2.4.- ARQUETAS DE MEDIDA PARA SENSORES, se obtiene una medida de nivel aguas abajo de la Almenara 1 y otra aguas arriba de la Almenara 2. En realidad la variable a controlar es un incremento de nivel. El Centro de Control consignará una variación de nivel para el tramo, esta variación de nivel será enviada por comunicaciones al PLC. De la diferencia entre la variación de nivel consignado por el Centro de Control y la variación de nivel medido al final del tramo se obtiene el error.

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \Delta h \text{ consigna} - \Delta h \text{ medida} \Rightarrow \\ \text{Error} &= (\text{Nivel Consigna} - h_0) - (\text{Nivel aguas arriba de la Almenara 2} - h_0) \Rightarrow \\ \text{Error} &= \text{Nivel Consigna} - \text{Nivel aguas arriba de la Almenara 2} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Donde el nombre asignado a estas variables en el código es:

Error -> A1\_MD\_ERROR

Nivel Consigna -> CC\_Ax\_CONSIGNA\_NIVEL

Nivel aguas arriba de la Almenara 2 -> A2\_MD\_NIVEL\_AARR

Donde Nivel aguas arriba de la Almenara 2 hace referencia al nivel medido en la Almenara 2, en su toma aguas arriba.  $N_B$  en la figura 6.2.6-01.

La emulación del regulador proporcional integral que regulará el Tramo de la infraestructura hidráulica queda determinada por la expresión de la acción (6.6) y la obtención del error (6.8).

### • Cambio de modo manual a modo automático

Un aspecto a tener en cuenta en la implementación programada del regulador es el cambio de modo manual a automático. El control de la estación remota se ha diseñado con un modo automático y un modo manual. El modo manual está destinado a funciones de mantenimiento o control del sistema ante un fallo del modo automático. En este sentido con el modo manual se controlan las compuertas mediante los pulsadores del cuadro de control de la estación remota o mediante el terminal de visualización de mantenimiento, aportando así una acción manual.

En el momento en que la operación manual ha terminado y se pasa el sistema a modo automático las variables asociadas al cálculo de la acción automática cambiarán de forma brusca pudiendo provocar acciones indeseadas. Esto es debido a que en el cambio el valor de la variable integral es el último que tuviese en la anterior operación en automático. Como consecuencia de esto, suponiendo que el valor de la integral fuese cero en la última operación en automático, en el momento del cambio:

$$\begin{aligned}
 & \text{modo } MAN \rightarrow \text{modo } AUTO \\
 & Integral = Integral + T * error \\
 & Integral = 0 \Rightarrow Integral = T * error \qquad (6.9) \\
 & Acción = K_p * error + K_i * Integral + K_d \left( \frac{error - error_{anterior}}{T} \right) \Rightarrow \\
 & Acción = K_p * error + K_i * T * error + K_d \left( \frac{error - error_{anterior}}{T} \right)
 \end{aligned}$$

Si en el momento del cambio la acción manual es grande y el error pequeño, la acción automática será proporcional al error y probablemente más pequeña que la acción manual aplicada lo que provocara un *golpe* sobre la acción del sistema y una variación indeseada en la salida del sistema.

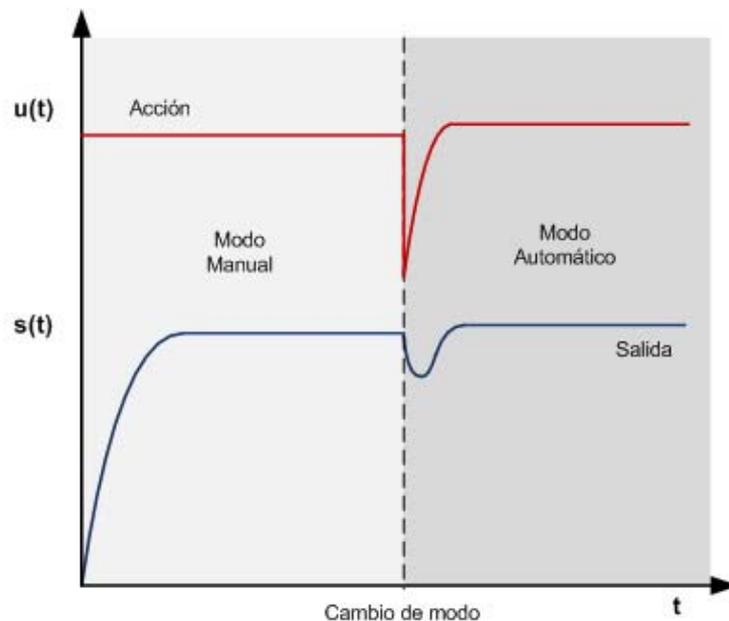


FIGURA 6.2.6-02  
- GRÁFICA DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA Y LA ACCIÓN DEL REGULADOR CUANDO SE CAMBIA DE MODO MANUAL A MODO AUTOMÁTICO.

La solución a esta problemática consiste en implementar en la emulación programada del regulador un cálculo de la variable integral en modo manual con la intención de que en el cambio al modo automático la variable integral tenga un valor asociado a la última acción manual ejecutada.

Durante la ejecución del modo manual la variable integral obedecerá al siguiente cálculo:

$$Integral = \frac{A_{man} - K_p error - K_d \left( \frac{error - error_{anterior}}{T} \right)}{K_i} \quad (6.10)$$

De esta forma el valor de la variable integral se refresca con el cálculo teniendo en cuenta la acción manual ( $A_{man}$ ). La variable integral no afecta en nada a la acción manual. En el instante de cambio a modo automático la acción será, aplicando la expresión (6.7):

$$Acción = K_p error + K_i \frac{A_{man} - K_p error - K_d \left( \frac{error - error_{anterior}}{T} \right)}{K_i} + K_d \left( \frac{error - error_{anterior}}{T} \right) = A_{man} \quad (6.11)$$

Luego el primer valor de la acción automática corresponde con el último valor de la acción manual. Se evita de esta forma el golpe en la acción del regulador.

### • Saturación del regulador

Otra problemática a tener en cuenta es que la acción sobre el sistema está limitada físicamente. Las compuertas solo pueden abrir hasta su tope máximo. En estas condiciones el sistema puede demandar una acción máxima, por ejemplo con una consigna de nivel x, en el tramo podría descender el nivel debido a una demanda inusual de caudal aguas abajo. Para mantener el nivel el regulador aplicaría la máxima acción posible entrando en saturación. Sin embargo, debido a que se trata de unas condiciones excepcionales no se alcanzaría el valor de consigna. En el momento en que estas condiciones desaparecen el sistema debería volver a su estado inicial de nivel x pero debido a que el sistema ha estado saturado la variable integral ha aumentado desmesuradamente. Esto se traduce en que para el regulador el sistema sigue demandando caudal y por lo tanto el nivel aumentará por encima del valor de consigna. El valor del error ahora es negativo, es decir, el nivel en el tramo es mayor que la consigna, esto implica que la variable integral disminuirá con estos valores pero el regulador seguirá en saturación hasta que la integral se reduzca lo suficiente. Este efecto puede generar resultados del todo indeseables en este sistema.

Una posible solución consiste en detener la suma de la variable integral en el momento en que el regulador entra en saturación. De esta forma se impide que el valor de la variable integral aumente y provoque el efecto anterior. El momento en que se debe reanudar la suma de la variable integral es cuando el error cambia de signo.

$$\begin{aligned} Si\ No\ (Acción > Acción\ máx.\ y\ Error > 0\ or\ Acción < Acción\ mín.\ y\ Error < 0) \rightarrow \\ \rightarrow\ Integral = Integral + T * error \end{aligned} \quad (6.12)$$

Introduciendo estas condiciones en la implementación programada del regulador se soluciona el problema de la saturación.

### • **Acción**

Por último se calcula la acción del regulador. Este dato se almacena en la doble palabra de marcas A1\_MD\_ACCION. En esta función no se aplica este valor a la salida, es decir, no se ataca todavía al actuador. La salida será activada en la última función, la rutina de actuación.

$$A = Q_0 + K_p \times E + K_i \times I + K_d \left( \frac{error - error_{anterior}}{T} \right) \quad (6.13)$$

Las marcas correspondientes a cada variable son:

A-> acción -> A1\_MD\_ACCION

Kp-> constante proporcional-> CC\_Ax\_MD\_CONSIG\_KP -> A1\_MD\_KP

E -> error -> A1\_MD\_ERROR

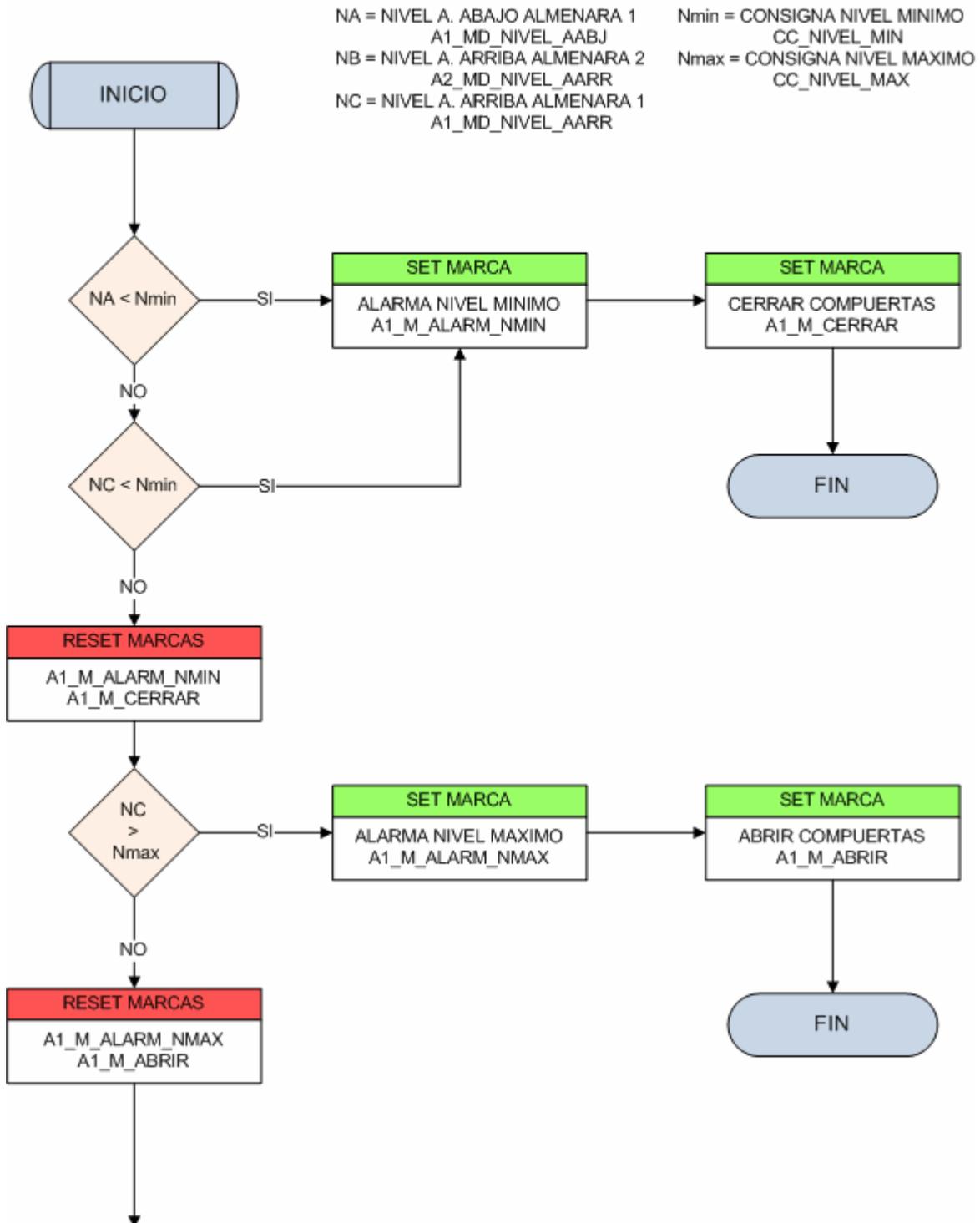
Ki -> constante integral -> CC\_Ax\_MD\_CONSIG\_KI -> A1\_MD\_KI

I -> integral -> A1\_MD\_INTEGRAL

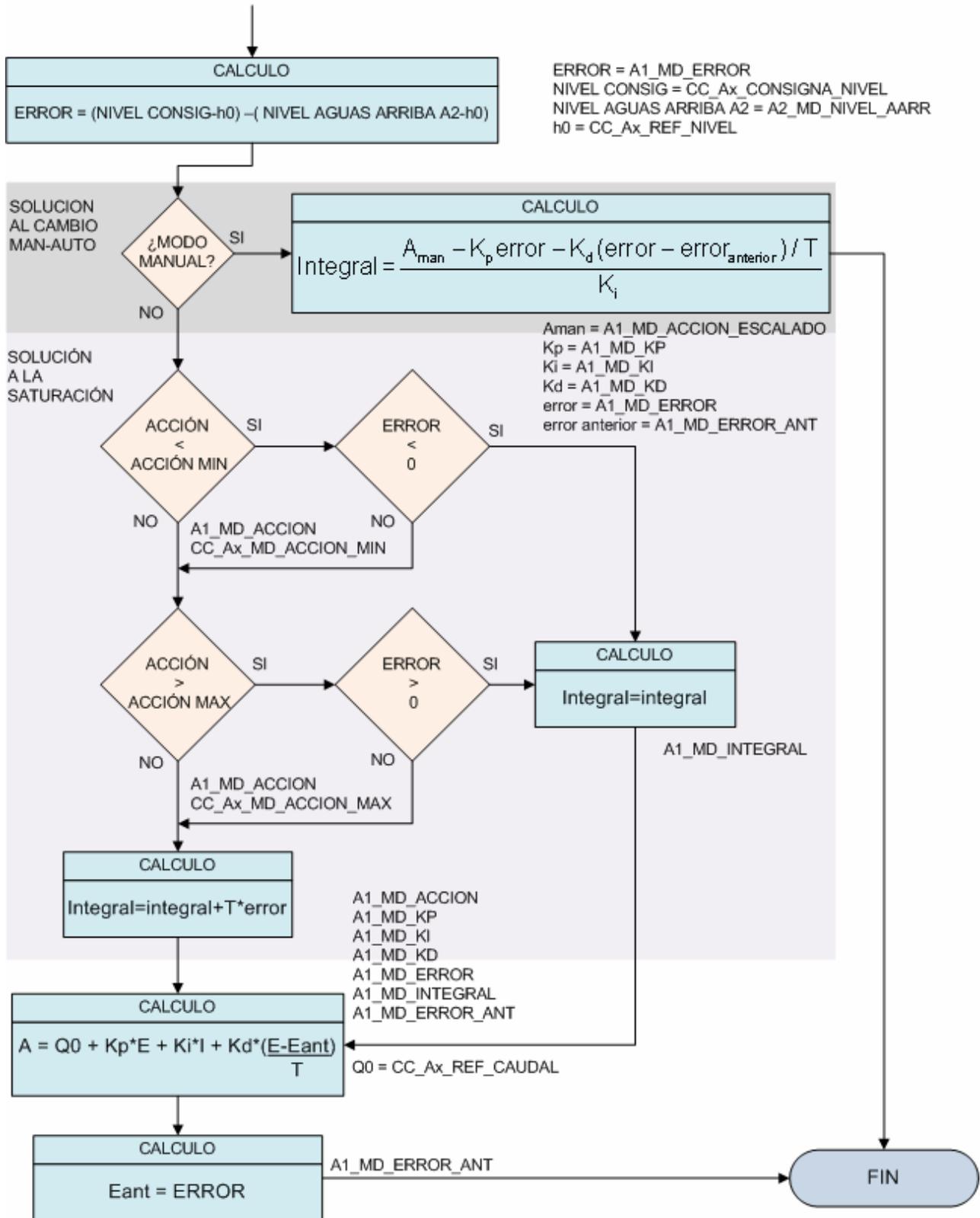
Kd -> constante derivativa -> CC\_Ax\_MD\_CONSIG\_KD -> A1\_MD\_KD

EANTERIOR -> error del ciclo anterior -> A1\_MD\_ERROR\_ANT

## FC50 Regulador. 1/2.



## FC50 Regulador. 2/2



## 6.2.7- FC60, RUTINA DE ACTUACIÓN.

En esta función se activan las salidas. Existen dos formas de controlar el actuador, mediante señal digital, orden de abrir o cerrar, o mediante señal analógica, indicando posición. Esto implica activar las salidas digitales, en el primer caso, o las analógicas en el segundo caso.

La rutina se divide en dos, salidas de la compuerta izquierda y salidas de la compuerta derecha. A su vez se comprueba primero si la compuerta está en modo manual o automático y si han sido activadas las marcas de abrir o cerrar, posteriormente se realiza el escalado de la señal de salida analógica.

### • Salidas digitales

Las salidas digitales solo se activan cuando está a 1 la marca A1\_M\_ABRIR o A1\_M\_CERRAR. Estas marcas se activan por motivos de seguridad en el nivel en la función FC50. Antes de activar la salida se comprueba que la compuerta no este en su tope máximo. Las salidas solo se activan (SET) en esta función que es la última en ejecutarse. Sin embargo estas mismas salidas pueden desactivarse (RESET) en múltiples ocasiones y desde otras funciones como ocurre, por ejemplo, en la función FC20 cuando se detecta un defecto.

### • Salidas analógicas

El escalado de las señales analógicas se realiza mediante la función FC106 'UNSCALE'. La función "Desescalar valores" (UNSCALE) toma en la entrada IN un valor real que está ajustado a escala en un rango comprendido entre un límite inferior y un límite superior (LO\_LIM y HI\_LIM), y lo convierte en un valor entero. El resultado se escribe en la salida OUT. La función UNSCALE aplica la fórmula siguiente:

$$OUT = [ ((IN-LO\_LIM)/(HI\_LIM-LO\_LIM)) * (K2-K1) ] + K1$$

Las constantes K1 y K2 se aplican de forma diferente, dependiendo de si el valor de entrada es BIPOLAR o UNIPOLAR.

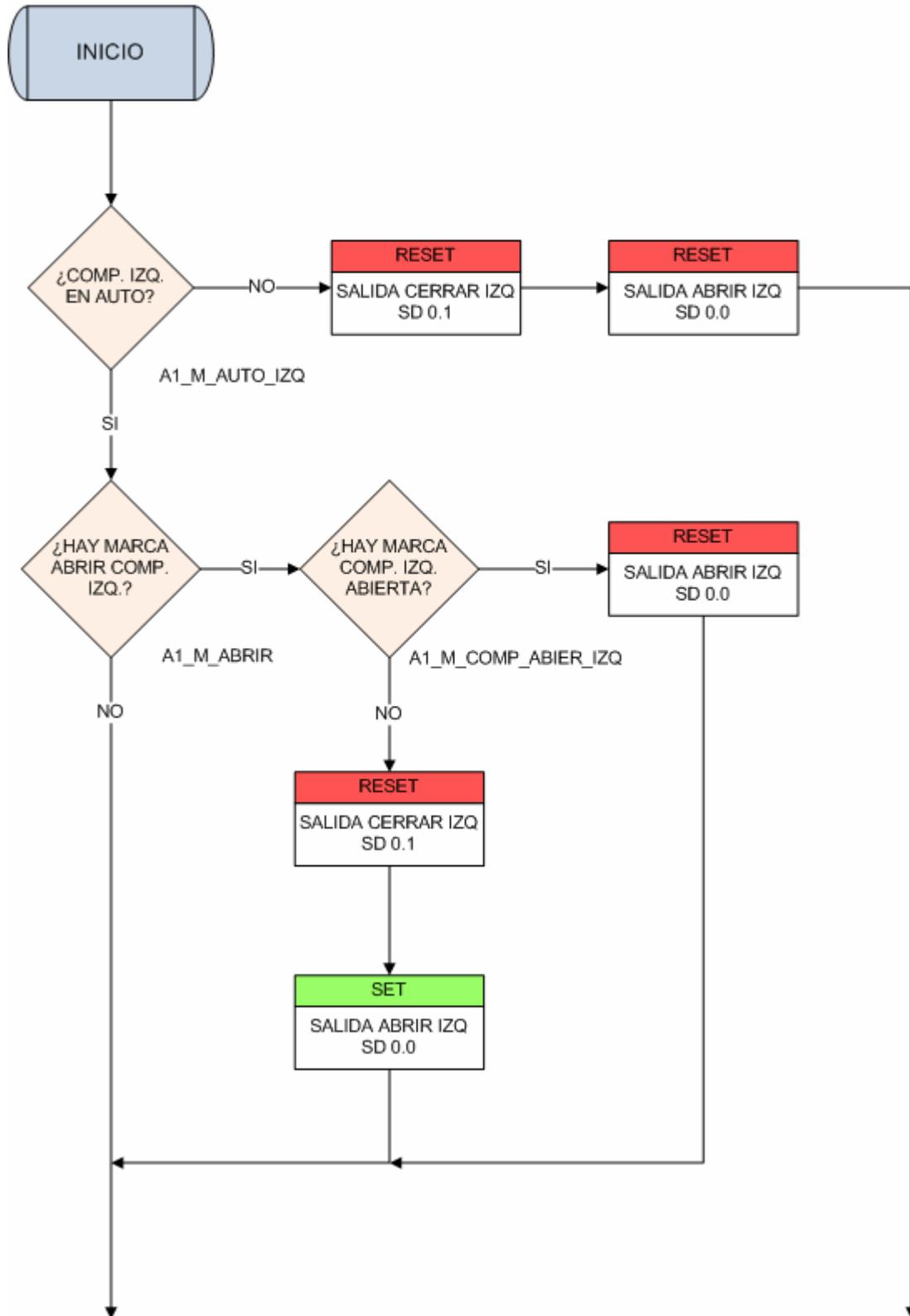
BIPOLAR: Se supone que el valor entero de salida debe estar entre -27648 y 27648, por lo tanto, K1 = -27648.0 y K2 = +27648.0

UNIPOLAR: Se supone que el valor entero de salida debe estar entre 0 y 27648, por lo tanto, K1 = 0.0 y K2 = +27648.0

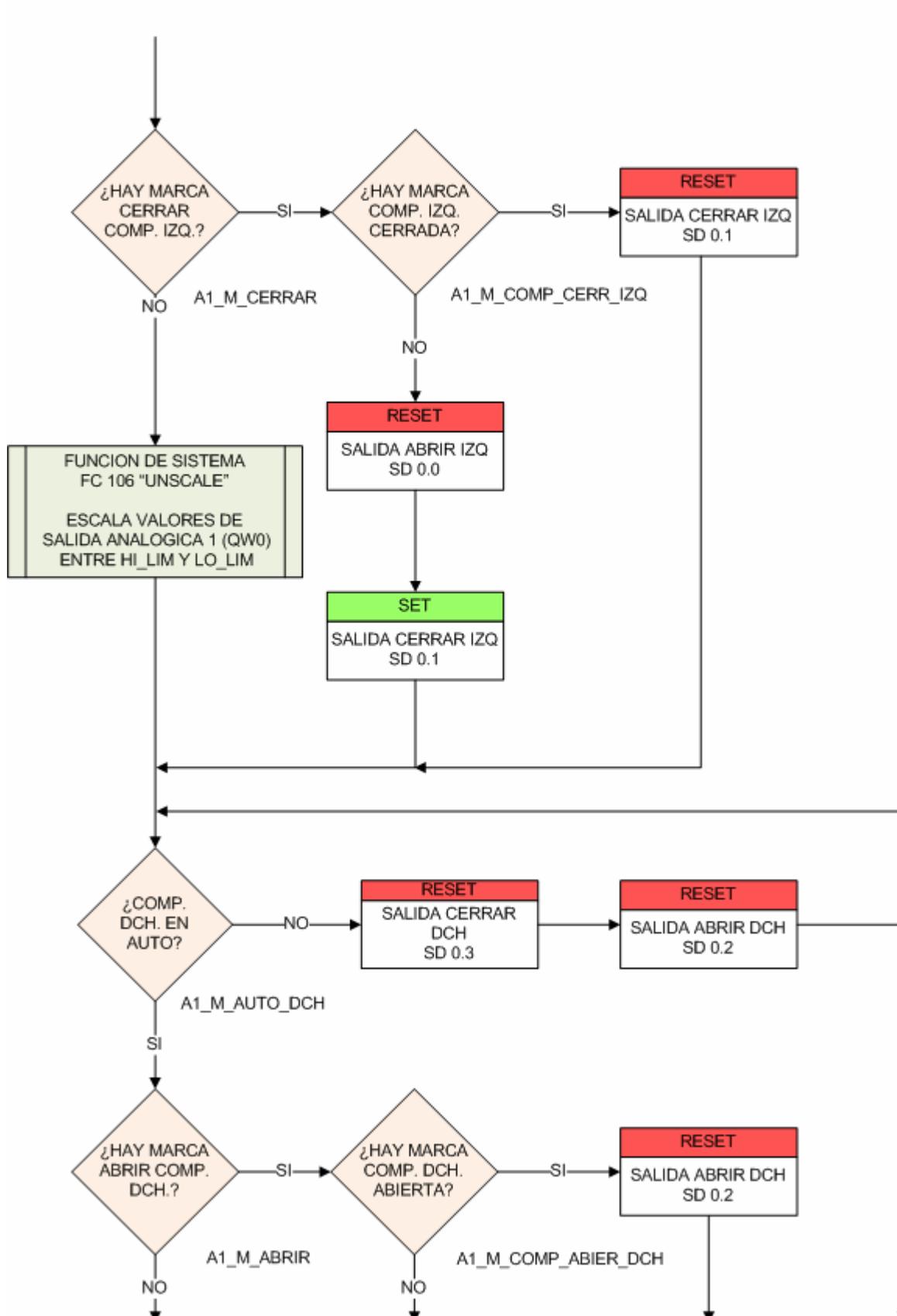
La función FC106 realiza la operación inversa de la función FC105, ver el apartado 6.2.3 - FC20, COMPROBACIÓN DE SEÑALES, sección FUNCIÓN FC105 SCALE. Será necesario ajustar el valor de la acción calculada en FC50 al rango 4-20mA de la salida analógica. En los parámetros HI\_LIM y LO\_LIM se introducirán los valores correspondientes a la apertura máxima y al cierre total respectivamente, que corresponden con las consignas CC\_Ax\_MD\_HI\_LIM\_SA y CC\_Ax\_LO\_LIM\_SA. El parámetro IN será la variable A1\_MD\_ACCION, la salida OUT será la palabra de salida QW0 para la compuerta izquierda y QW1 para la compuerta derecha.

# FC60

## Rutina de actuación. 1/3

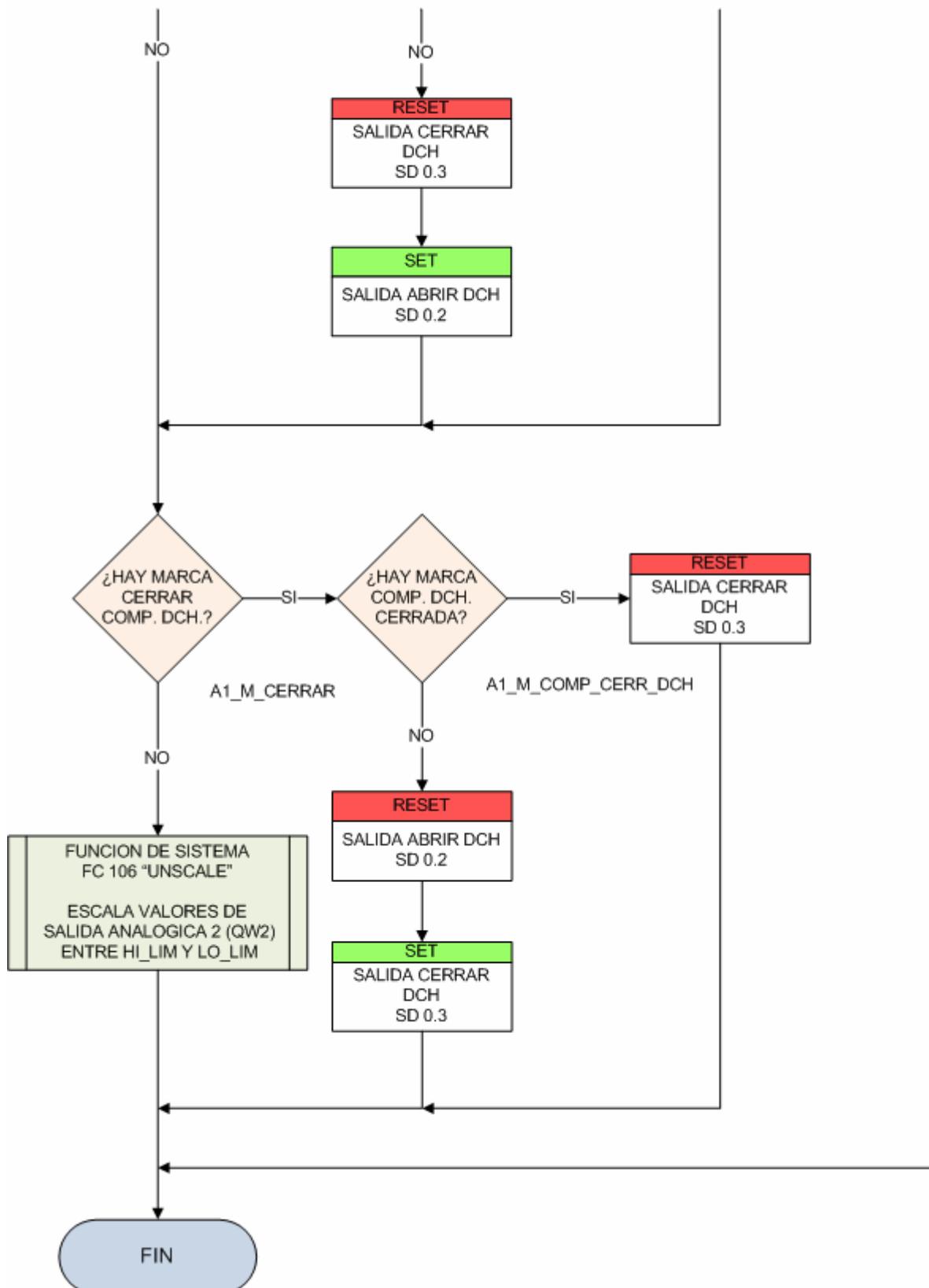


## FC60 Rutina de actuación. 2/3



## FC60

### Rutina de actuación. 3/3

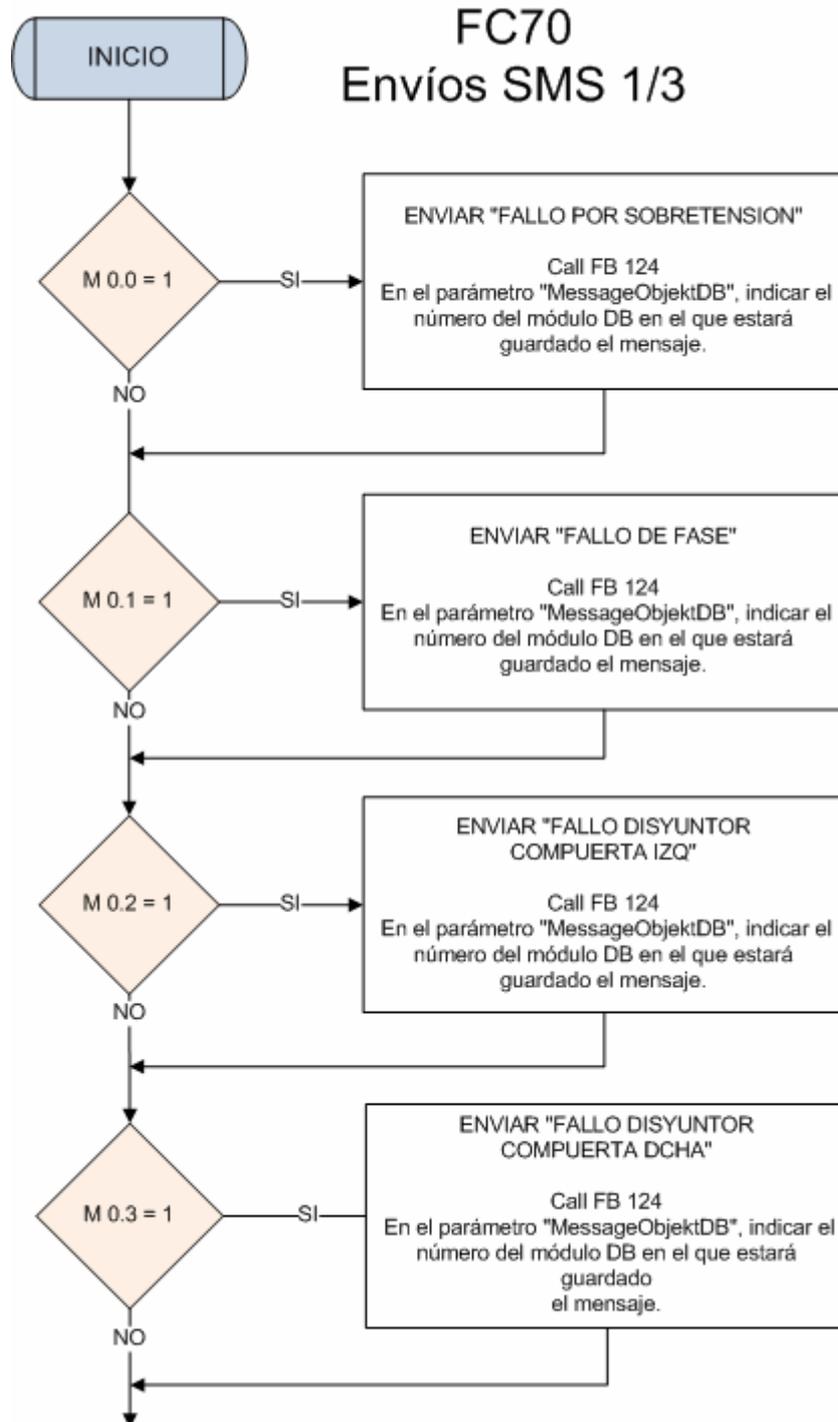


### 6.2.8- FC70, ENVIOS SMS.

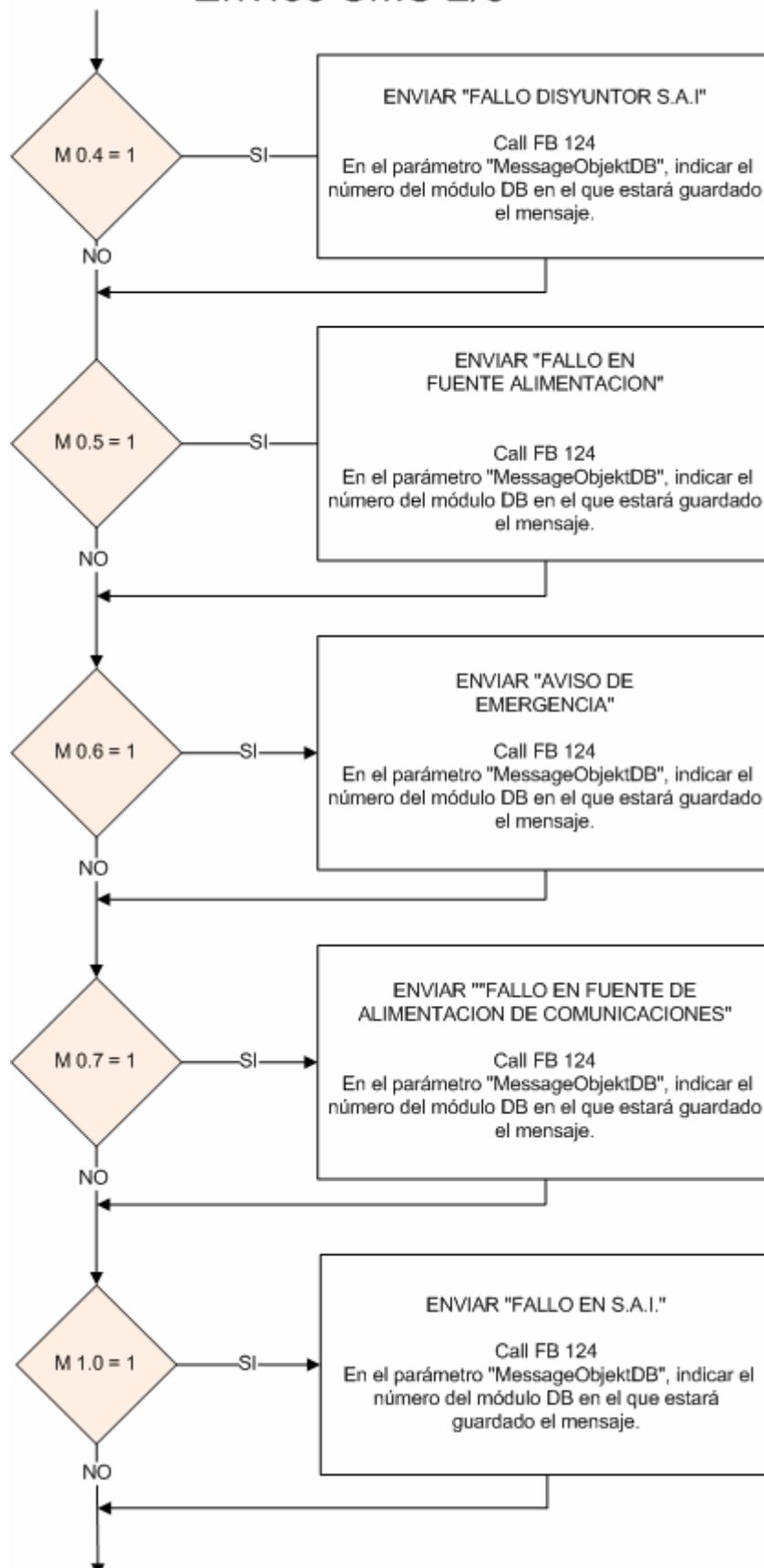
Primero, señalar que será necesario realizar unas configuraciones en el software (SINAUT ST7 : Configuration), dentro de "Administración de suscriptores".

- La carga de los mensajes de texto se realiza por software, en la pestaña "SMS Configuration".

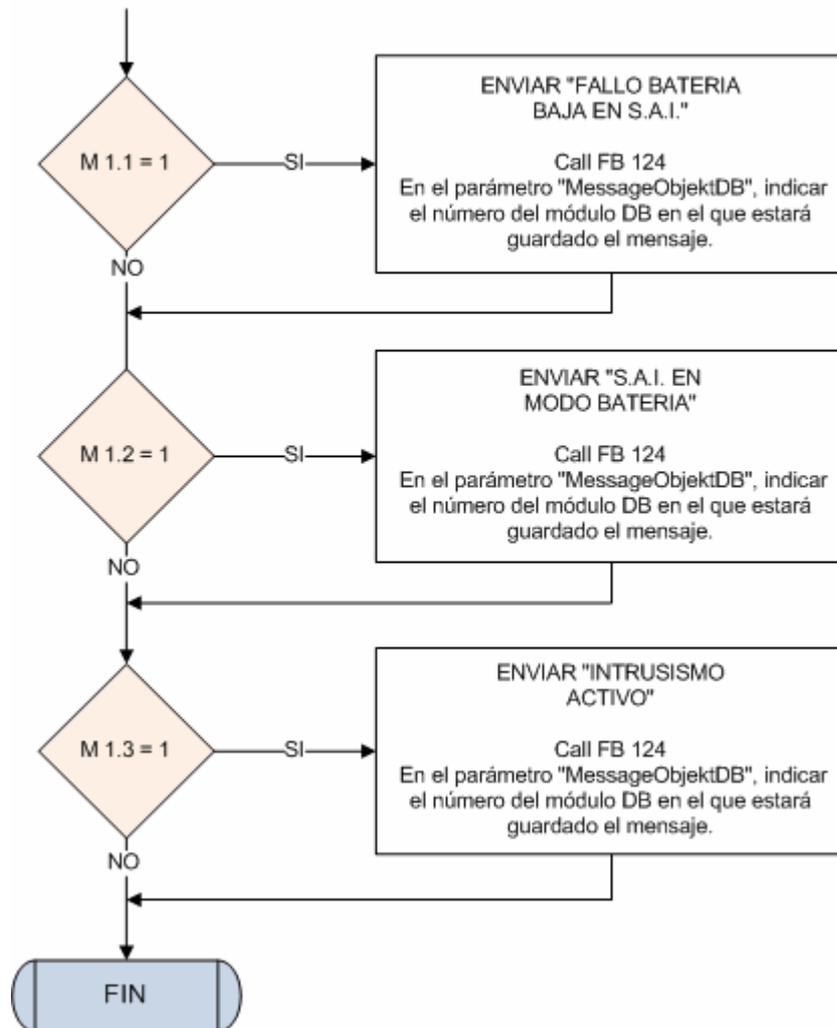
- La carga del número de teléfono del receptor del SMS con su prefijo de país se realiza en la pestaña "DB Configuration".



## FC70 Envíos SMS 2/3



## FC70 Envíos SMS 3/3



Respecto a la función FC70 Envío SMS. Se realizará un chequeo de todos los posibles fallos que pueden suceder (por sobretensión, por fase, en disyuntor compuerta izquierda, en disyuntor compuerta derecha, en disyuntor S.A.I., en disyuntor de F.A., en señal de emergencia, en disyuntor de F.A. de comunicaciones, en S.A.I, por batería baja en S.A.I, por modo batería S.A.I., por intrusismo activo y por inhabilitación de intrusismo).

En el caso de que produzca cualquiera de estos fallos, se enviará el SMS correspondiente, indicando el origen del mismo.

## 6.2.9- LISTADO DE SEÑALES

A continuación se muestran todas las señales, variables y datos utilizados en el programa de la almenara.

ENTRADAS DIGITALES			
	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
ED 0.0	SOBRETENSION 400VAC	A1_ED_SOBRET	A1_M_SOBRET
ED 0.1	FALLO FASE/ASIMETRIA/NO R-S-T	A1_ED_FALLO_FASE	A1_M_FALLO_FASE
ED 0.2	DISYUNTOR COMPUERTA IZQ	A1_ED_NO_VAC_COMP_IZQ	A1_M_NOv_COMP_IZQ
ED 0.3	DISYUNTOR COMPUERTA DCHA	A1_ED_NO_VAC_COMP_DCH	A1_M_NOv_COMP_DCH
ED 0.4	DISYUNTOR S.A.I.	A1_ED_NO_VAC_SAI	A1_M_NOv_SAI
ED 0.5	DISYUNTOR FUENTE ALIMENTACION	A1_ED_NO_VAC_FA	A1_M_NOv_FA
ED 0.6	SEÑAL DE EMERGENCIA	A1_ED_EMERG	A1_M_EMERG
ED 0.7	DISYUNTOR F.A. COMUNICACIONES	A1_ED_NO_VAC_FA_COM	A1_M_NOv_FA_COM
ED 1.0	FALLO EN S.A.I.	A1_ED_FALLO_SAI	A1_M_FALLO_SAI
ED 1.1	BATERIA BAJA EN S.A.I.	A1_ED_BAT_BAJA	A1_M_BAT_BAJA
ED 1.2	S.A.I. EN MODO BATERIA	A1_ED_MODO_BAT	A1_M_MODO_BAT
ED 1.3	SEÑAL DE INTRUSISMO	A1_ED_INTRUSO	A1_M_INTRUSO
ED 1.4	INHABILITACION DE INTRUSISMO	A1_ED_NO_INTRUSO	A1_M_NO_INTRUSO
ED 1.5	COMPUERTA IZQ. EN AUTOMATICO	A1_ED_AUTO_COMP_IZQ	A1_M_AUTO_IZQ / A1_M_MAN_IZQ
ED 1.6	COMPUERTA DCHA. EN AUTOMATICO	A1_ED_AUTO_COMP_DCH	A1_M_AUTO_DCH / A1_M_MAN_DCH
ED 1.7			
ED 2.0	COMPUERTA IZQ. CERRADA	A1_ED_COMP_CERR_IZQ	A1_M_COMP_CERR_IZQ
ED 2.1	COMPUERTA IZQ. ABIERTA	A1_ED_COMP_ABIER_IZQ	A1_M_COMP_ABIER_IZQ
ED 2.2	FALLO EN COMPUERTA IZQ.	A1_ED_FALLO_COMP_IZQ	A1_M_FALLO_COMP_IZQ
ED 2.3	PAR SOBREPASADO EN COMP. IZQ.	A1_ED_PAR_COMP_IZQ	A1_M_PAR_COMP_IZQ
ED 2.4	COMPUERTA IZQ. MANIOBRANDO	A1_ED_COMP_MANIO_IZQ	A1_M_COMP_MANIO_IZQ
ED 2.5	-	-	-
ED 2.6	-	-	-
ED 2.7	-	-	-
ED 3.0	COMPUERTA DCHA. CERRADA	A1_ED_COMP_CERR_DCH	A1_M_COMP_CERR_DCH
ED 3.1	COMPUERTA DCHA. ABIERTA	A1_ED_COMP_ABIER_DCH	A1_M_COMP_ABIER_DCH
ED 3.2	FALLO EN COMPUERTA DCHA.	A1_ED_FALLO_COMP_DCH	A1_M_FALLO_COMP_DCH
ED 3.3	PAR SOBREPASADO EN COMP. DCHA.	A1_ED_PAR_COMP_DCH	A1_M_PAR_COMP_DCH
ED 3.4	COMPUERTA DCHA. MANIOBRANDO	A1_ED_COMP_MANIO_DCH	A1_M_COMP_MANIO_DCH
ED 3.5	-	-	-
ED 3.6	-	-	-
ED 3.7	-	-	-

SALIDAS DIGITALES			
	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
SD 0.0	ABRIR COMPUERTA IZQ	A1_SD_ABRIR_COMP_IZQ	
SD 0.1	CERRAR COMPUERTA IZQ	A1_SD_CERRAR_COMP_IZQ	
SD 0.2	ABRIR COMPUERTA DCH	A1_SD_ABRIR_COMP_DCH	
SD 0.3	CERRAR COMPUERTA DCH	A1_SD_CERRAR_COMP_DCH	
SD 0.4	ALARMA IZQ (LAMPARA)	A1_SD_ALARM_IZQ	
SD 0.5	ALARMA DCH (LAMPARA)	A1_SD_ALARM_DCH	
SD 0.6	-	-	-
SD 0.7	-	-	-

#### ENTRADAS ANALÓGICAS

	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
IW 0	EA1 SENSOR ULTRASONIDO A. ARRIBA	A1_EA_ULTRAS_ARRIBA	A1_MD_OUT_EA1
IW 2	EA2 SENSOR PIEZORRESISTIVO A. ARRIBA	A1_EA_PIEZO_ARRIBA	A1_MD_OUT_EA2
IW 4	EA3 SENSOR ULTRASONIDO A. ABAJO	A1_EA_ULTRAS_ABAJO	A1_MD_OUT_EA3
IW 6	EA4 SENSOR PIEZORRESISTIVO A. ABAJO	A1_EA_PIEZO_ABAJO	A1_MD_OUT_EA4
IW 8	EA5 POSICION COMPUERTA IZQ	A1_EA_POS_IZQ	A1_MD_OUT_EA5
IW 10	EA6 POSICION COMPUERTA DCH	A1_EA_POS_DCH	A1_MD_OUT_EA6
IW 12	-	-	-
IW 14	-	-	-

#### SALIDAS ANALÓGICAS

	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
QW0	SA1 MANDO POSICION COMP IZQ	A1_SA_MANDO_POS_IZQ	
QW2	SA2 MANDO POSICION COMP DCH	A1_SA_MANDO_POS_DCH	
QW4	-	-	-
QW6	-	-	-

#### MARCAS

	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
M 0.0	SOBRETENSION 400VAC	A1_M_SOBRET	
M 0.1	FALLO FASE/ASIMETRIA/NO R-S-T	A1_M_FALLO_FASE	
M 0.2	DISYUNTOR COMPUERTA IZQ	A1_M_NOv_COMP_IZQ	
M 0.3	DISYUNTOR COMPUERTA DCHA	A1_M_NOv_COMP_DCH	
M 0.4	DISYUNTOR S.A.I.	A1_M_NOv_SAI	
M 0.5	DISYUNTOR FUENTE ALIMENTACION	A1_M_NOv_FA	
M 0.6	SEÑAL DE EMERGENCIA	A1_M_EMERG	
M 0.7	DISYUNTOR F.A. COMUNICACIONES	A1_M_NOv_FA_COM	
M 1.0	FALLO EN S.A.I.	A1_M_FALLO_SAI	
M 1.1	BATERIA BAJA EN S.A.I.	A1_M_BAT_BAJA	
M 1.2	S.A.I. EN MODO BATERIA	A1_M_MODO_BAT	
M 1.3	SEÑAL DE INTRUSISMO	A1_M_INTRUSO	
M 1.4	INHABILITACION DE INTRUSISMO	A1_M_NO_INTRUSO	
M 1.5	-	-	-
M 1.6	-	-	-
M 1.7	-	-	-
M 2.0	COMPUERTA IZQ. CERRADA	A1_M_COMP_CERR_IZQ	
M 2.1	COMPUERTA IZQ. ABIERTA	A1_M_COMP_ABIER_IZQ	
M 2.2	FALLO EN COMPUERTA IZQ.	A1_M_FALLO_COMP_IZQ	
M 2.3	PAR SOBREPASADO EN COMP. IZQ.	A1_M_PAR_COMP_IZQ	
M 2.4	COMPUERTA IZQ. MANIOBRANDO	A1_M_COMP_MANIO_IZQ	
M 2.5	COMPUERTA IZQ. EN MANUAL	A1_M_MAN_IZQ	
M 2.6	COMPUERTA IZQ. EN AUTOMATICO	A1_M_AUTO_IZQ	
M 2.7	-	-	-
M 3.0	COMPUERTA DCHA. CERRADA	A1_M_COMP_CERR_DCH	
M 3.1	COMPUERTA DCHA. ABIERTA	A1_M_COMP_ABIER_DCH	
M 3.2	FALLO EN COMPUERTA DCHA.	A1_M_FALLO_COMP_DCH	
M 3.3	PAR SOBREPASADO EN COMP. DCHA.	A1_M_PAR_COMP_DCH	

M 3.4	COMPUERTA DCHA. MANIOBRANDO	A1_M_COMP_MANIO_DCH	
M 3.5	COMPUERTA DCHA. EN MANUAL	A1_M_MAN_DCH	
M 3.6	COMPUERTA DCHA. EN AUTOMATICO	A1_M_AUTO_DCH	
M 3.7	-	-	-
M 4.0	DEFECTO APERTURA IZQ	A1_M_DEF_AP_IZQ	CC_Ax_MD_TEMP_COMP_DEF
M 4.1	DEFECTO CIERRE IZQ	A1_M_DEF_CI_IZQ	CC_Ax_MD_TEMP_COMP_DEF
M 4.2	DEFECTO APERTURA DCH	A1_M_DEF_AP_DCH	CC_Ax_MD_TEMP_COMP_DEF
M 4.3	DEFECTO CIERRE DCH	A1_M_DEF_CI_DCH	CC_Ax_MD_TEMP_COMP_DEF
M 4.4	HILO ROTO EA 1	A1_M_HROTO_EA1	A1_MD_OUT_EA1
M 4.5	VALOR ANOMALO EA 1	A1_M_VANOM_EA1	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA1 CC_Ax_MD_LO_LIM_EA1
M 4.6	HILO ROTO EA 2	A1_M_HROTO_EA2	A1_MD_OUT_EA2
M 4.7	VALOR ANOMALO EA 2	A1_M_VANOM_EA2	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA2 CC_Ax_MD_LO_LIM_EA2
M 5.0	HILO ROTO EA 3	A1_M_HROTO_EA3	A1_MD_OUT_EA3
M 5.1	VALOR ANOMALO EA 3	A1_M_VANOM_EA3	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA3 CC_Ax_MD_LO_LIM_EA3
M 5.2	HILO ROTO EA 4	A1_M_HROTO_EA4	A1_MD_OUT_EA4
M 5.3	VALOR ANOMALO EA 4	A1_M_VANOM_EA4	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA4 CC_Ax_MD_LO_LIM_EA4
M 5.4	HILO ROTO EA 5	A1_M_HROTO_EA5	A1_MD_OUT_EA5
M 5.5	VALOR ANOMALO EA 5	A1_M_VANOM_EA5	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA5 CC_Ax_MD_LO_LIM_EA5
M 5.6	HILO ROTO EA 6	A1_M_HROTO_EA6	A1_MD_OUT_EA6
M 5.7	VALOR ANOMALO EA 6	A1_M_VANOM_EA6	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA6 CC_Ax_MD_LO_LIM_EA6
	-	-	-
MD6	VALOR DECIMAL ESCALADO EA1	A1_MD_OUT_EA1	
MD10	VALOR DECIMAL ESCALADO EA2	A1_MD_OUT_EA2	
MD14	VALOR DECIMAL ESCALADO EA3	A1_MD_OUT_EA3	
MD18	VALOR DECIMAL ESCALADO EA4	A1_MD_OUT_EA4	
MD22	VALOR DECIMAL ESCALADO EA5	A1_MD_OUT_EA5	
MD26	VALOR DECIMAL ESCALADO EA6	A1_MD_OUT_EA6	
MD30	LIMITE SUPERIOR EA1	A1_MD_HI_LIM_EA1	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA1
MD34	LIMITE INFERIOR EA1	A1_MD_LO_LIM_EA1	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA1
MD38	LIMITE SUPERIOR EA2	A1_MD_HI_LIM_EA2	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA2
MD42	LIMITE INFERIOR EA2	A1_MD_LO_LIM_EA2	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA2
MD46	LIMITE SUPERIOR EA3	A1_MD_HI_LIM_EA3	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA3
MD50	LIMITE INFERIOR EA3	A1_MD_LO_LIM_EA3	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA3
MD54	LIMITE SUPERIOR EA4	A1_MD_HI_LIM_EA4	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA4
MD58	LIMITE INFERIOR EA4	A1_MD_LO_LIM_EA4	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA4
MD62	LIMITE SUPERIOR EA5	A1_MD_HI_LIM_EA5	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA5
MD66	LIMITE INFERIOR EA5	A1_MD_LO_LIM_EA5	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA5
MD70	LIMITE SUPERIOR EA6	A1_MD_HI_LIM_EA6	CC_Ax_MD_HI_LIM_EA6
MD74	LIMITE INFERIOR EA6	A1_MD_LO_LIM_EA6	CC_Ax_MD_LO_LIM_EA6
	-	-	-
MD78	BANDA MUERTA NIVEL AGUAS ARRIBA	A1_MD_BM_NIVEL_AARR	CC_Ax_MD_BM_NIVEL
MD82	BANDA MUERTA NIVEL AGUAS ABAJO	A1_MD_BM_NIVEL_AABJ	CC_Ax_MD_BM_NIVEL
MD86	VALOR MEDIO EA1 Y EA2	A1_MD_NIVEL_AARR	
MD90	VALOR MEDIO EA3 Y EA4	A1_MD_NIVEL_AABJ	
M 94.0	BANDA MUERTA NIVEL SUPERADA	A1_M_BM_SUP	CC_Ax_M_EA_AARR

			CC_Ax_M_EA_AABJ
	-	-	-
M 95.0	ALARMA NIVEL MINIMO	A1_M_ALARM_NMIN	
M95.1	ALARMA NIVEL MAXIMO	A1_M_ALARM_NMAX	
M95.2	CERRAR COMPUERTAS	A1_M_CERRAR	
M95.3	ABRIR COMPUERTAS	A1_M_ABRIR	
	-	-	-
	-	-	-
MD96	NIVEL MEDIDO PONDERADO	A1_MD_NIVEL_PONDERADO	CC_Ax_MD_DIST
			CC_Ax_MD_NIVEL_MIN
			CC_Ax_MD_NIVEL_MAX
MD100	AREA MOJADA MEDIDA PONDERADA	A1_MD_AM_MEDIDA	CC_Ax_MD_BASE_CANAL
			CC_Ax_MD_TAN_FI
MD104	AREA MOJADA CONSIGNA	A1_MD_AM_CONSIGNA	CC_Ax_MD_CONSIGNA_NIVEL
MD108	ERROR CALCULADO	A1_MD_ERROR	
MD112	VALOR CONSTANTE PROPORCIONAL KP	A1_MD_KP	CC_Ax_MD_CONSIG_KP
MD116	VALOR CONSTANTE INTEGRAL KI	A1_MD_KI	CC_Ax_MD_CONSIG_KI
MD120	CALCULO INTEGRAL	A1_MD_INTEGRAL	
MD124	CALCULO ACCION	A1_MD_ACCION	CC_Ax_MD_ACCION_MAX
			CC_Ax_MD_ACCION_MIN
MD128	VALOR ACCION ESCALADO SA	A1_MD_ACCION_ESCALADO	
MD132	LIMITE SUPERIOR SA	A1_MD_HI_LIM_SA	CC_Ax_MD_HI_LIM_SA
MD136	LIMITE INFERIOR SA	A1_MD_LO_LIM_SA	CC_Ax_MD_LO_LIM_SA

## **6.3.- PROGRAMACIÓN DE ESTACIÓN REMOTA (TOMA)**

Se describe a continuación el programa completo subdividido en sus correspondientes funciones. El bloque principal de programa OB1 engloba todas las funciones y rutinas necesarias para el funcionamiento de la toma de derivación.

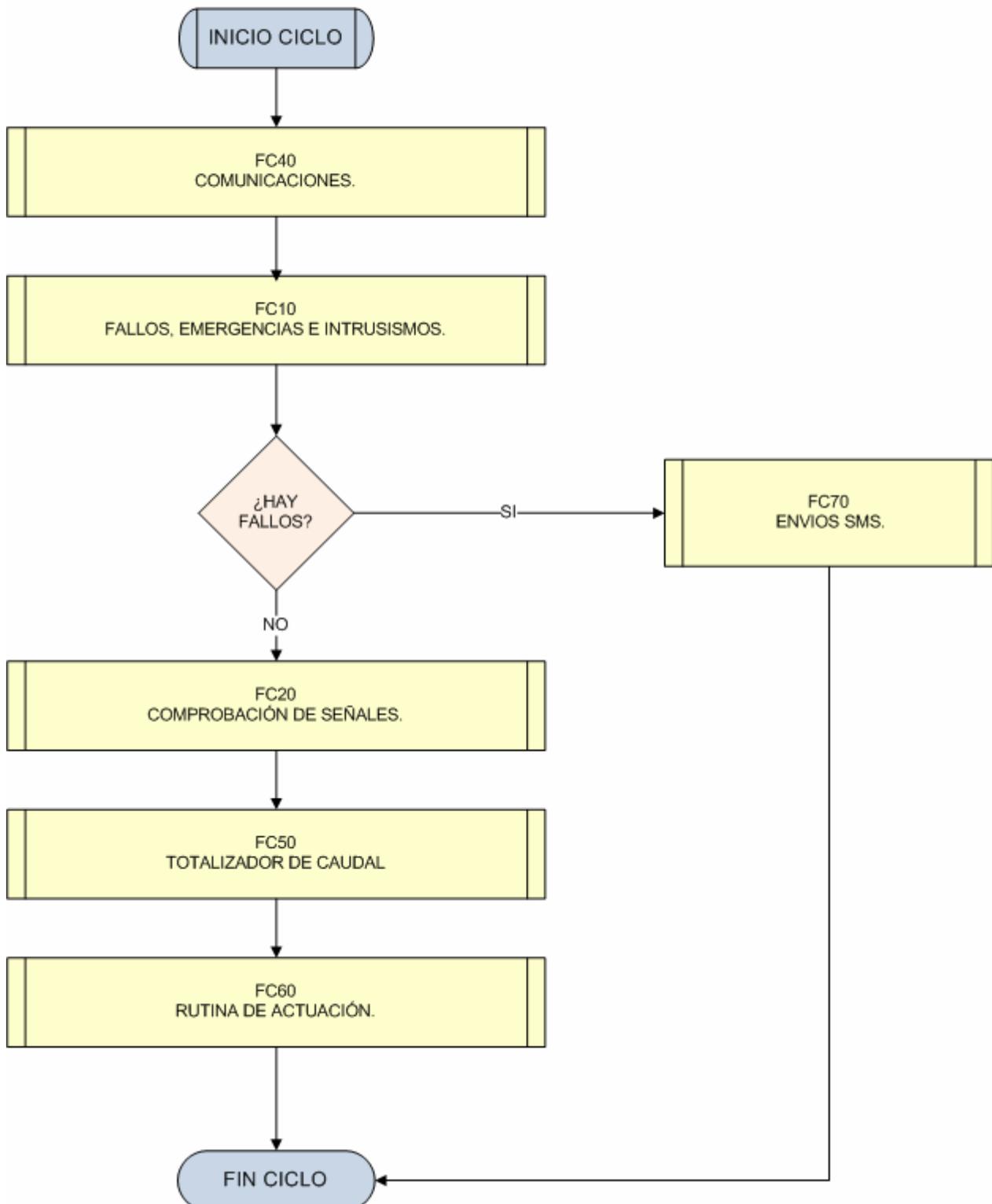
### **6.3.1- OB1, BLOQUE PRINCIPAL**

Este bloque es por defecto el que primero se ejecuta por el PLC, por lo tanto todo el programa se implementa en el mismo. Debido a la forma de trabajo de los PLC Siemens, en donde el bloque OB1 se ejecuta cíclicamente, se eliminan las operaciones de bucle, siendo el bucle el propio ciclo de programa. Se ha estructurado el programa en diferentes funciones para facilitar la programación y el mantenimiento del mismo. Cada función corresponde con una serie de operaciones a realizar como son comprobaciones de fallos, señales, cálculos, actuación, etc. El programa llamará a cada función desde el OB1 para volver al mismo cuando finalice dicha función.

El programa comienza con la función de comunicaciones para solicitar todos los parámetros y consignas necesarias. La función de comunicaciones establece una recepción de datos que se hará efectiva al inicio de ciclo y un envío que se hará efectivo al final de ciclo, por lo tanto al iniciar el ciclo se dispondrá de las consignas y parámetros recibidos desde el Centro de Control. El envío de los fallos, las mediciones, etc, se ejecutará al finalizar el ciclo debido al procesamiento cíclico del PLC, explicado al inicio del capítulo 6 y en el capítulo 3, apartado 3.2.1 – PLC (Programmable Logic Controller).

La siguiente operación es la comprobación de fallos de la estación remota almenara. Faltas de tensión, emergencias o intrusismos se consideran suficientemente importantes como para no ejecutar el resto del programa y comunicar dichos fallos al Centro de Control y al personal de mantenimiento mediante mensajes SMS. El resto de funciones de comprobación de señales no conllevan un salto de programa. El programa en su ejecución normal sigue por orden todas las funciones.

## Diagrama de flujo del bloque principal OB1 Toma



### 6.3.2- FC10, FALLOS, EMERGENCIAS E INTRUSISMOS.

Esta función comprueba las entradas digitales destinadas a la detección de, fallos eléctricos de sobretensiones, de alimentación de equipos, de activación del SAI, de la activación de la emergencia, de la señal de intrusismo y de las señales de fallo del actuador de la válvula. Ver Anexo B, PLANOS, planos eléctricos de 203 a 216.

#### • Fallos

Cada entrada digital tiene asociada un bit de marcas, de modo que si existe un fallo el bit asociado se pone a 1. De esta forma queda en memoria el fallo. Al final de la función se comprueba si hay alguna marca activada, de ser así se envían las variables al Centro de Control dando constancia a este de los fallos y emergencias surgidos y del estado de la almenara en el momento del fallo o emergencia.

Los fallos relacionados con sobretensiones, fallos de fase o asimetrías en la acometida, faltas de tensión en equipamientos o emergencias, activan además la lámpara de Fallo/Emergencia del cuadro eléctrico siguiendo un código de identificación. De esta forma el personal de mantenimiento puede observar en una inspección rutinaria la existencia de un posible fallo y su causa. El código es el siguiente:

Señal	Lámpara Fallo Válvula.
Sobretensión o Emergencia	Luz Fija
Fallo Fase, Asimetría	Discontinuo consecutivo
No hay tensión en actuador Comp. Izq.	Luz Fija
No hay tensión en actuador Comp. Dch.	Apagada
No hay tensión de entrada en el SAI	Destellos rápidos
Fallo en SAI	Intermitencia rápida
Fallo en alimentación de comunicaciones (PoE)	Pulsos largos

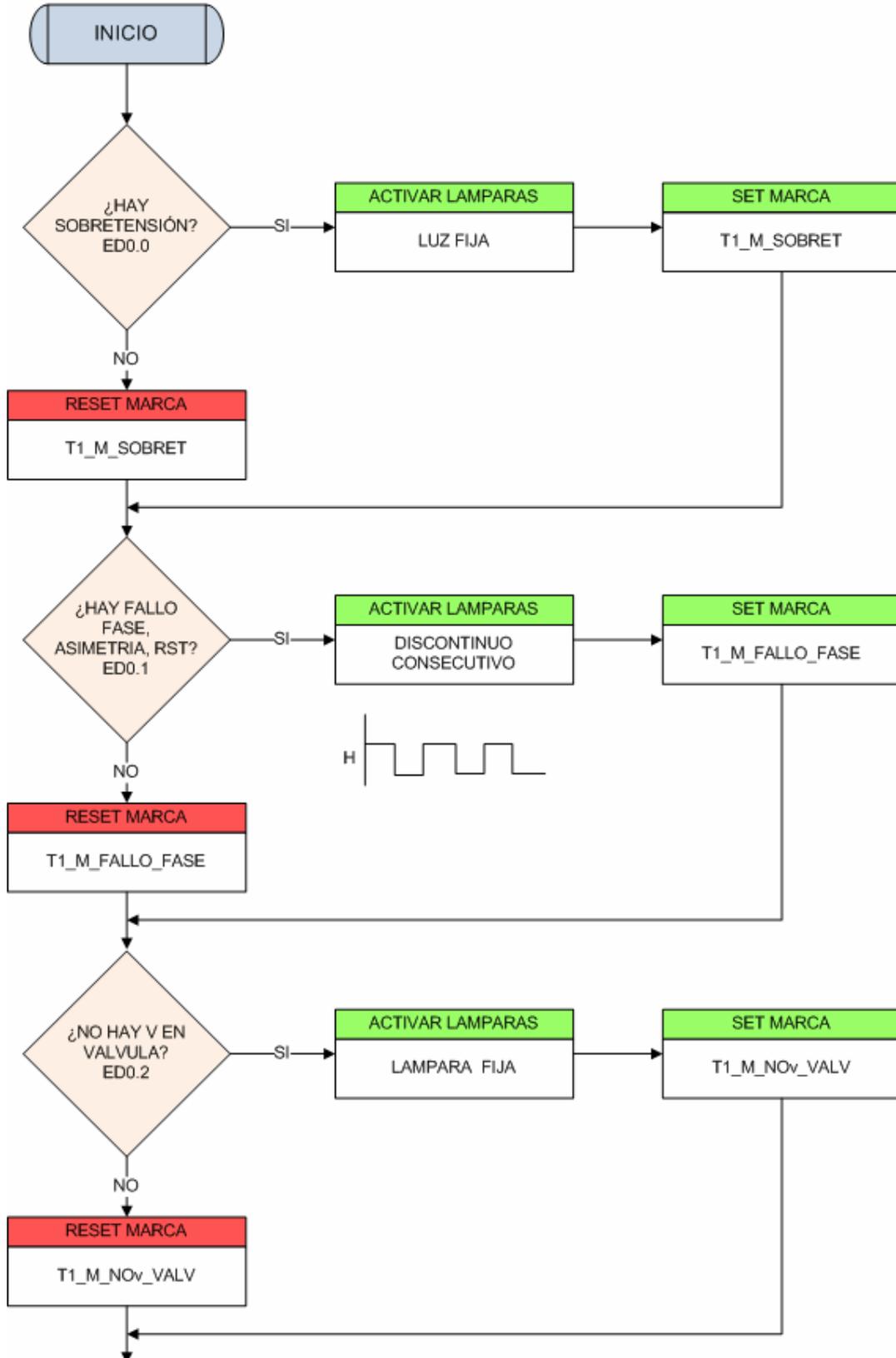
#### • Intrusismo

Se entiende por intrusismo la apertura no autorizada del armario de la estación remota. La forma de detectar esta acción es mediante un final de carrera colocado en la puerta del armario de forma que cuando esta se abre da la señal de intrusismo (T1\_M\_INTRUSO). En el interior del armario existe un interruptor-cerraja para inhabilitar la señal de intrusismo. Todo el personal de mantenimiento debe llevar consigo la llave que permite la desactivación del intrusismo, identificando así que la apertura del armario está autorizada. Dispone para ello de un tiempo predeterminado de 10 segundos.

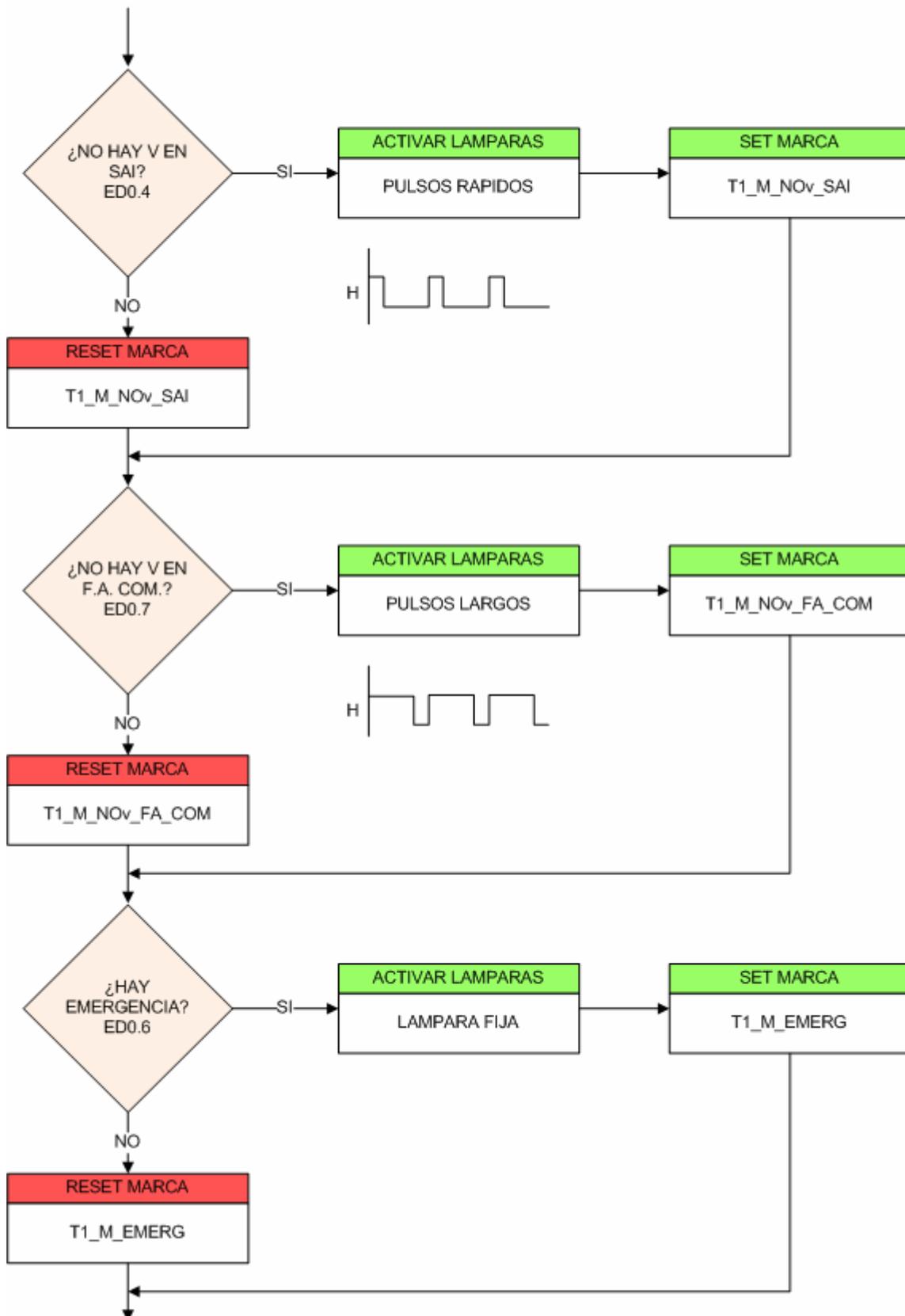
Las señales relacionadas con el intrusismo siguen una estructura diferente ya que conllevan una temporización. En el momento en que hay un flanco en la señal de intruso se inicia una temporización de 10 segundos. Si durante ese tiempo no hay una identificación mediante la señal "no intruso" se activará la marca T1\_M\_INTRUSO. La señal se enviará al Centro de Control y se saltará el resto de programa.

Se expone a continuación el diagrama de flujo de la función FC10:

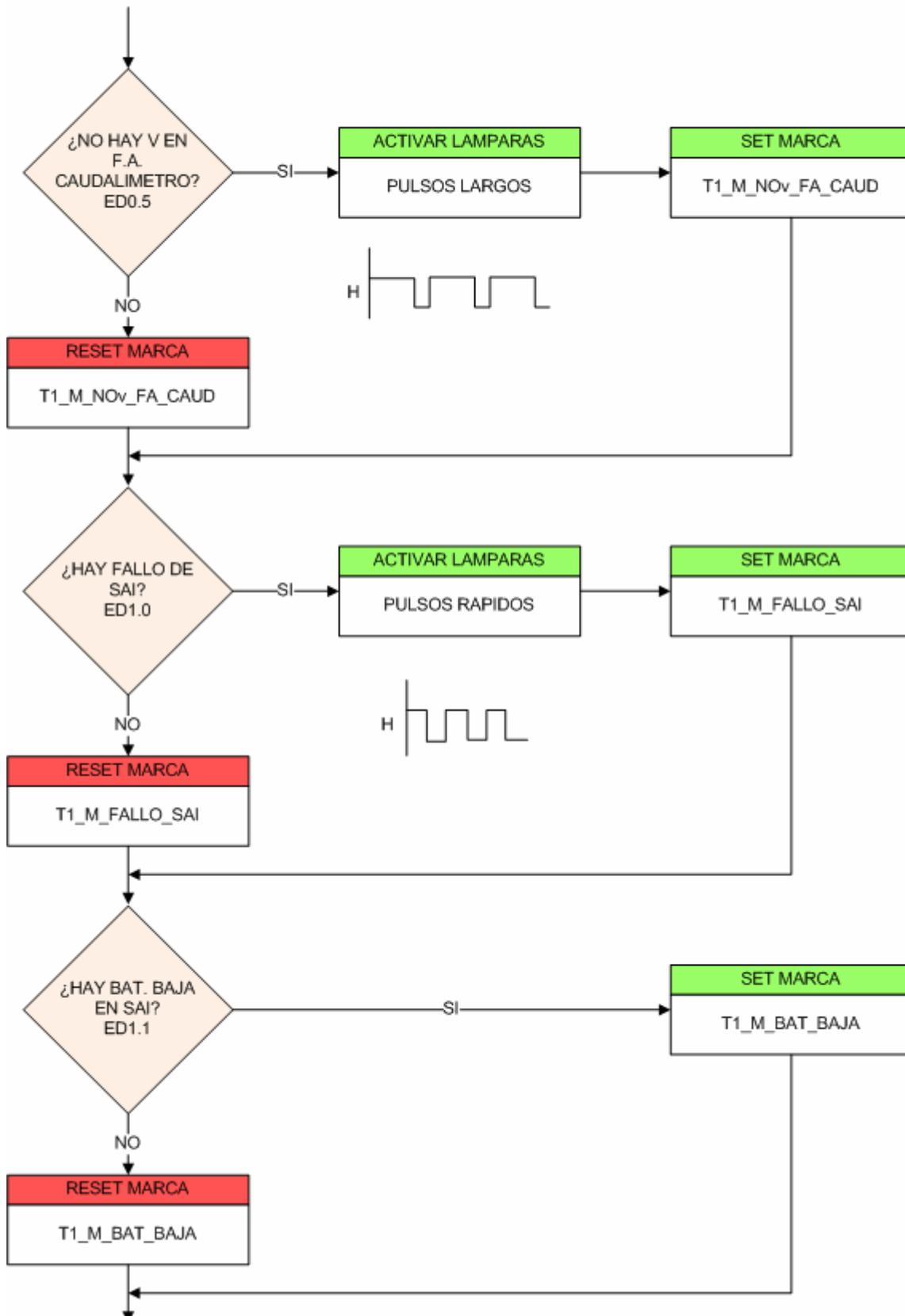
## Función FC10 Fallos, Emergencias e Intrusismos. 1/5.



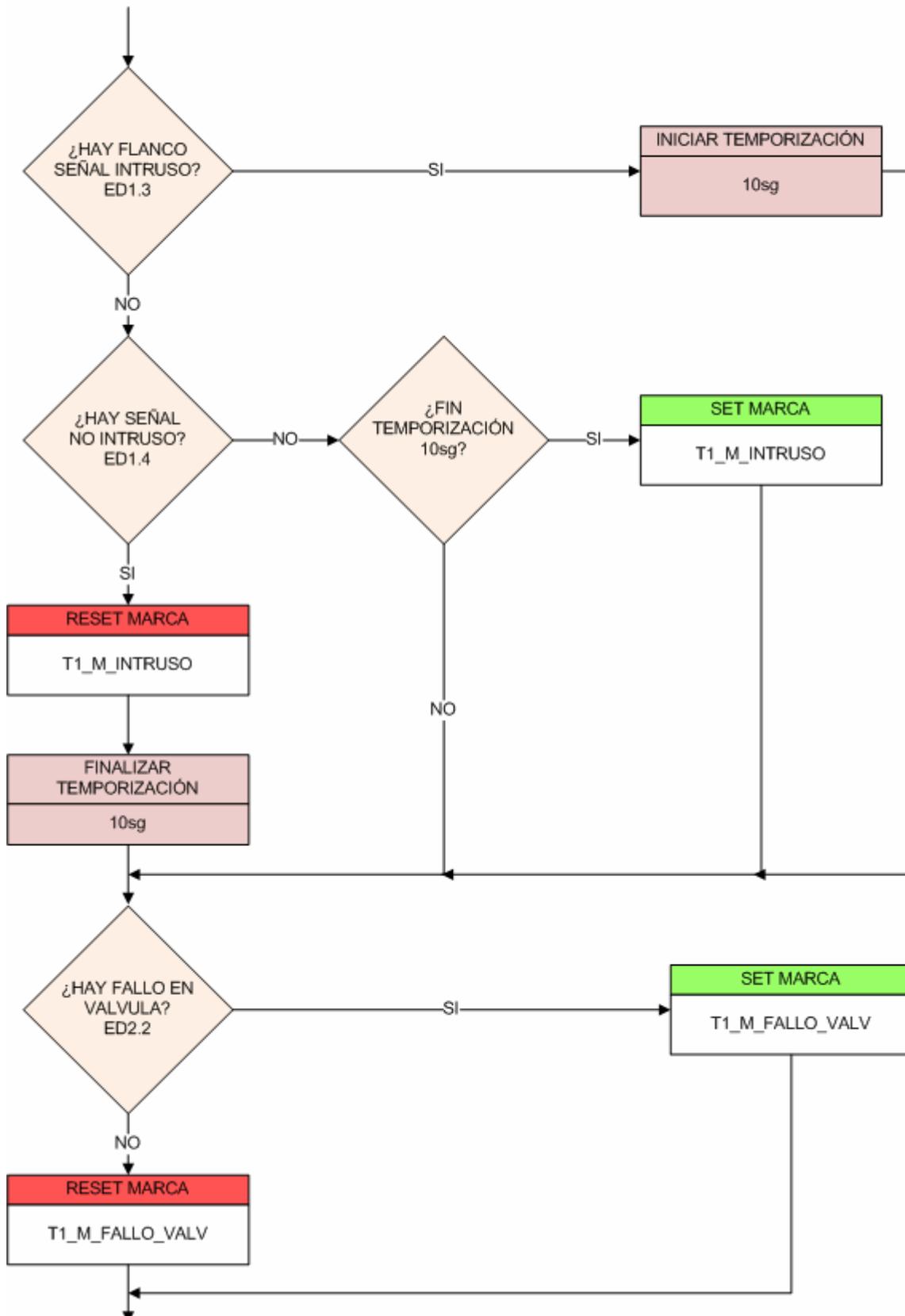
## Función FC10 Fallos, Emergencias e Intrusismos. 2/5.



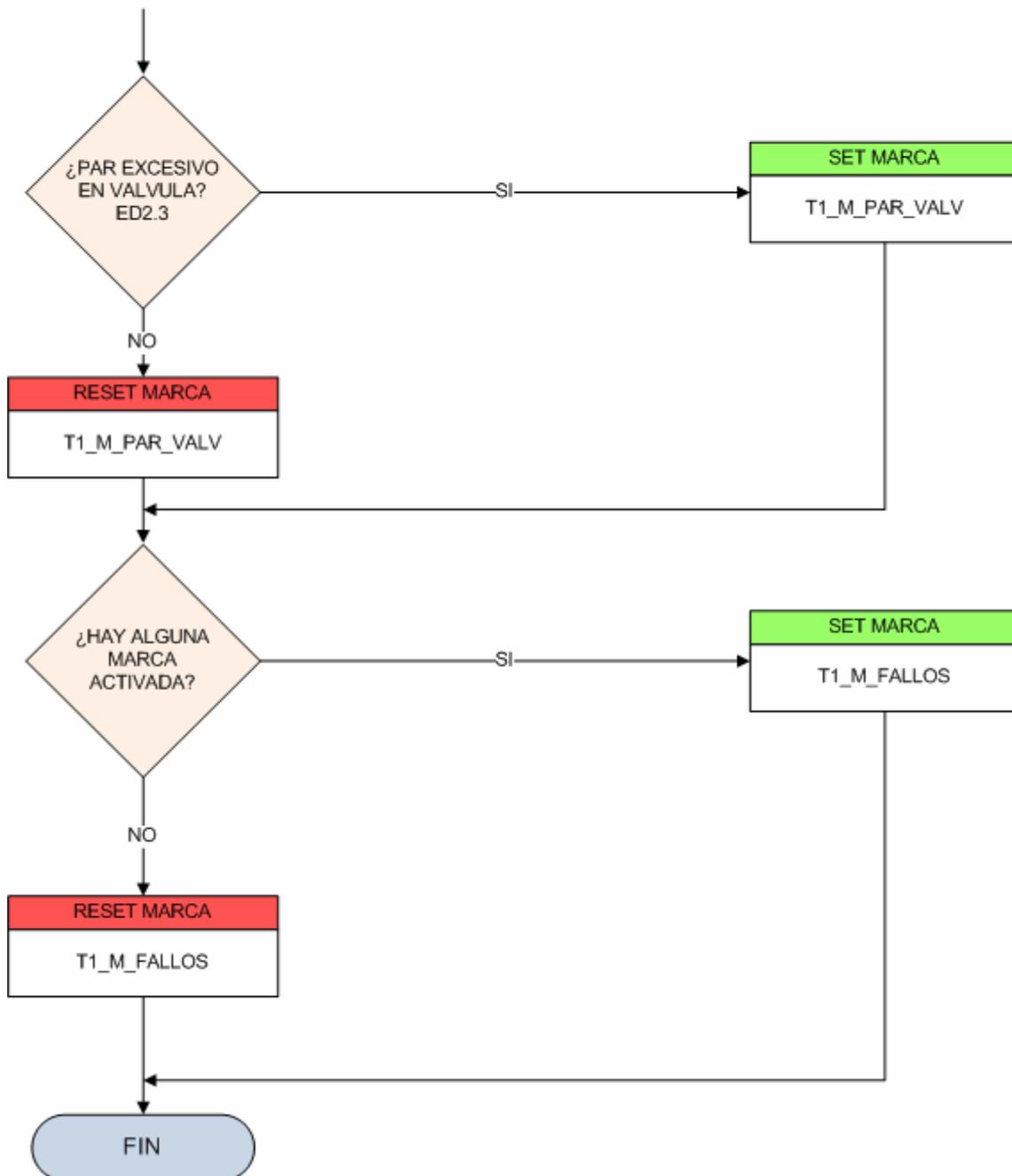
## Función FC10 Fallos, Emergencias e Intrusismos. 3/5.



## Función FC10 Fallos, Emergencias e Intrusismos. 4/5.



## Función FC10 Fallos, Emergencias e Intrusismos. 5/5.



### 6.3.3- FC20, COMPROBACIÓN DE SEÑALES

La función FC20 está destinada a la obtención de los estados de la válvula de toma. Se añaden además la comprobación de defectos de apertura y cierre y la verificación de los valores obtenidos por las entradas analógicas.

La función se divide en dos secciones; estados y defectos de la válvula y conversión de las señales analógicas y comprobación de las mismas.

#### • Estados

En la comprobación de señales digitales para la obtención de los estados de la válvula se asocian dos marcas de memoria a la entrada digital que indica el estado automático de la válvula. De esta manera se descarta entre modo automático y modo manual.

Como físicamente solo se puede elegir entre estos dos estados solo es necesario señalar uno de ellos. Ver Anexo B, PLANOS, planos de 210 a 214. Por lo tanto si está activada la entrada ED1.5 significará que la válvula estará en automático y se activará la marca T1\_M\_AUTO\_VALV. En caso contrario se borra esta variable y se activa la marca T1\_M\_MAN\_VALV.

De igual forma se comprueban las posiciones de la válvula, abierta o cerrada. En este caso el actuador señala cuando la válvula ha llegado a abrirse totalmente o cerrarse totalmente, mediante una señal para abierta y otra para cerrada. ED2.0 y ED2.1. Se tiene en cuenta en este caso que mientras la válvula se mueve el actuador da un señal, maniobrando, que indica el movimiento de la válvula. Por tanto cuando la válvula llega a fin de movimiento se borra la marca asociada a la señal maniobrando T1\_M\_VALV\_MANIO.

#### • Defectos

La señal maniobrando se utiliza en la comprobación del defecto de apertura o cierre de la compuerta. Se entiende por defecto al fallo de una señal vigilada por tiempo, es decir, el defecto de apertura de la válvula consiste en la vigilancia de la apertura de la misma mediante temporización. Durante la puesta en marcha se estima el tiempo que necesita la válvula en abrirse desde que esta cerrada hasta su apertura total. Luego por programa se vigila este tiempo, si hay orden de abrir y la compuerta tarda más del tiempo estimado en abrirse significa que existe un fallo. A esto se le llama defecto de apertura. El caso del cierre es idéntico.

El diagrama de flujo de este sistema de seguridad es el siguiente.

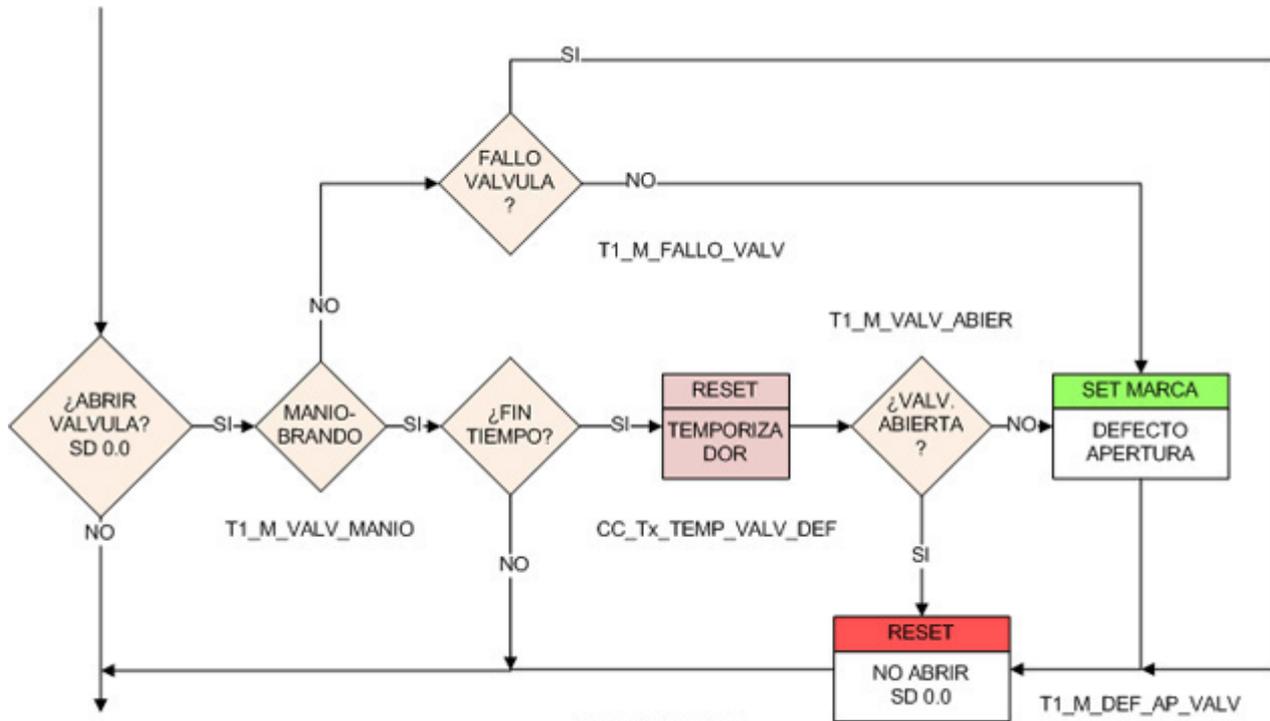


FIGURA 6.3.3-01  
- FRAGMENTO DEL DIAGRAMA DE BLOQUES DONDE SE COMPRUEBA EL DEFECTO DE APERTURA.

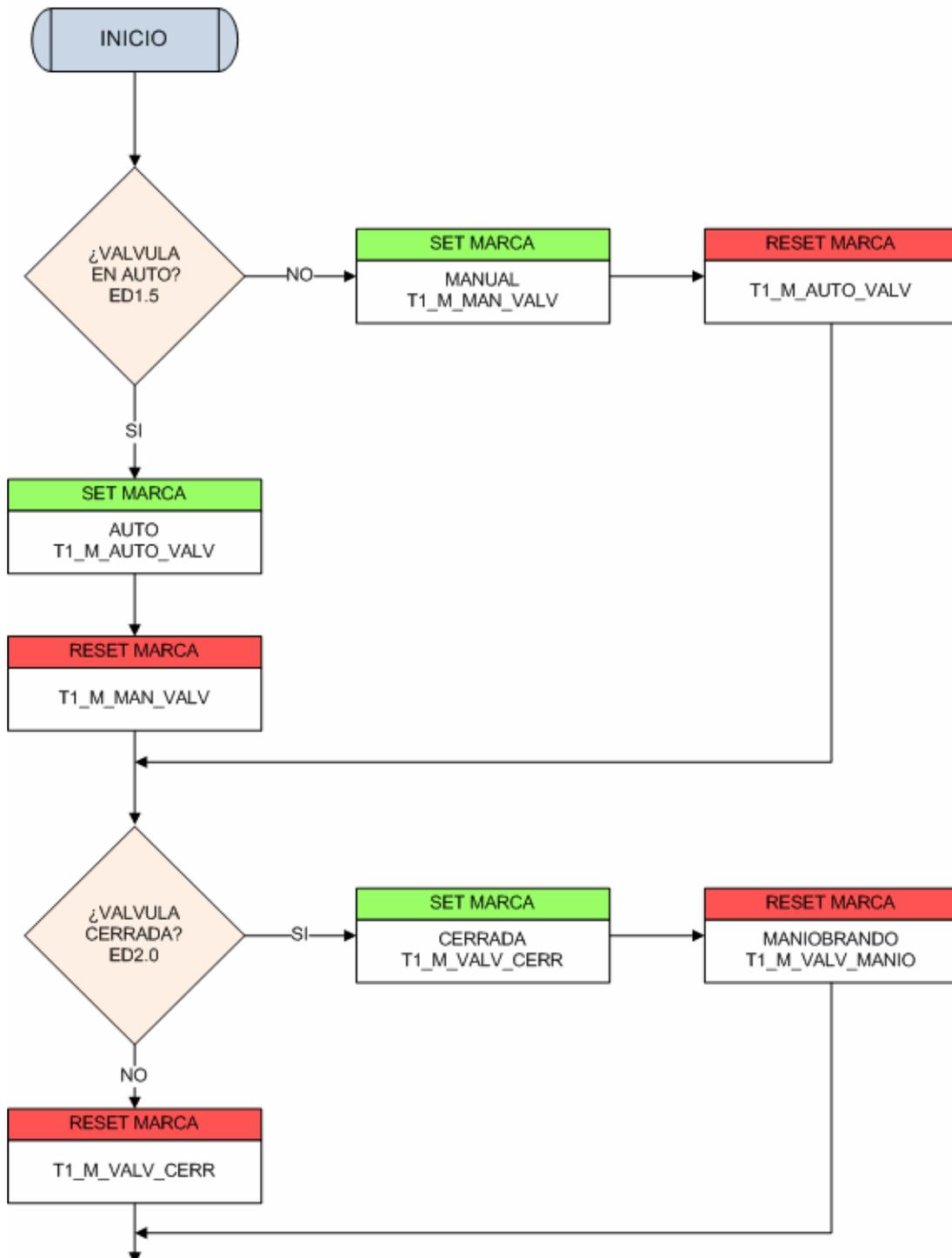
Los defectos son enviados al Centro de Control en la rutina de comunicaciones. El defecto de una compuerta implica la intervención del personal de mantenimiento para la comprobación in situ del fallo y solución del mismo. Estas señales pueden ser acusadas y reseteadas desde el Centro de Control o mediante el terminal de mantenimiento.

### • Comprobación de señales analógicas

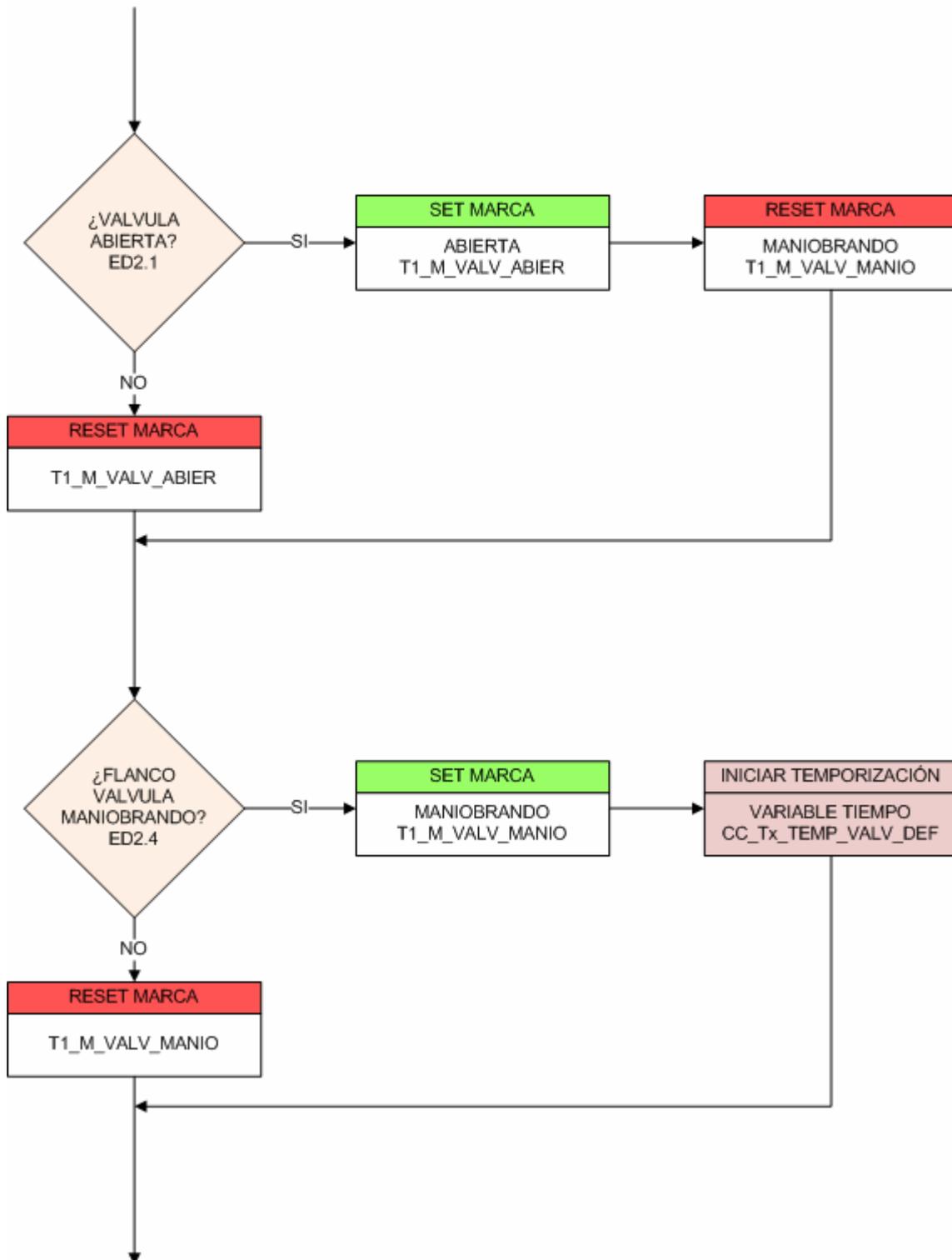
En el caso de las señales analógicas se comprueban los valores anómalos que estas puedan dar y el caso de la rotura del cable de la señal. Para determinar estos fallos es necesario convertir el valor de la señal analógica a valores a manejar en el proyecto, es decir, en el caso de la entrada analógica destinada a la medición de caudal se deben convertir los valores comprendidos entre 4 y 20mA en valores de caudal. En el caso de la señal de posición de la válvula, entre 0 y 100% de apertura por ejemplo.

Para realizar esta conversión los autómatas Siemens de la gama S7-300 disponen de una función específica para el escalado de señales analógicas. Dicha función es la FC105 "SCALE". Ver apartado 6.2.3 – COMPROBACIÓN DE SEÑALES, sección *Función FC105 scale*. Una vez obtenido el valor convertido o valor de salida, la comprobación del hilo roto se consigue gracias a la elección de señal analógica de corriente 4-20mA, donde 4mA corresponde al mínimo valor a medir por lo que si se obtienen 0mA, hilo roto, el escalado dará un valor negativo. Si los valores de salida obtenidos están fuera de los establecidos por las consignas de máximo y mínimo (HI\_LIM, LO\_LIM) se consideran anómalos.

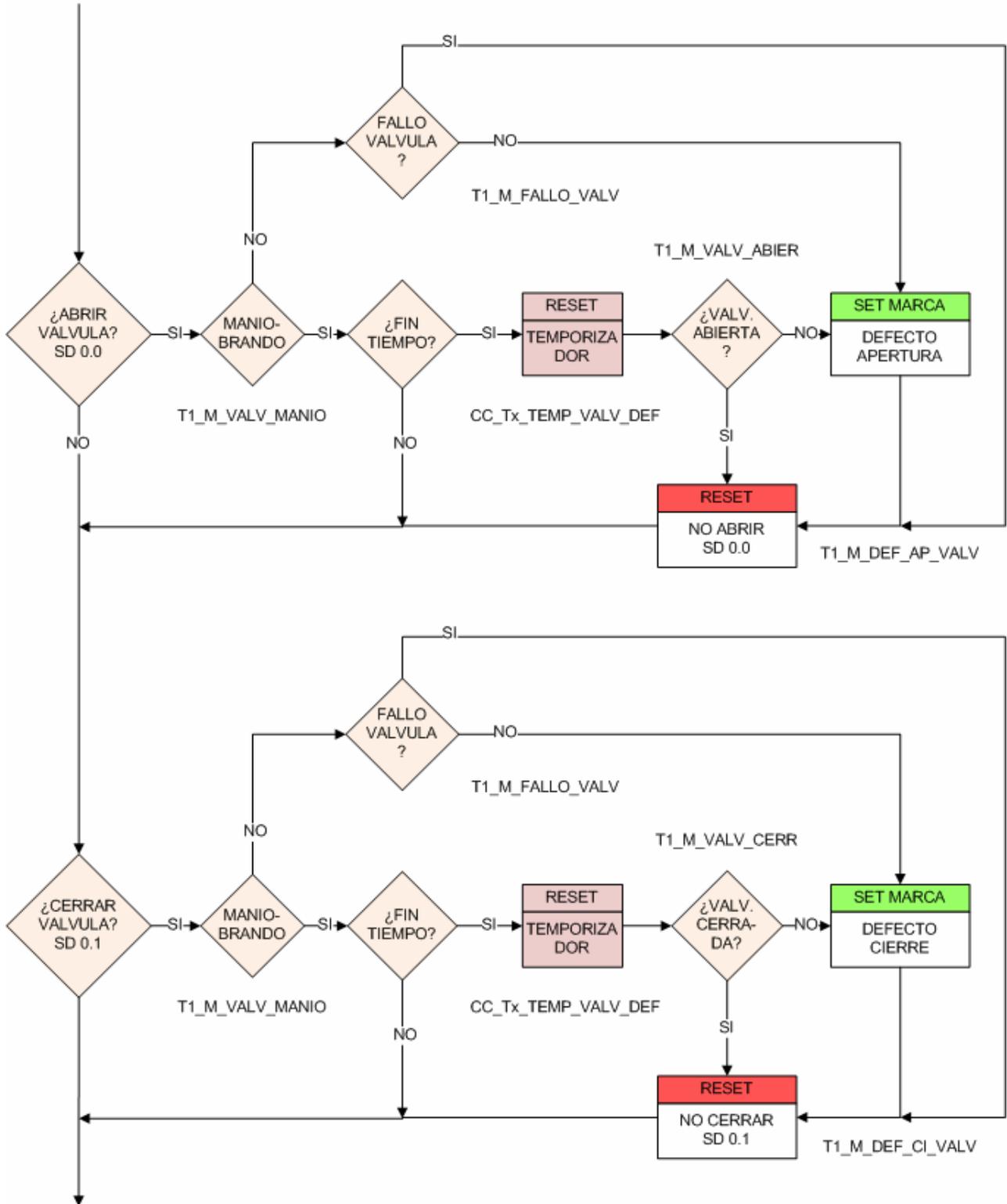
## FC20 Comprobación de señales. 1/4



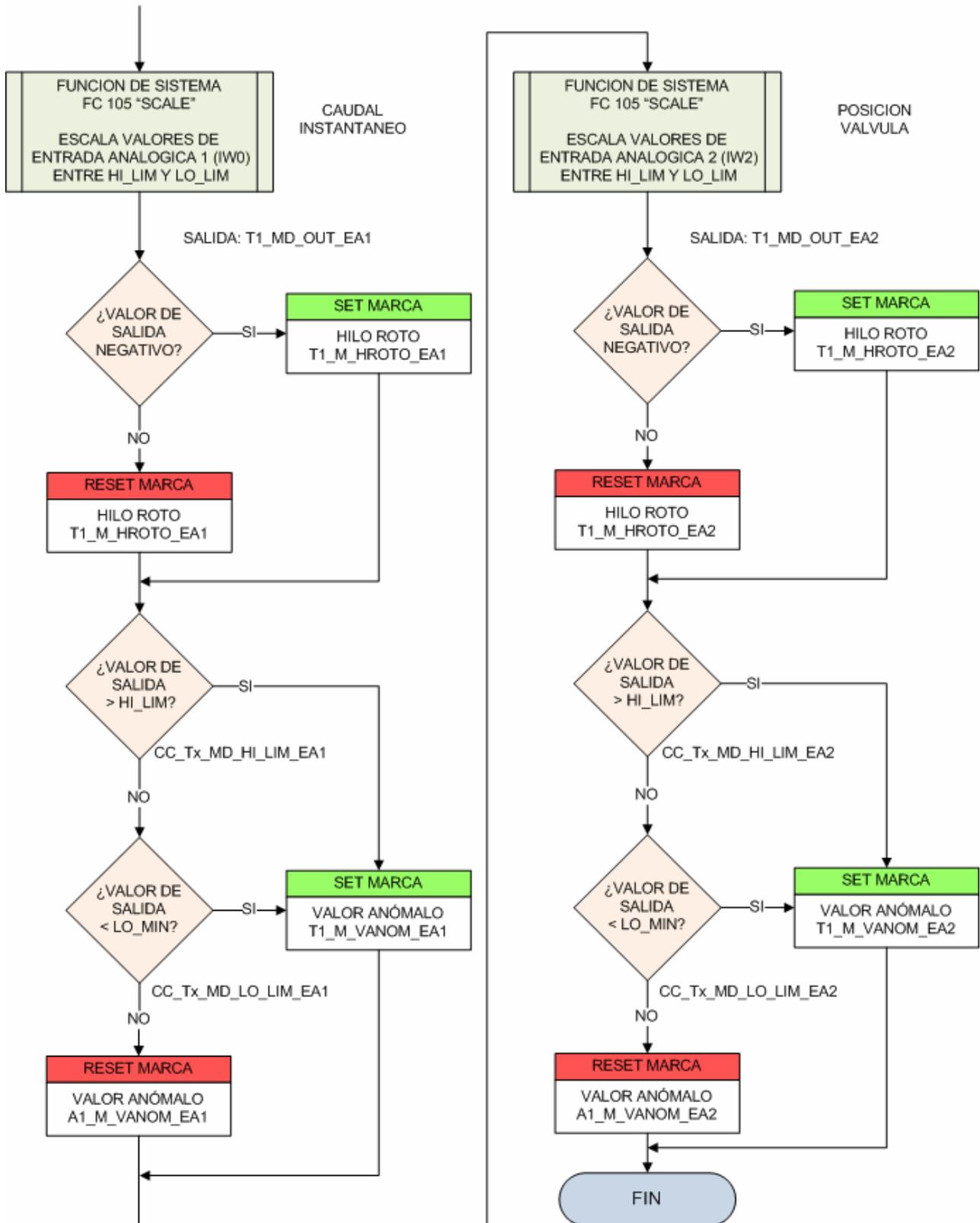
## FC20 Comprobación de señales. 2/4



## FC20 Comprobación de señales. 3/4



## FC20 Comprobación de señales. 4/4



### 6.3.4- FC40 COMUNICACIONES.

Primero, pasamos a describir los datos que son necesarios enviar y recibir, desde la estación remota Toma al Centro de Control para el correcto funcionamiento del sistema.

#### ● Datos a enviar por la Estación Remota Toma.

#### FALLOS

La estación Remota Toma envía al Centro de Control 2 bytes de Fallos, de esta forma el personal de mantenimiento puede averiguar rápidamente la causa de los posibles fallos. En estos 2 bytes hay información sobre los fallos eléctricos de sobretensiones, señales de intrusismo y emergencia, etc.

FALLOS		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
M 0.0	SOBRETENSION 400VAC	T1_ED_SOBRET
M 0.1	FALLO FASE/ASIMETRIA/NO R-S-T	T1_ED_FALLO_FASE
M 0.2	DISYUNTOR VALVULA	T1_ED_NO_VAC_VALV
M 0.3	DISYUNTOR S.A.I.	T1_ED_NO_VAC_SAI
M 0.4	DISYUNTOR CAUDALIMETRO	T1_ED_NO_VAC_FA_CAUD
M 0.5	SEÑAL DE EMERGENCIA	T1_ED_EMERG
M 0.6	DISYUNTOR F.A. COMUNICACIONES	T1_ED_NO_VAC_FA_COM
M 0.7	FALLO EN S.A.I.	T1_ED_FALLO_SAI
M 0.8	BATERIA BAJA EN S.A.I.	T1_ED_BAT_BAJA
M 0.9	S.A.I. EN MODO BATERIA	T1_ED_MODAL_BAT
M 1.0	SEÑAL DE INTRUSISMO	T1_ED_INTRUSO
M 1.1	INHABILITACION DE INTRUSISMO	T1_ED_NO_INTRUSO

#### ESTADOS

Mediante el envío de 1 byte se obtiene el estado de la válvula de la toma.

ESTADOS		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
M 2.0	AUTO/MAN VALVULA	T1_ED_AUTO_VALV
M 2.1	VALVULA CERRADA	T1_ED_VALV_CERR
M 2.2	VALVULA ABIERTA	T1_ED_VALV_ABIER
M 2.3	FALLO EN VALVULA	T1_ED_FALLO_VALV
M 2.4	PAR SOBREPASADO EN VALV	T1_ED_PAR_VALV
M 2.5	VALVULA MANIOBRANDO	T1_ED_VALV_MANIO

#### DEFECTOS

Se envía 1 byte al Centro de Control. Mediante este envío se detectan defectos en el sistema, entendiendo por defecto el fallo de una señal vigilada por tiempo.

DEFECTOS		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
M 3.0	DEFECTO APERTURA VALVULA	T1_M_DEF_AP_VALV
M 3.1	DEFECTO CIERRE VALVULA	T1_M_DEF_CI_VALV
M 3.2	HILO ROTO EA 1	T1_M_HROTO_EA1
M 3.3	VALOR ANOMALO EA 1	T1_M_VANOM_EA1
M 3.4	HILO ROTO EA 2	T1_M_HROTO_EA2
M 3.5	VALOR ANOMALO EA 2	T1_M_VANOM_EA2

## CONVERSIONES

Conversiones usadas por el Centro de Control para realizar cálculos, se envían 6 DWords.

CONVERSIONES		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
MD4	VALOR DECIMAL ESCALADO EA1	T1_MD_OUT_EA1
MD8	VALOR DECIMAL ESCALADO EA2	T1_MD_OUT_EA2
MD12	LIMITE SUPERIOR EA1	T1_MD_HI_LIM_EA1
MD16	LIMITE INFERIOR EA1	T1_MD_LO_LIM_EA1
MD20	LIMITE SUPERIOR EA2	T1_MD_HI_LIM_EA2
MD24	LIMITE INFERIOR EA2	T1_MD_LO_LIM_EA2

## ALARMAS

Se envía 1 byte de alarmas al Centro de Control.

ALARMAS		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
M 28.0	ALARMA CAUDAL MINIMO	T1_M_ALARM_CMIN
M 28.1	ALARMA CAUDAL MAXIMO	T1_M_ALARM_CMAX
M 28.2	CERRAR COMPUERTAS	T1_M_CERRAR
M 28.3	ABRIR COMPUERTAS	T1_M_ABRIR

## DATOS TOTALIZADOR

Se envían 3 DWords para gestionar el caudalímetro.

DATOS TOTALIZADOR		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
MD30	TOTALIZADOR	T1_MD_TOTALIZ
MD34	TOTALIZADOR PARCIAL	T1_MD_TOTALIZ_PARCIAL
MD38	TOTALIZADOR TOTAL	T1_MD_TOTALIZ_TOTAL

## • Datos a recibir en Estacion Remota Toma

### PARÁMETROS DE TIEMPO DE DEFECTO

Recibe 1 DWord.

PARAMETROS DE TIEMPO DE DEFECTO		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
MD42	TIEMPO PARA DETERMINAR DEFECTO	CC_Tx_MD_TEMP_VALV_DEF

### PARÁMETROS DE ESCALADO

Recibe 4 DWords.

PARAMETROS DE ESCALADO		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
MD46	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA1	CC_Tx_MD_HI_LIM_EA1
MD50	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA1	CC_Tx_MD_LO_LIM_EA1
MD54	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR EA2	CC_Tx_MD_HI_LIM_EA2
MD58	CONSIGNA LIMITE INFERIOR EA2	CC_Tx_MD_LO_LIM_EA2

## CONSIGNAS DE VOLUMEN Y CAUDAL

Recibe 3 DWords con las consignas de caudal y volumen.

CONSIGNAS DE VOLUMEN Y CAUDAL		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
MD62	CONSIGNA DE CAUDAL MINIMO EN TOMA	CC_Tx_MD_CAUDAL_MIN
MD66	CONSIGNA DE CAUDAL MAXIMO EN TOMA	CC_Tx_MD_CAUDAL_MAX
MD70	CONSIGNA DE VOLUMEN	CC_Tx_MD_CONSIG_VOL

## PARÁMETROS DE ACCIONAMIENTO DE LA VALVULA

Recibe 3 DWords con las consignas para accionar la válvula.

PARAMETROS DE ACCIONAMIENTO DE LA VALVULA		
DATO	DESCRIPCIÓN	MNEMÓNICO
MD74	CONSIGNA CIERRE PARCIAL	CC_Tx_MD_CIERRE_PARCIAL
MD78	CONSIGNA LIMITE SUPERIOR SA	CC_Tx_MD_HI_LIM_SA
MD82	CONSIGNA LIMITE INFERIOR SA	CC_Tx_MD_LO_LIM_SA

A continuación pasamos a enumerar los distintos puntos de control (Subscriber no.).

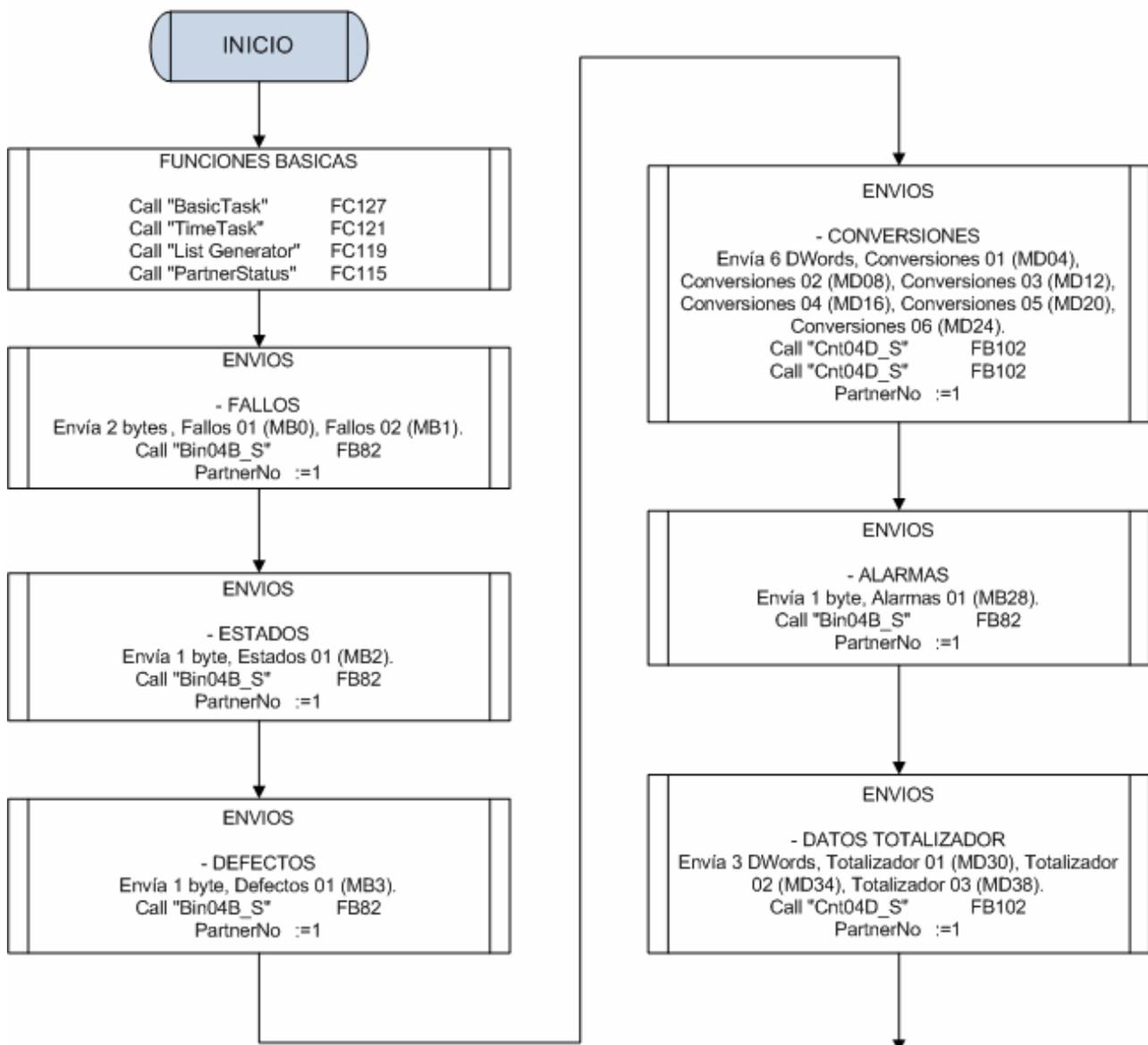
Control Central = SuscriptorNo 1

Estación Remota Toma 01 = SuscriptorNo 4

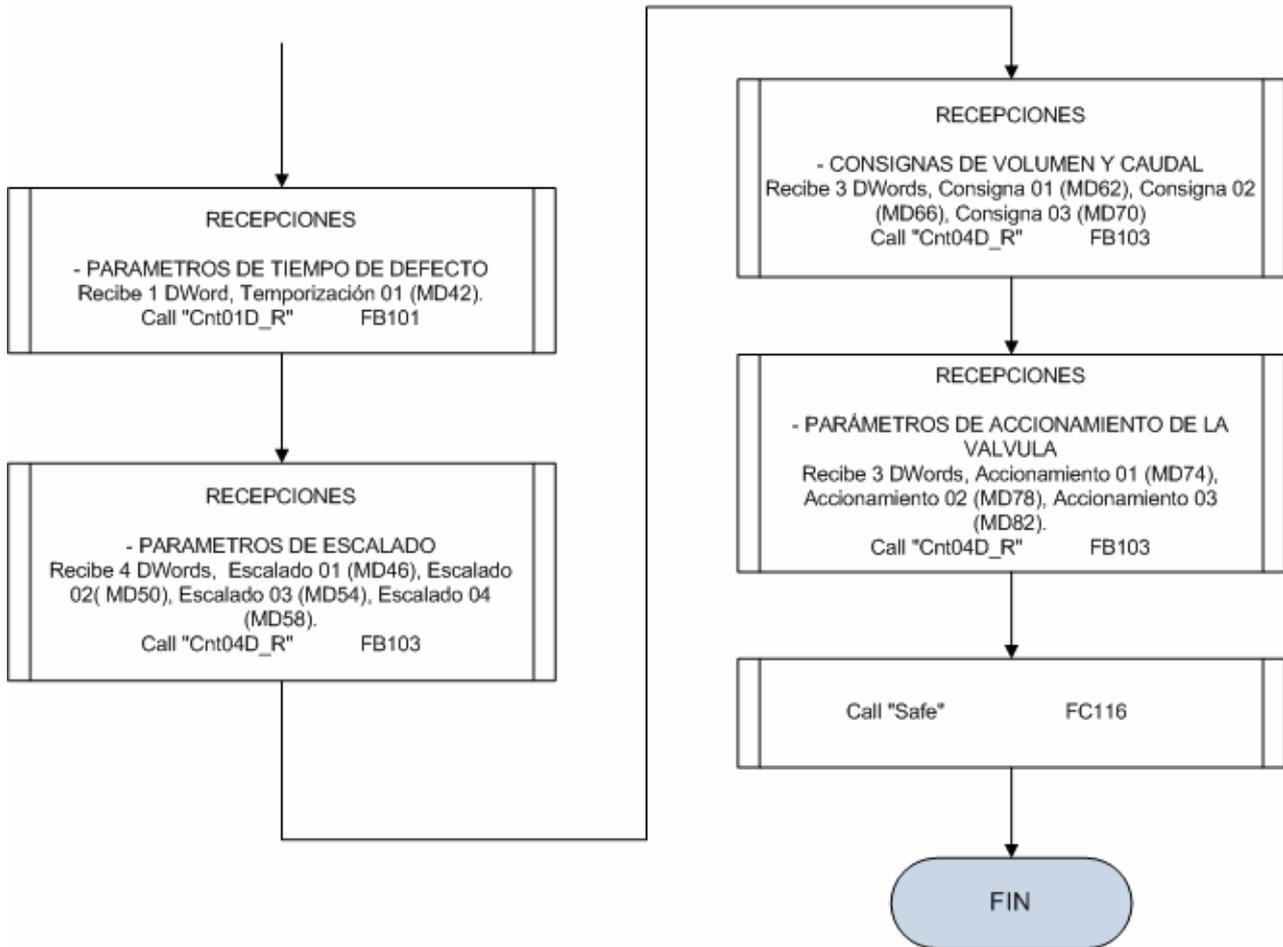
## • Función FC40 Comunicaciones para la Estación Remota Toma

Desarrollo de la función FC40, la cual se encuentra integrada dentro del programa principal. Para consultar el programa principal acudir al apartado 6.2.1 (OB1, BLOQUE PRINCIPAL).

### FC40 Comunicaciones 1/2



## FC40 Comunicaciones 2/2



Primero se llama a una serie de funciones necesarias para el correcto funcionamiento del entorno SINAUT, para a continuación pasar a llamar a las funciones de envío. Se enviarán datos de los fallos, estados, defectos, conversiones, alarmas y datos del totalizador.

Una vez realizadas las llamadas a las funciones de envío se pasará a las recepciones. Se recibirán parámetros de tiempo de defecto, parámetros de escalado, consignas de volumen y caudal y parámetros de accionamiento de la válvula.

### 6.3.5- FC50, TOTALIZADOR DE CAUDAL

En esta función se calcula el volumen de agua que se está suministrando en la toma. Este valor será comparado con el volumen consignado desde el Centro de Control. La forma de suministrar caudal en la toma es mediante petición de volumen. Como se ha explicado en el capítulo 1 existe la figura del *Zabacequia* el cual gestiona las peticiones de los regantes o usuarios del canal. Esta figura recoge las peticiones de los usuarios en volumen de agua ( $m^3$ ) y traslada esta petición al Centro de Control. Este a su vez consigna en la toma dicha cantidad de volumen de forma que la toma suministrará caudal hasta alcanzar dicho volumen.

La función se divide en dos partes. En primer lugar se realiza una comprobación del caudal circulante una vez abierta la válvula. Si ese caudal resultase inferior al caudal mínimo, establecido desde el Centro de Control, podría significar la existencia de problemas en la toma. Debido a la estructura de obra de toma esto podría significar que no hubiese agua suficiente en el canal, o que la tubería o su acceso estuviesen obturados, o fallos en la válvula, etc. Por ello se activa una señal de alarma y se envía al Centro de Control y a su vez se cierra la válvula. En el caso de que el caudal fuese superior al caudal máximo se envía también una alarma, en este caso de caudal máximo, y se cierra parcialmente la válvula al valor establecido por el Centro de Control. Esta medida pretende reducir el caudal circulante sin necesidad de suspender el suministro.

El resto de la función se dedica al cálculo del volumen suministrado y la comparación del mismo con el volumen consignado desde el Centro de Control. Para ello es totalmente necesario que el caudalímetro se configure correctamente. La medida de caudal debe ser en  $m^3/s$ , la señal analógica debe ser proporcional a esta medida en la forma:

$0 m^3/s \rightarrow 4mA$

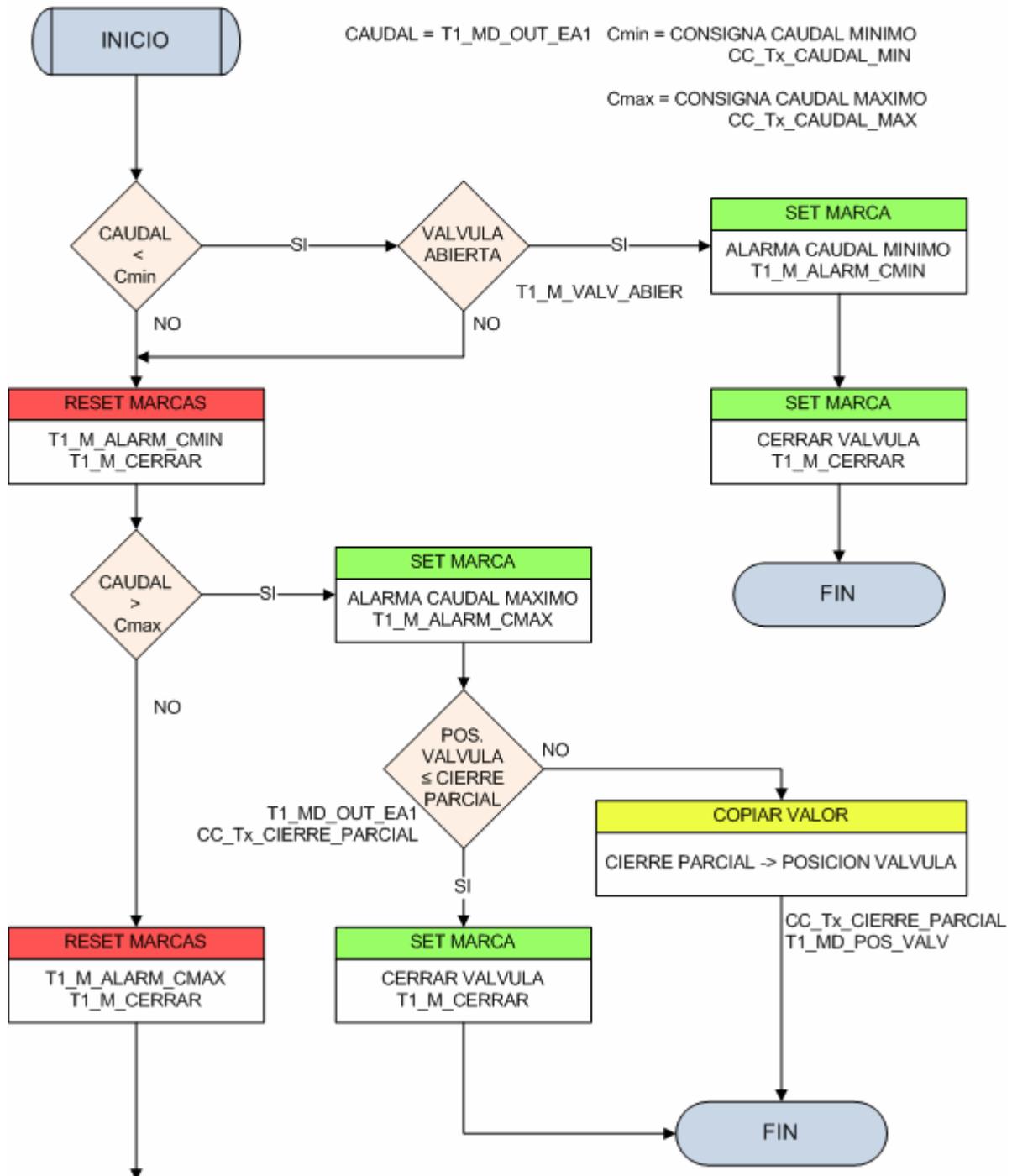
Límite de caudal máximo ( $m^3/s$ )  $\rightarrow 20mA$

El valor del límite de caudal máximo será estimado por el Centro de Control antes de la programación del caudalímetro en la puesta en marcha.

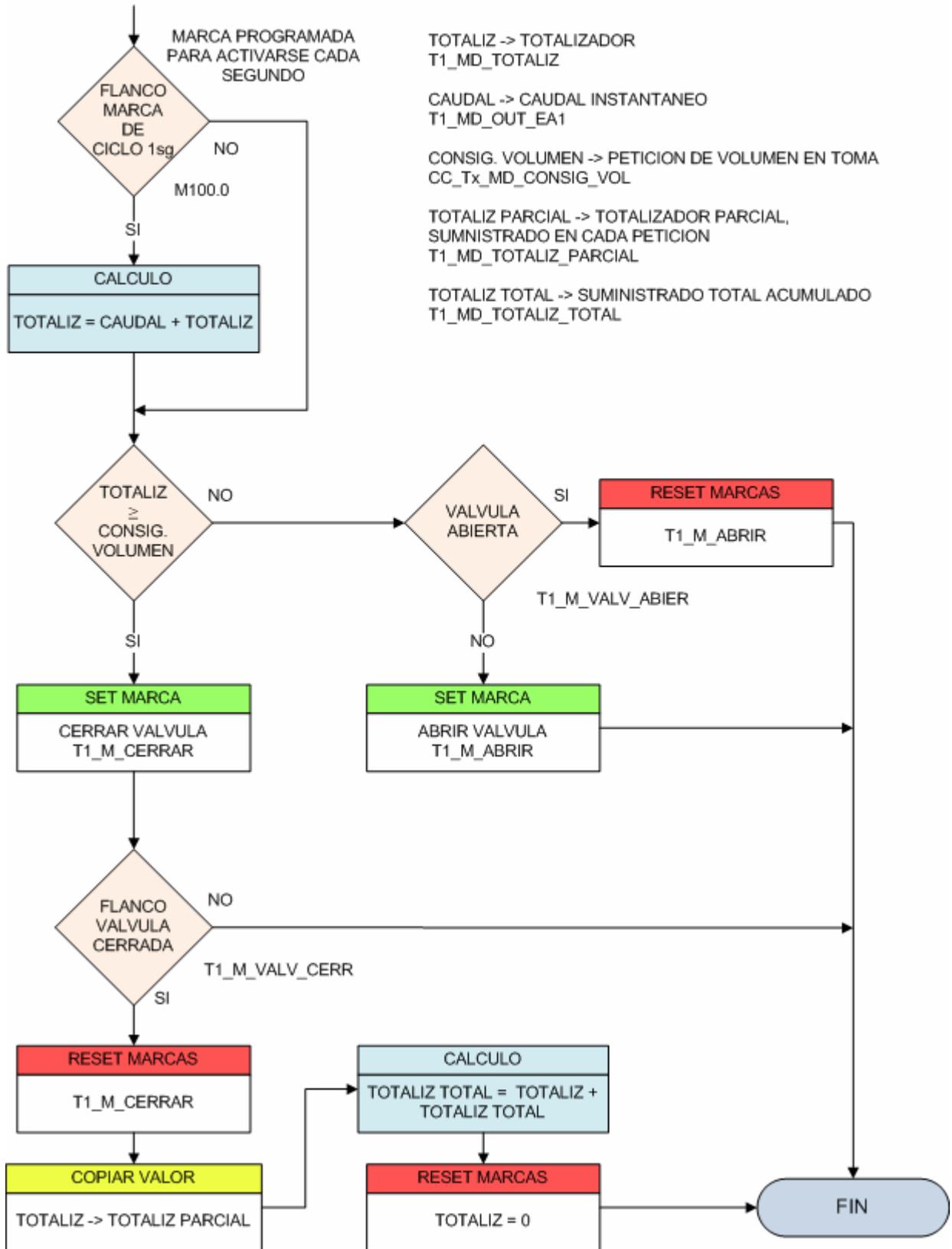
El cálculo del volumen, denominado totalizador, se realiza cada segundo. Los autómatas de la familia S7-300 de Siemens disponen de unas marcas de ciclo que se activan en diferentes tiempos. Así existe una marca que se activa cada 10ms, otra cada 50ms, 100, 500, 1000ms. Estas marcas son programables. Utilizando una de estas marcas, concretamente la de 1sg, se permite el cálculo cada segundo, tomando el valor de caudal instantáneo y sumándolo a la variable totalizador de forma que este valor se incrementa cada segundo según el caudal circulante. De esta forma se obtiene el valor del volumen suministrado.

Cuando el valor del totalizador alcanza el valor de volumen consignado la válvula se cierra, finalizando el suministro de caudal. El volumen suministrado se copia a la variable *Totalizador Parcial* que indica el volumen de agua suministrado en cada petición. Esta variable se envía al Centro de Control. Con esta variable se controla la cantidad real de agua suministrada. Además el valor del totalizador se suma a la variable *Totalizador Total* que lleva la cuenta del volumen total suministrado desde la puesta en marcha de la toma. Esta variable también se envía al Centro de Control. Una vez realizadas estas operaciones la variable totalizador se pone a 0 para iniciar un nuevo suministro de agua.

## FC50 Totalizador. 1/2



## FC50 Totalizador. 2/2



### 6.3.6- FC60, RUTINA DE ACTUACIÓN

En esta función se activan las salidas. Existen dos formas de controlar el actuador que mueve la válvula, mediante señal digital, orden de abrir o cerrar, o mediante señal analógica, indicando posición. Esto implica activar las salidas digitales, en el primer caso, o las analógicas en el segundo caso.

En la rutina se comprueba primero si la válvula está en modo manual o automático y si han sido activadas las marcas de abrir o cerrar, posteriormente se realiza el escalado de la señal de salida analógica.

#### • Salidas digitales

Las salidas digitales solo se activan cuando está a 1 la marca T1\_M\_ABRIR o T1\_M\_CERRAR. Antes de activar la salida se comprueba que la compuerta no este en su tope máximo. Las salidas solo se activan (SET) en esta función que es la última en ejecutarse. Sin embargo estas mismas salidas pueden desactivarse (RESET) en múltiples ocasiones y desde otras funciones como ocurre, por ejemplo, en la función FC20 cuando se detecta un defecto.

#### • Salidas analógicas

El escalado de las señales analógicas se realiza mediante la función FC106 'UNSCALE'. La función "Desescalar valores" (UNSCALE) toma en la entrada IN un valor real que está ajustado a escala en un rango comprendido entre un límite inferior y un límite superior (LO\_LIM y HI\_LIM), y lo convierte en un valor entero. El resultado se escribe en la salida OUT. La función UNSCALE aplica la fórmula siguiente:

$$OUT = [ ((IN-LO\_LIM)/(HI\_LIM-LO\_LIM)) * (K2-K1) ] + K1$$

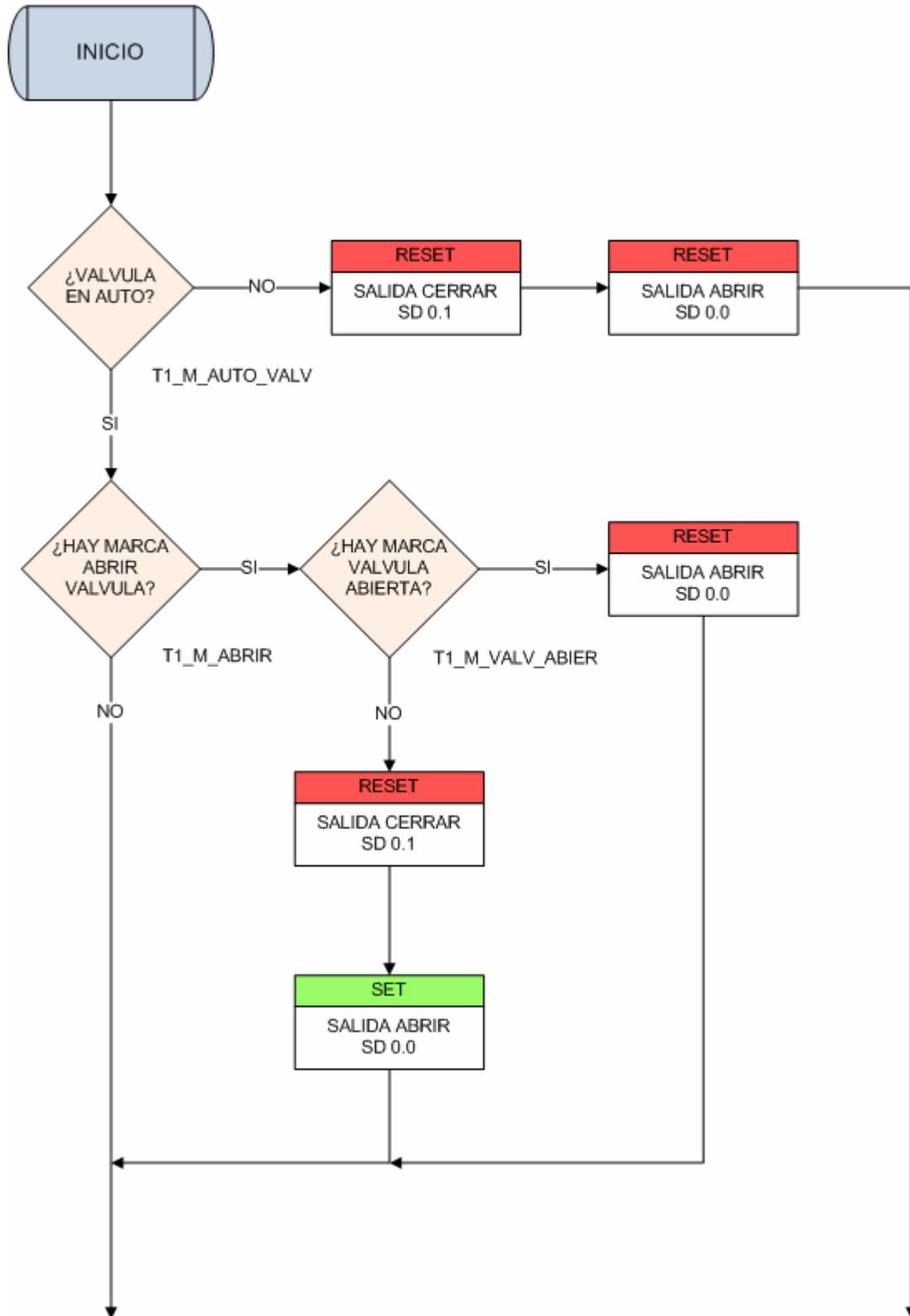
Las constantes K1 y K2 se aplican de forma diferente, dependiendo de si el valor de entrada es BIPOLAR o UNIPOLAR.

BIPOLAR: Se supone que el valor entero de salida debe estar entre -27648 y 27648, por lo tanto, K1 = -27648.0 y K2 = +27648.0

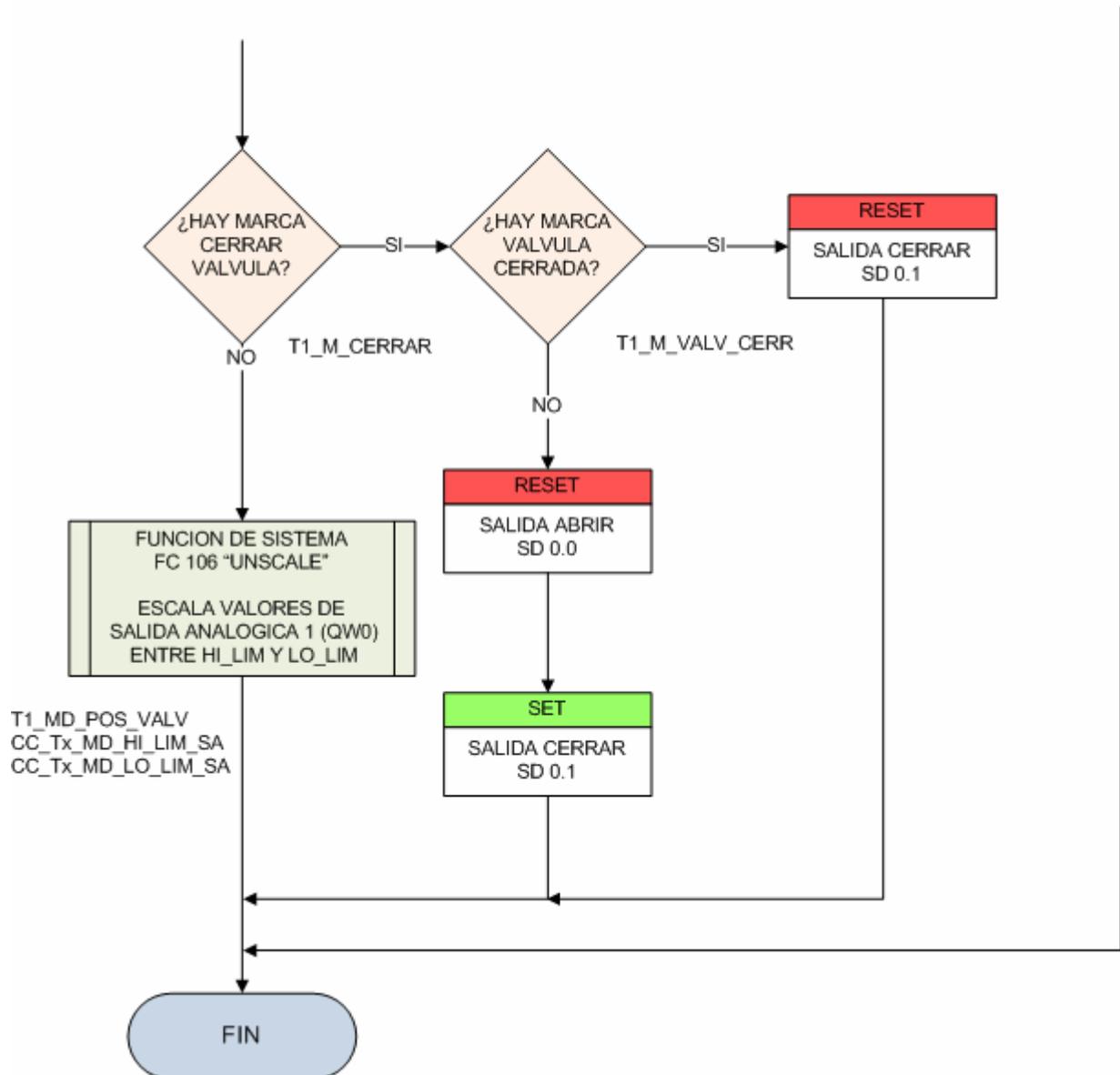
UNIPOLAR: Se supone que el valor entero de salida debe estar entre 0 y 27648, por lo tanto, K1 = 0.0 y K2 = +27648.0

La función FC106 realiza la operación inversa de la función FC105, ver el apartado 6.2.3 - FC20, COMPROBACIÓN DE SEÑALES, sección FUNCIÓN FC105 SCALE. Será necesario ajustar el valor de la posición establecida en FC50 al rango 4-20mA de la salida analógica. En los parámetros HI\_LIM y LO\_LIM se introducirán los valores correspondientes a la apertura máxima y al cierre total respectivamente, que corresponden con las consignas CC\_Tx\_MD\_HI\_LIM\_SA y CC\_Tx\_LO\_LIM\_SA. El parámetro IN será la variable T1\_MD\_POS\_VALV, la salida OUT será la palabra de salida QW0, T1\_SA\_POS\_VALV.

## FC60 Rutina de actuación. 1/2



## FC60 Rutina de actuación. 2/2

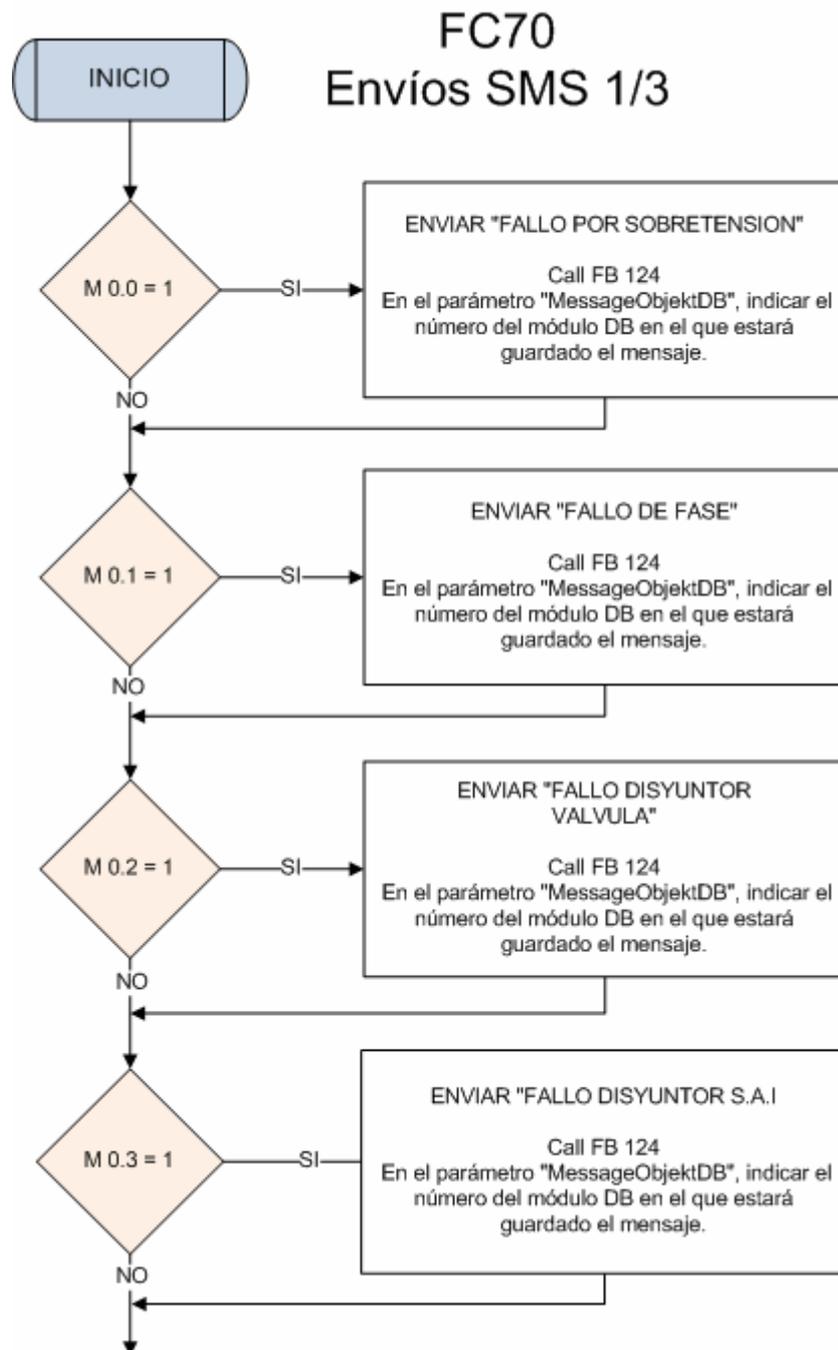


### 6.3.7- FC70, ENVIOS SMS.

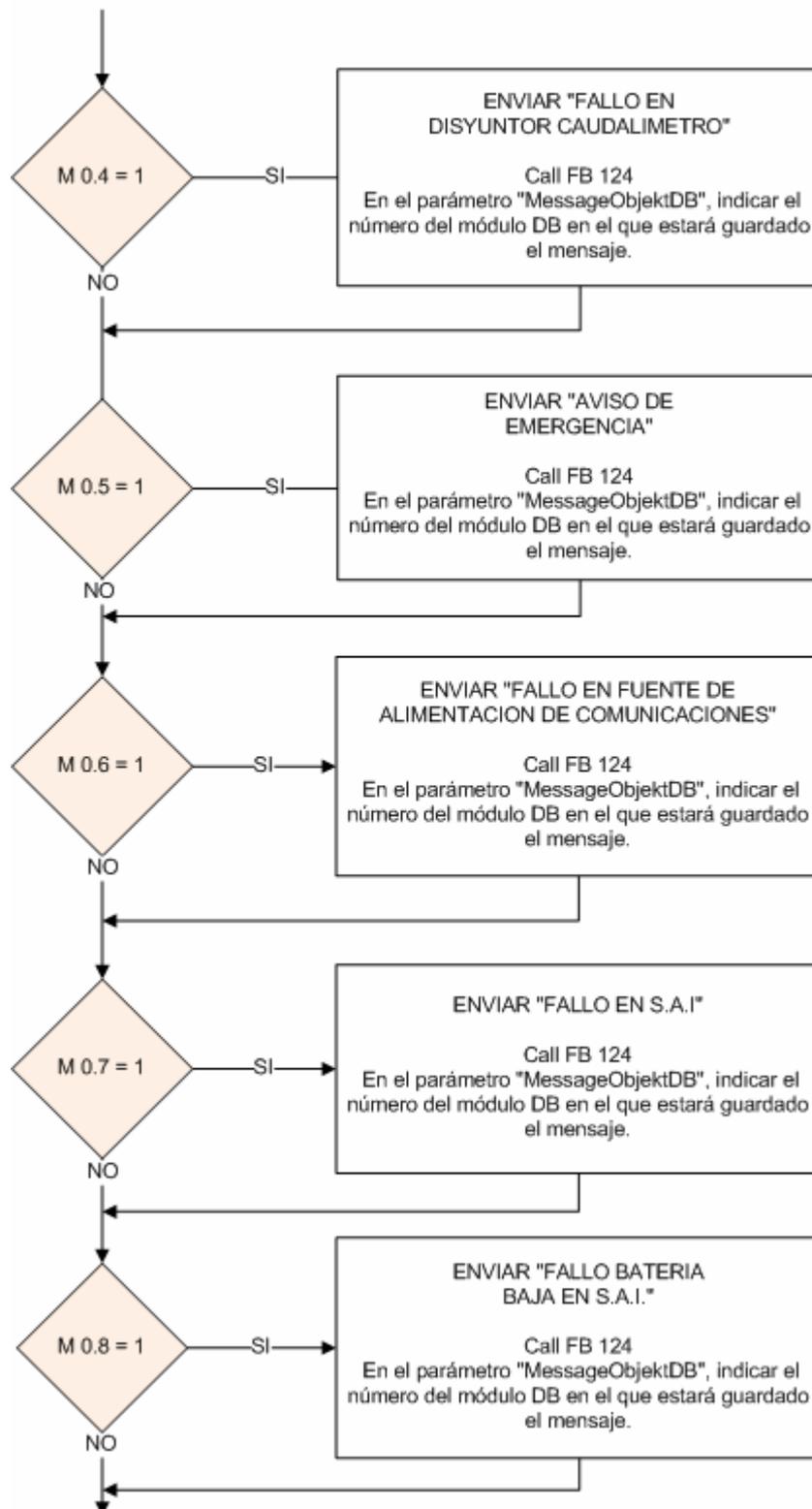
Primero, señalar que será necesario realizar unas configuraciones en el software (SINAUT ST7 : Configuration), dentro de "Administración de suscriptores".

- La carga de los mensajes de texto se realiza por software, en la pestaña "SMS Configuration".

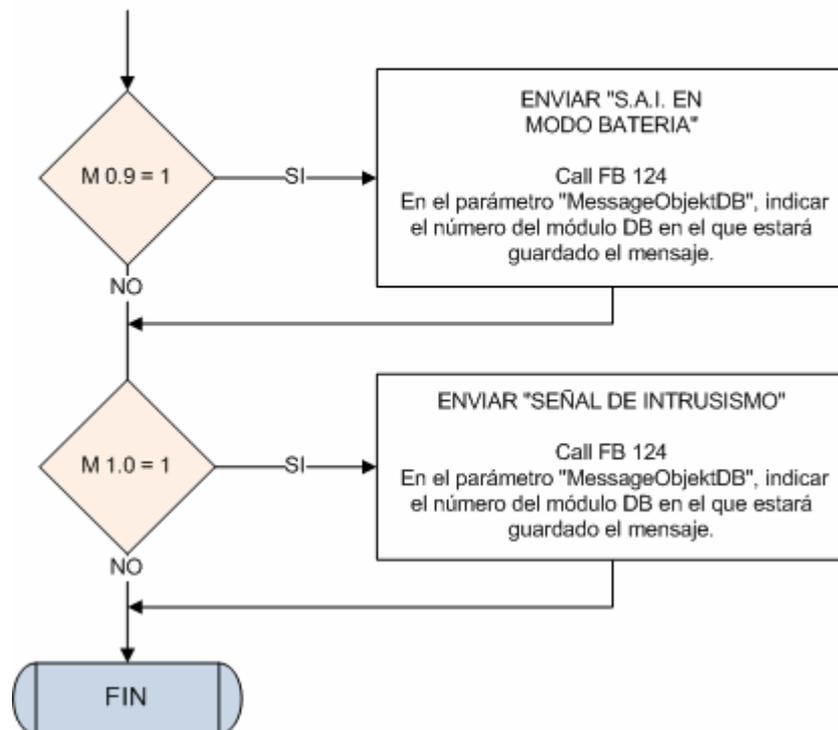
- La carga del número de teléfono del receptor del SMS con su prefijo de país se realiza en la pestaña "DB Configuration".



## FC70 Envíos SMS 2/3



## FC70 Envíos SMS 3/3



Respecto a la función FC70 Envío SMS. Se realizará un chequeo de todos los posibles fallos que pueden suceder (por sobretensión, por fase, en disyuntor válvula, en disyuntor S.A.I., en disyuntor de F.A., en señal de emergencia, en disyuntor de F.A. de comunicaciones, en S.A.I, por batería baja en S.A.I, por modo batería S.A.I. y por intrusismo activo). En el caso de que produzca cualquiera de estos fallos, se enviará el SMS correspondiente, indicando el origen del mismo.

## 6.3.8- LISTADO DE SEÑALES

A continuación se muestran todas las señales, variables y datos utilizados en el programa de la toma.

ENTRADAS DIGITALES			
	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
ED 0.0	SOBRETENSION 400VAC	T1_ED_SOBRET	T1_M_SOBRET
ED 0.1	FALLO FASE/ASIMETRIA/NO R-S-T	T1_ED_FALLO_FASE	T1_M_FALLO_FASE
ED 0.2	DISYUNTOR VALVULA	T1_ED_NO_VAC_VALV	T1_M_NOv_VALV
ED 0.3	-	-	-
ED 0.4	DISYUNTOR S.A.I.	T1_ED_NO_VAC_SAI	T1_M_NOv_SAI
ED 0.5	DISYUNTOR CAUDALIMETRO	T1_ED_NO_VAC_FA_CAUD	T1_M_NOv_FA_CAUD
ED 0.6	SEÑAL DE EMERGENCIA	T1_ED_EMERG	T1_M_EMERG
ED 0.7	DISYUNTOR F.A. COMUNICACIONES	T1_ED_NO_VAC_FA_COM	T1_M_NOv_FA_COM
ED 1.0	FALLO EN S.A.I.	T1_ED_FALLO_SAI	T1_M_FALLO_SAI
ED 1.1	BATERIA BAJA EN S.A.I.	T1_ED_BAT_BAJA	T1_M_BAT_BAJA
ED 1.2	S.A.I. EN MODO BATERIA	T1_ED_MODO_BAT	T1_M_MODO_BAT
ED 1.3	SEÑAL DE INTRUSISMO	T1_ED_INTRUSO	T1_M_INTRUSO
ED 1.4	INHABILITACION DE INTRUSISMO	T1_ED_NO_INTRUSO	T1_M_NO_INTRUSO
ED 1.5	AUTO/MAN VALVULA	T1_ED_AUTO_VALV	T1_M_AUTO_VALV
ED 1.6			T1_M_MAN_VALV
ED 1.7	-	-	-
ED 2.0	VALVULA CERRADA	T1_ED_VALV_CERR	T1_M_VALV_CERR
ED 2.1	VALVULA ABIERTA	T1_ED_VALV_ABIER	T1_M_VALV_ABIER
ED 2.2	FALLO EN VALVULA	T1_ED_FALLO_VALV	T1_M_FALLO_VALV
ED 2.3	PAR SOBREPASADO EN VALV	T1_ED_PAR_VALV	T1_M_PAR_VALV
ED 2.4	VALVULA MANIOBRANDO	T1_ED_VALV_MANIO	T1_M_VALV_MANIO
ED 2.5	IMPULSOS TOTALIZADOR	T1_ED_IMPUL_TOT	T1_M_IMPUL_TOT
ED 2.6	-	-	-
ED 2.7	-	-	-

SALIDAS DIGITALES			
	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
SD 0.0	ABRIR VALVULA	T1_SD_ABRIR_VALV	
SD 0.1	CERRAR VALVULA	T1_SD_CERRAR_VALV	
SD 0.2	-	-	-
SD 0.3	-	-	-
SD 0.4	ALARMA (LAMPARA)	T1_SD_ALARM	
SD 0.5	-	-	-
SD 0.6	-	-	-
SD 0.7	-	-	-

ENTRADAS ANALÓGICAS			
	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
IW 0	EA1 SENSOR CAUDAL INSTANTANEO	T1_EA_CAUDAL	T1_MD_OUT_EA1
IW 2	EA2 POSICION VALVULA	T1_EA_POS_VALV	T1_MD_OUT_EA2
IW 4	-	-	-
IW 6	-	-	-
IW 8	-	-	-

IW 10	-	-	-
IW 12	-	-	-
IW 14	-	-	-

#### SALIDAS ANALÓGICAS

	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
QW0	SA1 MANDO POSICION VALVULA	T1_SA_POS_VALV	T1_MW_OUT_SA1
QW2	-	-	-
QW4	-	-	-
QW6	-	-	-

#### MARCAS

	COMENTARIO	NEMONICO	SEÑALES RELACIONADAS
M 0.0	SOBRETENSION 400VAC	T1_M_SOBRET	
M 0.1	FALLO FASE/ASIMETRIA/NO R-S-T	T1_M_FALLO_FASE	
M 0.2	DISYUNTOR VALVULA	T1_M_NOv_VALV	
M 0.3	DISYUNTOR S.A.I.	T1_M_NOv_SAI	
M 0.4	DISYUNTOR F.A. CAUDALIMETRO	T1_M_NOv_FA_CAUD	
M 0.5	SEÑAL DE EMERGENCIA	T1_M_EMERG	
M 0.6	DISYUNTOR F.A. COMUNICACIONES	T1_M_NOv_FA_COM	
M 0.7	FALLO EN S.A.I.	T1_M_FALLO_SAI	
M 0.8	BATERIA BAJA EN S.A.I.	T1_M_BAT_BAJA	
M 0.9	S.A.I. EN MODO BATERIA	T1_M_MODO_BAT	
M 1.0	SEÑAL DE INTRUSISMO	T1_M_INTRUSO	
M 1.1	INHABILITACION DE INTRUSISMO	T1_M_NO_INTRUSO	
M 2.0	VALVULA EN AUTO	T1_M_AUTO_VALV	
M 2.1	VALVULA EN MANUAL	T1_M_MAN_VALV	
M 2.2	MARCA DE FALLOS	T1_M_FALLOS	
M 2.3	VALVULA CERRADA	T1_M_VALV_CERR	
M 2.4	VALVULA ABIERTA	T1_M_VALV_ABIER	
M 2.5	FALLO EN VALVULA	T1_M_FALLO_VALV	
M 2.6	PAR SOBREPASADO EN VALVULA	T1_M_PAR_VALV	
M 2.7	VALVULA MANIOBRANDO	T1_M_VALV_MANIO	
M 2.8	PULSOS DEL TOTALIZADOR CAUD.	T1_M_IMPUL_TOT	
M 3.0	DEFECTO APERTURA VALVULA	T1_M_DEF_AP_VALV	CC_Ax_MD_TEMP_COMP_DEF
M 3.1	DEFECTO CIERRE VALVULA	T1_M_DEF_CI_VALV	CC_Ax_MD_TEMP_COMP_DEF
M 3.2	HILO ROTO EA 1	T1_M_HROTO_EA1	T1_MD_OUT_EA1
M 3.3	VALOR ANOMALO EA 1	T1_M_VANOM_EA1	CC_Tx_MD_HI_LIM_EA1 CC_Tx_MD_LO_LIM_EA1
M 3.4	HILO ROTO EA 2	T1_M_HROTO_EA2	T1_MD_OUT_EA2
M 3.5	VALOR ANOMALO EA 2	T1_M_VANOM_EA2	CC_Tx_MD_HI_LIM_EA2 CC_Tx_MD_LO_LIM_EA2
MD4	VALOR DECIMAL ESCALADO EA1	T1_MD_OUT_EA1	
MD8	VALOR DECIMAL ESCALADO EA2	T1_MD_OUT_EA2	
MD12	LIMITE SUPERIOR EA1	T1_MD_HI_LIM_EA1	CC_Tx_MD_HI_LIM_EA1
MD16	LIMITE INFERIOR EA1	T1_MD_LO_LIM_EA1	CC_Tx_MD_LO_LIM_EA1
MD20	LIMITE SUPERIOR EA2	T1_MD_HI_LIM_EA2	CC_Tx_MD_HI_LIM_EA2
MD22	LIMITE INFERIOR EA2	T1_MD_LO_LIM_EA2	CC_Tx_MD_LO_LIM_EA2
M28.0	ALARMA CAUDAL MINIMO	T1_M_ALARM_CMIN	
M28.1	ALARMA CAUDAL MAXIMO	T1_M_ALARM_CMAX	

M28.2	CERRAR COMPUERTAS	T1_M_CERRAR	
M28.3	ABRIR COMPUERTAS	T1_M_ABRIR	
MD30	TOTALIZADOR	T1_MD_TOTALIZ	
MD34	TOTALIZADOR PARCIAL	T1_MD_TOTALIZ_PARCIAL	
MD38	TOTALIZADOR TOTAL	T1_MD_TOTALIZ_TOTAL	
M100.0	MARCA DE CICLO A 1sg		
MD128	POSICIONAR VALVULA	T1_MD_POS_VALV	
MD132	LIMITE SUPERIOR SA	T1_MD_HI_LIM_SA	CC_Tx_MD_HI_LIM_SA
MD136	LIMITE INFERIOR SA	T1_MD_LO_LIM_SA	CC_Tx_MD_LO_LIM_SA

## CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES

A continuación se exponen las principales conclusiones extraídas de la realización de este proyecto:

- La elaboración de este proyecto ha permitido abordar la problemática que supone la automatización y el control de un canal de distribución de agua, proponiendo las correspondientes soluciones desde el punto de vista de la infraestructura, la regulación del nivel en el tramo y el sistema de comunicaciones, así como la programación, de forma funcional y conjunta, de todas ellas.
- La automatización del tramo tipo realizada puede ser extrapolable a otros posibles tramos, permitiendo de esta manera realizar la automatización completa de un canal de distribución de agua.
- Por medio de diferentes programas de simulación se ha trabajado con modelos que emulan el comportamiento real tanto de la infraestructura hidráulica como de la infraestructura eléctrica. El trabajo con estos programas de simulación ha proporcionado, vencidas las primeras dificultades, una información muy valiosa para el desarrollo del proyecto.
  - Mediante el programa de simulación HEC-RAS se ha simulado el comportamiento de la infraestructura hidráulica.
  - A través de Matlab se ha simulado el comportamiento dinámico del sistema a controlar, primero de forma aislada, y luego formando parte de la correspondiente estructura de control.
  - Y por último, mediante Radio Mobile se ha simulado la viabilidad del sistema de comunicaciones.
- Es importante señalar que al tratarse de un proyecto multidisciplinar es necesario manejar e integrar conocimientos de diferentes ramas de la ingeniería, como pueden ser la mecánica de fluidos, la regulación automática, la instrumentación y sensorización, las comunicaciones inalámbricas, el telecontrol, la programación de PLCs, la simulación de sistemas, etc.
- Finalmente no queremos dejar de indicar que el trabajo realizado ha sido muy enriquecedor, tanto desde el punto de vista del trabajo multidisciplinar, aplicando y ampliando los conocimientos vistos en la carrera y en el entorno laboral, como desde el punto de vista del trabajo en equipo.



## BIBLIOGRAFÍA

### • Libros consultados

- **Hidráulica de Canales Abiertos.** Autor: Ven Te Chow. Editorial McGRAW-HILL, 1982.
- **El canal imperial de Aragón.** Numero 33. Autores: Antonio de Las Casas Ana Vázquez. (CAI 100).
- **La cultura del agua en Aragón.** Usos tradicionales. Autores: Pilar Bernad Esteban (coordinadora). Editor: Rolde de estudios aragoneses
- **Agua e infraestructuras hidráulicas, presente y futuro en Aragón.** 5ª jornada informativa, Huesca, editorial Comunidad General de Riegos del Alto Aragón, 2 de octubre de 2003.
- **El Canal de Castilla.** Autor: José Luis Alonso Ortega. Junta de Castilla y León. Consejería de Cultura y Bienestar Social 1987.
- **Automatización y telecontrol de sistemas de riego.** Editorial Marcombo 2010. Coordinadores: Antonia Ruiz Canales, José Miguel Molina Martínez. Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de la Región de Murcia.
- **Advanced PID Control.**  
Autores: Karl J. Åström; Tore Hägglund. Editorial ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005
- **Control por computador de procesos industriales.**  
Autores: Ramón Piedrafita Moreno, Antonio Romeo Tello . [1a. ed.] Zaragoza : Kronos, 1999
- **Control de sistemas industriales continuos.**  
Autores: Ramón Piedrafita Moreno . Zaragoza : Kronos, 2002

## • Webs consultadas

Antecedentes

[http://es.wikipedia.org/wiki/Canal\\_\(hidráulica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Canal_(hidráulica))

[http://es.wikipedia.org/wiki/Categoría:Canales\\_de\\_España](http://es.wikipedia.org/wiki/Categoría:Canales_de_España)

Compuertas

<http://www.coutex.es>

Valvulas

<http://www.orbinox.com/>

Instrumentación

<http://www.vega.com/es/index.htm>

<https://www.automation.siemens.com>

SAI

<http://www.riello-ups.com>

PLC

<https://www.automation.siemens.com>

Actuador

<http://www.rotork.com>

Armario eléctrico

<http://www.eldon.nl/es/Descargas/Planos-y-Instrucciones-De-Montaje/>

Redes inalámbricas

[http://es.wikipedia.org/wiki/Red\\_inalámbrica](http://es.wikipedia.org/wiki/Red_inalámbrica)

Módulos de comunicación TIM

[http://www.automation.siemens.com/mcms/industrial-](http://www.automation.siemens.com/mcms/industrial-communication/es/telecontrol/modulos-de-comunicaciones-tim/Pages/Default.aspx)

[communication/es/telecontrol/modulos-de-comunicaciones-tim/Pages/Default.aspx](http://www.automation.siemens.com/mcms/industrial-communication/es/telecontrol/modulos-de-comunicaciones-tim/Pages/Default.aspx)

Telecontrol

[http://www.automation.siemens.com/mcms/automation/es/industrial-](http://www.automation.siemens.com/mcms/automation/es/industrial-communications/telecontrol-sinout/Pages/Default.aspx)

[communications/telecontrol-sinout/Pages/Default.aspx](http://www.automation.siemens.com/mcms/automation/es/industrial-communications/telecontrol-sinout/Pages/Default.aspx)

WIMAX

<http://www.alvarion.com/>

## • Origen de las imágenes utilizadas

### FIGURA 1.2-01

- ANTIGUO DIBUJO EN PLANTA Y PERFIL DE UNA ALMENARA DE RIEGO DEL CANAL IMPERIAL DE ARAGON

FUENTE: La cultura del agua en Aragón. Usos tradicionales. Autores: Pilar Bernad Esteban (coordinadora).

### FIGURA 1.2-02

- SISTEMA DE REGULACION NO AUTOMATICO EMPLEADO EN LA ANTIGUEDAD. LA REGULACION ERA LLEVADA A CABO POR EL ACEQUIERO.

FUENTE: [http://servicios.laverdad.es/murcia\\_agua/index.htm](http://servicios.laverdad.es/murcia_agua/index.htm)

Murcia y el agua. Historia de una pasión. Cap.nº6: Las acequias y las aguas muertas

### FIGURA 1.2-04

- CANAL DE DISTRUBUCION Y ABASTECIMIENTO DE AGUA RECIEN REVESTIDO

FUENTE: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Canal\\_de\\_riego\\_recien\\_revestido.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Canal_de_riego_recien_revestido.jpg)

### FIGURA 2.2-03

- DIBUJO DE UNA COMPUERTA VERTICAL TIPO VAGÓN PARA CANALES DE GRANDES DIMENSIONES, MARCA COUTEX.

FUENTE: <http://www.coutex.es>

### FIGURA 2.5-02

- DIFERENTES TIPOS DE VALVULAS.

FUENTE: <http://www.vamein.es/productos/ventajas.htm>

### FIGURA 3.2.1-05

- CPU 315-2PN/DP, SIEMENS

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

### FIGURA 3.2.1-06

- ENTRADAS DIGITALES SM321 DI32

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

### FIGURA 3.2.1-07

- SALIDAS DIGITALES SM 322 DO16

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

### FIGURA 3.2.1-08

- ENTRADAS ANALOGICAS SM 331 AI8

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

### FIGURA 3.2.1-09

- SALIDAS ANALOGICAS SM 332 A04

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 3.2.2-02

- ACTUADOR ROTORK IQ25

FUENTE: [www.rotork.com](http://www.rotork.com)

FIGURA 3.2.3-01

- SAI (SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ININTERRUMPIDA) DLP 150

FUENTE: <http://www.riello-ups.com>

FIGURA 3.2.4-01

- TERMINAL DE VISUALIZACIÓN SIMATIC TP177B

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 3.3.1-01

- SENSOR CERÁMICO-CAPACITIVO PARA MEDICIÓN DE NIVEL (VEGAWELL 52)

FUENTE: <http://www.vega.com/es/index.htm>

FIGURA 3.3.2-01

- SENSOR DE ULTRASONIDOS PARA MEDICIÓN DE NIVEL (VEGASON 61)

FUENTE: <http://www.vega.com/es/index.htm>

FIGURA 3.3.3.1-02

- INSTALACIÓN EN TUBERÍAS EN "U"

FUENTE: Manual caudalímetro "MAG5100\_OI\_Es\_es-ES.pdf".

FIGURA 3.3.3.1-03

- INSTALACIÓN EN TRAMOS HORIZONTALES

FUENTE: Manual caudalímetro "MAG5100\_OI\_Es\_es-ES.pdf".

FIGURA 3.3.3.1-04

- DISTANCIAS RESPECTO A VÁLVULAS, BOMBAS O CURVAS

FUENTE: Manual caudalímetro "MAG5100\_OI\_Es\_es-ES.pdf".

FIGURA 3.3.3.1-05

- INSTALACIÓN VERTICAL

FUENTE: Manual caudalímetro "MAG5100\_OI\_Es\_es-ES.pdf".

FIGURA 3.3.3.1-06

- INSTALACIÓN REMOTA DEL TRANSMISOR

FUENTE: Manual caudalímetro "MAG5100\_OI\_Es\_es-ES.pdf".

FIGURA 3.3.3.2-01

- TRANSMISOR SITRANS F M MAG6000

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 3.3.3.2-03

- GRÁFICA DEL MARGEN DE INCERTIDUMBRE DEL CAUDALÍMETRO

FUENTE: Manual transmisor "MAG\_5\_6000\_Operating\_Instructions\_Es.pdf"

FIGURA 3.3.3.2-04

- INSTALACIÓN LOCAL O REMOTA DEL TRANSMISOR

FUENTE: Manual transmisor "MAG\_5\_6000\_Operating\_Instructions\_Es.pdf"

FIGURA 3.4.1-01

- SALIDAS DEL MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 3V-IE

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 3.4.1-02

- MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 4R-IE

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 3.4.1-03

- SALIDAS DEL MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 4R

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 3.4.1-04

- SALIDAS DEL MÓDULO DE COMUNICACIONES TIM 4R-IE

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 3.4.2-01

- EQUIPO WIMAX BREEZENET B100 ALVARION

FUENTE: <http://www.alavarion.com>

FIGURA 3.4.3-01

- MODEM SIEMENS GSM 720-3

FUENTE: Banco de datos de imágenes SIEMENS

<https://www.automation.siemens.com/bilddb/index.aspx>

FIGURA 5-01

- CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES REDES INALÁMBRICAS SEGÚN SU LONGITUD DE ALCANCE.

FUENTE: [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tipus\\_xarxa.gif](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tipus_xarxa.gif)

FIGURA 5-02

- LOGOTIPO GSM (Groupe Spécial Mobile).

FUENTE: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/GSM222.jpg>

FIGURA 5-04

- LOGOTIPO WIFI (Wireless Fidelity).

FUENTE: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Logo\\_WiFi.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Logo_WiFi.svg)

FIGURA 5-05

- LOGOTIPO BLUETOOTH.

FUENTE: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/d/da/Bluetooth.svg>

FIGURA 5.1-01

- DIFERENTES APLICACIONES DE LA TECNOLOGIA WIMAX.

FUENTE: <http://www.alvarion.com/>

FIGURA 5.1.1-03

- ENLACE 01 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA ALMENARA 1).

FUENTE: <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>

FIGURA 5.1.1-05

- ENLACE 02 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA TOMA 1).

FUENTE: <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>

FIGURA 5.1.1-07

- ENLACE 03 (CENTRO DE CONTROL - ESTACIÓN REMOTA ALMENARA 2).

FUENTE: <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/>