

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**“Sistema de adquisición de datos y control de los equipos de drenaje y  
enfriamiento en Centro de Producción Arenal, ICE”**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Númar Villalobos Cárdenas**

**Mayo del 2011**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**TRIBUNAL EVALUADOR**

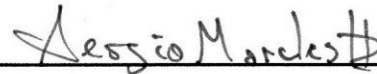
**Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.**

**Miembros del tribunal**



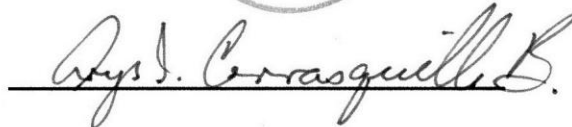
**Ing. Francisco Navarro Henríquez**

**Profesor lector**



**Ing. Sergio Morales Hernández**

**Profesor Lector**



**Ing. Arys Carrasquilla Batista**

**Profesora Asesora**

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 2 de mayo del 2011.


## Hoja de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Instituto Tecnológico de Costa Rica, 17 Febrero, 2011.

  
Númer Villalobos Cárdenas

Cédula: 5-337-704

## Resumen

La modernización es un proceso constante que busca la eficiencia, la seguridad y el rendimiento óptimo del equipo y de quienes los operan.

En este proyecto se desarrolló la automatización de los sistemas de Drenaje y Enfriamiento en la Planta Hidroeléctrica Arenal, estableciendo comunicación entre los diferentes equipos tales como PLC, variadores de frecuencia y pantallas táctiles.

Con el desarrollo de la aplicación de visualización y control llevada a cabo mediante una Interfaz Humano Máquina (HMI) se permitió a los operadores manipular de forma remota el encendido de bombas, válvulas, y la monitorización completa de ambos sistemas.

Mediante un estudio físico del sistema de drenaje se determinó la eficiencia de este proceso, y sentó las bases para el desarrollo de un control basado en la alternancia por tiempo de las bombas que realizan el trabajo de evacuación del agua del piso inferior de la planta, descartando las posibilidades de daño de equipos, debido a una inundación o a la recarga excesiva de trabajo en uno de los motores.

El desarrollo de esta interfaz en la sala de control de la Planta Hidroeléctrica Arenal dejó las ventajas de ahorro de tiempo en la adquisición de datos, eficacia en el control de motores y la presencia de alarmas e historial de fallos

**Palabras Clave:** PLC, HMI, Modbus, variador de frecuencia, caudal.

## **Abstract**

Modernization is a constant process which seeks for the efficiency, security and the best equipment and workers performance.

In this project it was developed the automation of the drainage and cooling systems in the Hydroelectric Plant of Arenal, establishing communication between the different equipments such as PLC, drives and touch screens.

With the development of the visual and control application carried out by a Human Machine Interface (HMI) it was given to the operators the opportunity to manipulate in a remote way the lighting of pumps, valves and the complete monitoring of both systems.

Trough a physic study of the draining system it was determined de efficiency of this process, and it was given the bases for the development of a control based on the alternation by time of the pumps that make the water evacuation work of the lower floor of the plant discarding the possibilities to damage the equipment due to a flood or excessive recharge of one motor.

Save time in data acquisition, efficiency in motor control, alarms, fault history are the advantages given by the implementation of this program in the control room of Arenal Hydroelectric Plant.

**Keywords:** PLC, HMI, Modbus, drive, flow.



## **Agradecimiento**

Le doy gracias primero a Dios que me permitió llegar a este momento, a mis padres Felipe Villalobos Rodríguez y Jennie Cárdenas Díaz que me brindaron el apoyo cuando las metas se veían lejanas; y a mis tres hermanas, Maricella, Eliana y Laura que me animaron perseverar para concluir exitosamente mis estudios universitarios, soy una persona afortunada al tenerlos a todos ustedes cerca.



## Tabla de contenido

TRIBUNAL EVALUADOR .....	2
Hoja de autenticidad .....	3
Resumen .....	4
Abstract.....	5
Agradecimiento .....	6
1. Introducción.....	10
1.1 Drenaje y Enfriamiento, procesos clave en la generación de energía Hidroeléctrica.....	10
1.2 Requerimientos del nuevo Sistema de Control y Visualización. ....	11
2. Metas y Objetivos .....	14
2.1 Meta.....	14
2.2 Objetivo General .....	14
2.3 Objetivos Específicos .....	14
3. Marco Teórico.....	15
3.1 Funcionamiento de los sistemas de Enfriamiento y Drenaje .....	15
3.1.1 Sistema de enfriamiento .....	15
3.1.2 Sistema de Drenaje .....	17
3.2 Conceptos y Principios Utilizados en este Proyecto. ....	18
3.2.1 Modelado Matemático de sistemas físicos.....	18
3.2.2 Diagramas de Escalera. ....	19
3.2.3 Caudal .....	19
3.2.4 Lógica Digital .....	19
3.2.5 Protocolo Modbus.....	20
4. Metodología.....	21



4.1	Conexión con equipos y desarrollo del software .....	21
4.1.1	PLC Modicon Quantum 140 (Sistema de enfriamiento) .....	21
4.1.2	PLC Twido (Sistema de Drenaje).....	21
4.1.3	Aplicación de Pantalla táctil Magelis XBTGT 5230 (Sistema de Enfriamiento) .....	22
4.2	Establecimiento de Comunicación entre los equipos.....	22
4.3	Programación de panel MAGELIS_DE para obtención datos y control del sistema de drenaje. ....	22
4.4	Programación de PLC Twido. ....	23
4.5	Programación del Panel MAGELIS_DE para adquisición de datos del sistema de Enfriamiento. ....	23
4.6	Programación de PLC Modicon Quantum. ....	23
4.7	Sistema General de Alarmas .....	24
4.8	Unión de Interfaz de control de Sistema de Enfriamiento con Interfaz del Sistema de Drenaje. ....	24
4.9	Estudio físico del sistema de Drenaje.....	24
5.	Descripción de la Solución. ....	25
5.1	Comunicación Ethernet.....	25
5.2	Programación de Panel Magelis_DE para adquisición de datos y control del sistema de Drenaje. ....	25
5.3	Programación de módulos en PLC Twido (Sistema de Drenaje) .....	32
5.3.1	Sección Datos Magelis .....	32
5.3.2	Prioridad para lectura Modbus.....	34
5.3.3	Comunicación Modbus-TCP/IP con arrancadores suaves. ....	36
5.3.4	Arranque y paro de Bombas .....	41





5.3.5	Arranque de Bombas de drenaje mediante el método de alternancia por tiempo. ....	42
5.4	Programación de Panel MAGELIS_DE para monitorización del sistema de Enfriamiento.....	45
5.5	Programación de PLC Modicon Quantum para adquisición de datos desde los arrancadores de las bombas de Enfriamiento. ....	45
5.5.1	Comunicación Altistart - Quantum .....	45
5.5.2	Envío de datos al panel MAGELIS_DE desde el PLC Modicon Quantum.....	47
5.6	Sistema General de Alarmas .....	47
5.7	Unión de panel de Enfriamiento y Drenaje. ....	48
5.8	Modelado de Sistema de drenaje para optimización del control de bombas.....	48
6.	Análisis de Resultados .....	51
7.	Conclusiones.....	59
8.	Recomendaciones.....	60
9.	Bibliografía .....	61
9.1	World wide web.....	61
9.2	Libros .....	61
10.	Anexos .....	62
10.1	Sondeo aplicado a operadores de la planta Hidroeléctrica Arenal con el fin de parametrizar la facilidad de uso del software desarrollado. ....	62
10.2	Registros del Arrancador Altistart 48.....	63

## **1. Introducción.**

### **1.1 Drenaje y Enfriamiento, procesos clave en la generación de energía Hidroeléctrica.**

Aumentar la eficiencia es el ideal que siempre se tiene en toda empresa, en este caso concreto, agilizar la recolección de datos y el control de los procesos de drenaje y enfriamiento vendría a disminuir el tiempo que necesitan los operarios para realizar estas labores.

La información del estado y funcionamiento del equipo de enfriamiento de los generadores se tiene de manera local en el tercer piso (nivel 328 msnm) a 50 metros de la sala de control (tercer piso), el sistema de drenaje por su parte tiene un control de arranque y paro por medio de botoneras locales, y no se recopilan datos de su funcionamiento, este se encuentra en el primer piso de la planta (nivel 318 msnm) a unos 80 metros de la sala de operadores. Además, este sistema carece de un estudio que indique cual es el funcionamiento indicado de las bombas para evacuar el agua de forma eficiente minimizando el tiempo de operación de las mismas y eliminando el peligro de rebalse del tanque de captación de aguas residuales.

El proceso de drenaje funciona alternando dos bombas en su encendido, pero se requiere modificar para que tome en cuenta el tiempo trabajado por las bombas y de un balance también en lo respectivo a las horas de funcionamiento.

Controlar y monitorizar remotamente ambos procesos es importante para mantener el correcto funcionamiento de la planta, el cual se podría ver afectado por la no evacuación de agua o el calentamiento de un generador producto de la detección tardía de una alarma o falla en alguno de los dispositivos.

## **1.2 Requerimientos del nuevo Sistema de Control y Visualización.**

Para controlar y vigilar el funcionamiento de los procesos descritos se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Funcionamiento del Sistema de Enfriamiento.
- Funcionamiento del Sistema de Drenaje.
- Personas que manipularán los equipos para control y recolección de datos.
- Seguridad del equipo.
- Dispositivos ya instalados.
- Equipo disponible que se pueda utilizar en el desarrollo de la solución.
- Conectividad e integración con protocolos de comunicación utilizados en la planta.
- Acceso a la interfaz de control y monitorización por parte de los encargados de la planta.

La adquisición de datos y el control de los diferentes equipos se realiza por los operadores, la información que se extraiga debe ser clara y fácil de obtener; el control ha de ser específico y no dar margen a una incorrecta manipulación del proceso producto de un software confuso. Por lo tanto se debe implementar un dispositivo que permita mostrar imágenes, gráficos, animaciones y sonidos.

Los encargados de planta requieren tener acceso al control de estos procesos para la supervisión desde su computadora personal, para esto implementará un módulo que les permita descargar la información vía Ethernet.

El sistema demanda eficiencia en el manejo de información para así asegurarse de que los procesos muestren y cumplan lo que les pida el operador, lo cual indica que se debe disponer de confiabilidad en el tráfico de datos

Se dispone de los siguientes dispositivos en funcionamiento actualmente:

#### Sistema de Enfriamiento.

- 1 PLC Modicon Quantum 140 CPU 651 50 02.30
- 1 HMI Magelis XBTGT 5230
- 3 Arrancadores suaves Altistart 48

#### Sistema de Drenaje.

- PLC Twido Compact TWDLCAE40DRF
- 2 Arrancadores Suaves Altistart 48
- Sensor ultrasónico de nivel de agua Echosis II

En la Planta Hidroeléctrica Arenal se tiene una red Ethernet que conecta la mayoría de dispositivos de control y automatización (red técnica) inclusive de equipos de las plantas Corobicí y Sandillal los cuales se pueden operar desde ahí; por ende el nuevo sistema se acoplará a este protocolo de comunicación.

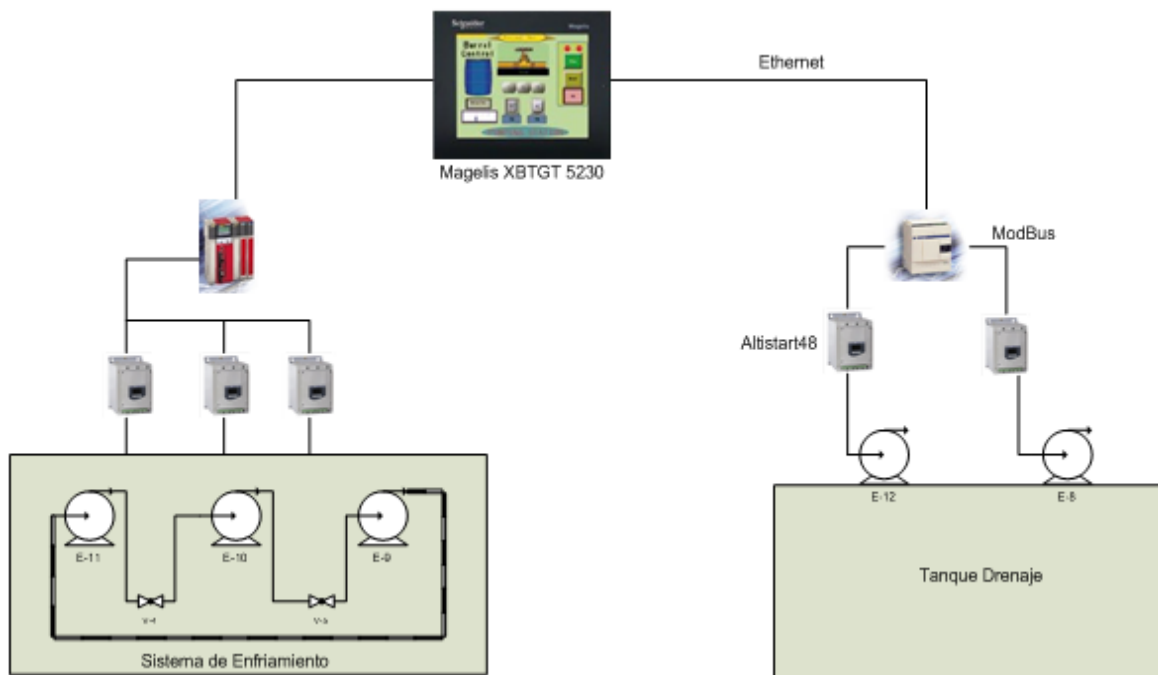
El ingeniero de planta tiene a su disposición dos tipos de pantalla (HMI), una de la marca RedLion G310 y otra de la marca Schneider Magelis XBTGT5230. En el siguiente cuadro se comparan ambos paneles de acuerdo a las características a cumplir en este proyecto.

La tabla 1 muestra que ambas HMI son muy similares, se utilizará la Magelis XBTGT5230 por que la misma posee webgate, esta característica otorga acceso remoto por medio de un explorador de internet, el cual permite ver los datos en pantalla tal y como si se estuviera en presencia del panel.

**Tabla1.** Comparación entre HMI G310 y XBTGT5230

Característica	RedLion G310	Magelis XBTGT5230
<b>Puerto Ethernet</b>	✓	✓
<b>Imágenes</b>	✓	✓
<b>Animaciones</b>	✓	✓
<b>Alarmas</b>	✓	✓
<b>Seguridad</b>	✓	✓
<b>WebGate</b>	X	✓
<b>Gráficos Tendencias</b>	✓	✓

La solución (figura1) contempló entonces comunicar el PLC Quantum, al panel Magelis XBTGT5230, el PLC Twido y los variadores de frecuencia Altistar48 con la red técnica, visualizar los datos de ambos sistemas desde la sala de control y hacer los ajustes y operaciones necesarias en los diferentes equipos mediante el nuevo panel Magelis (en adelante Magelis\_DE).



**Figura 1.** Equipos involucrados en la solución del problema (Figuras de HMI, PLC y variadores de frecuencia tomadas de [www.schneiderelectric.com](http://www.schneiderelectric.com))

## **2. Metas y Objetivos**

### **2.1 Meta**

Disminuir el tiempo empleado para control y recolección de datos de los sistemas de drenaje y enfriamiento en el Centro de Producción Arenal en un 75%, mediante el desarrollo de un sistema que realice estas tareas de forma remota.

### **2.2 Objetivo General**

Diseñar un sistema que permita controlar y visualizar desde la sala de operaciones el funcionamiento de los sistemas de drenaje y enfriamiento, encendiendo las diferentes bombas con un porcentaje de efectividad del 100%.

### **2.3 Objetivos Específicos**

2.3.1 Identificar problemas y causas de fallas en los equipos involucrados en los procesos de drenaje y enfriamiento.

2.3.2 Crear una interfaz gráfica para el sistema de control y adquisición de datos amigable con el operador.

2.3.3 Balancear el encendido de bombas de drenaje de manera que se mantenga la diferencia de tiempo trabajado entre estas por debajo de los diez minutos.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Funcionamiento de los sistemas de Enfriamiento y Drenaje

##### 3.1.1 Sistema de enfriamiento

La Planta Hidroeléctrica Arenal consta de tres unidades turbogeneradoras (turbina y generador), que tienen la capacidad de producir 61725 kVA cada uno con una tensión de 13800V, el sistema de enfriamiento se encarga de mantener el agua circulando por los distintos radiadores para regular la temperatura del cojinete superior e inferior del generador, cojinete de la turbina y del aceite del gobernador.

Puede trabajar de dos formas, modo de emergencia o normal.

- Normal

Es el modo automatizado, el agua se toma del tanque de captación y es extraída mediante dos bombas de tres disponibles, si alguna falla, entra a funcionar la de respaldo.

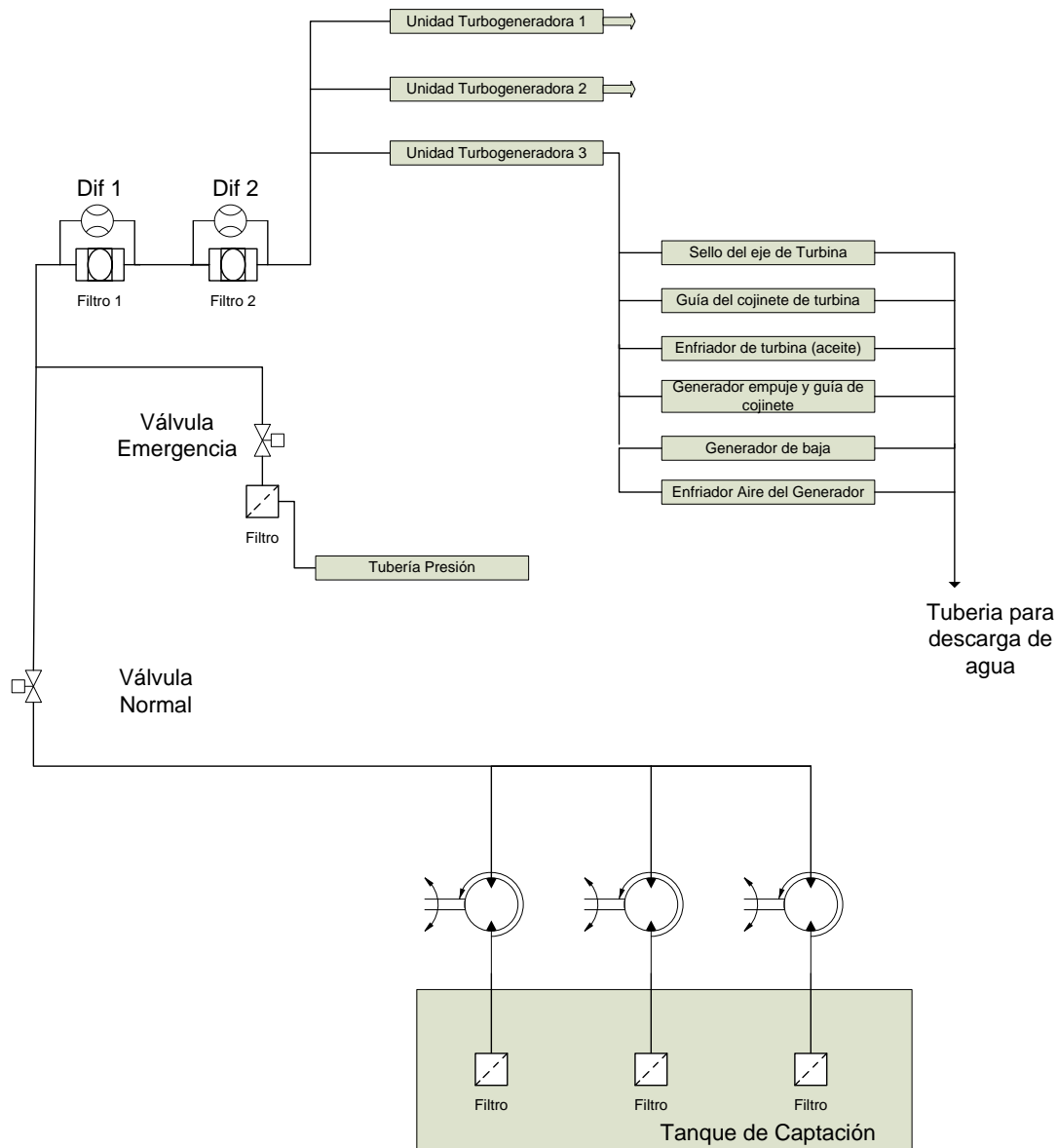
Luego de ser suministrada el agua a la tubería de enfriamiento pasa por dos filtros colocados en serie, estos tienen un sensor de caudal que mide la presión de entrada y de salida en el filtro, cuando la diferencia es mayor a  $0.600 \frac{kg}{cm^2}$  se activa durante cinco minutos.

- Emergencia:

En este caso el agua se toma de la tubería de alta presión y no del tanque de captación, su paso se gobierna mediante la válvula de emergencia, mostrada en la figura 2, y pasa luego por los filtros auto-limpiantes insertándose en el circuito normal de flujo de agua para enfriamiento de las unidades turbogeneradoras.

La figura 2 muestra la ubicación de los diferentes equipos que intervienen para mantener el enfriamiento por agua de las tres unidades turbogeneradoras, las válvulas normal y de emergencia son moto-válvulas, los motores de las bombas

son accionados mediante variadores de frecuencia Altistart de la marca Schneider Electric, por lo que todos los dispositivos descritos en la figura 2 pueden ser controlados eléctricamente.



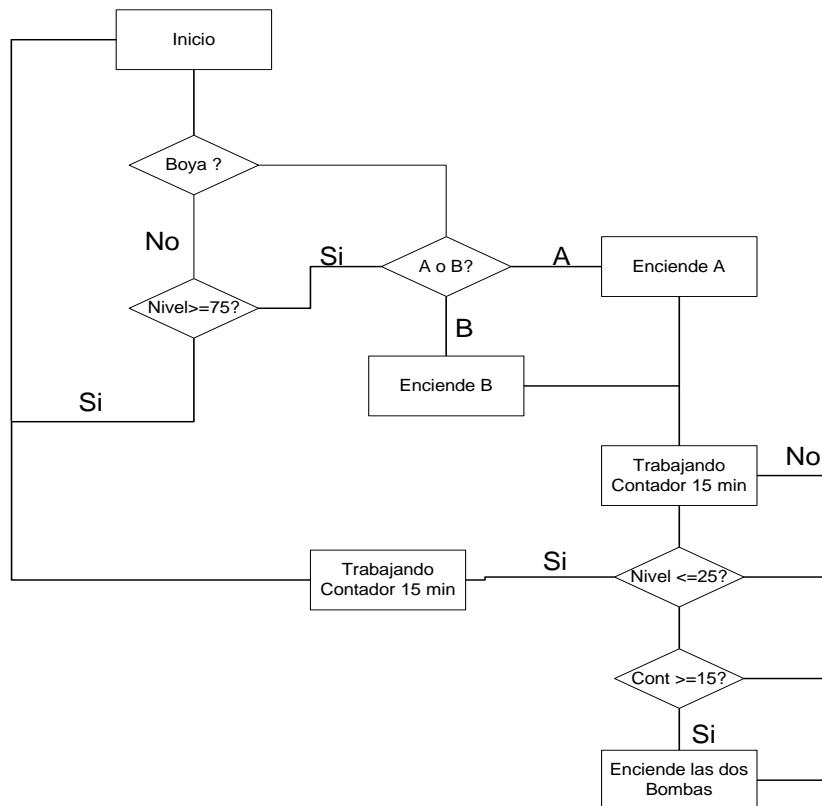
**Figura 2.** Diagrama del Sistema de Enfriamiento



### 3.1.2 Sistema de Drenaje

Se encarga de evacuar las aguas residuales de la planta, las cuales van a dar a un tanque con dimensiones de  $130,626 \text{ m}^3$ , para evitar el rebalse del mismo se realiza el drenaje por medio de dos bombas que trabajan una a la vez (alternándose), el nivel de agua se mantiene entre un 25% y un 75% de la capacidad del tanque, eso para no verter en el lago de captación sustancias más pesadas que se deponen en el fondo, ni bombear otros residuos como arena o tierra.

La figura 3 muestra el funcionamiento básico del sistema, los motores también son arrancados mediante los variadores Altistart los cuales no se comunican con el PLC, solo reciben la señal para el encendido y apagado de los motores, “A” y “B” simbolizan las dos bombas, “Nivel” es el nivel de agua en el tanque de drenaje.



**Figura 3.** Diagrama de Flujo del Funcionamiento del sistema de drenaje

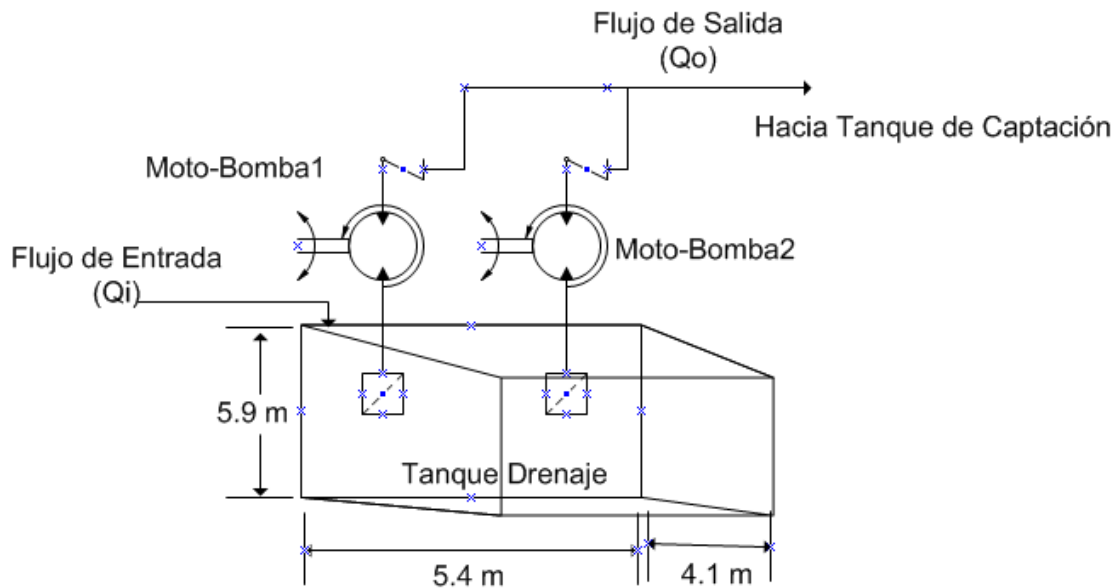
## 3.2 Conceptos y Principios Utilizados en este Proyecto.

### 3.2.1 Modelado Matemático de sistemas físicos

Para optimizar el funcionamiento del sistema de drenaje se modelará el funcionamiento de este sistema hidráulico mediante la ecuación de la continuidad, de la figura 4 se puede deducir que:

$$A \frac{dh}{dt} = Q_i - Q_o \quad (3.1)$$

El caudal de salida se puede saber por la capacidad de las bombas, las dimensiones del tanque son conocidas, el caudal de entrada es incierto y variable por lo cual se tuvo que hacer pruebas aparte para determinar cuál es el comportamiento normal de este parámetro.



**Figura 4.** Sistema de Drenaje

### 3.2.2 Diagramas de Escalera.

La automatización de ambos sistemas se realiza mediante controladores lógicos programables (PLC), las subrutinas y modificaciones agregadas a los programas existentes se desarrollaron en lenguaje de escalera (ladder) y bloques de función (FB), el ladder es la forma típica de desarrollar aplicaciones en PLC, FB por su parte simplifica la programación, disminuyendo el número de líneas de código así como ordenándolo.

### 3.2.3 Caudal

Es la cantidad de un fluido volumétrico que pasa por una sección por unidad de tiempo, en este informe se utilizó unidades de  $\frac{m^3}{min}$  y  $\frac{m^3}{h}$ , este concepto es utilizado para el modelado del sistema de drenaje (sección 5.8).

### 3.2.4 Lógica Digital

Las diferentes variables se guardaron en los siguientes formatos

Bit: Es un dígito que puede tomar sólo dos valores (binario), cero o uno.

Palabra: Es una cadena de 16 bits.

Doble Palabra: Son dos palabras, es decir una cadena de 32 bits

Las variables utilizadas se configuraron del tipo:

BOOL: Para los bits, es el tipo básico de información en computadores.

UINT: (Entero sin signo) Para las palabras, toma valores desde 0 hasta  $2^{16} - 1$

UDINT: (Entero doble sin signo) Para las doble palabras, toma valores entre  $-2^{31} - 1$  hasta  $2^{31} - 1$

### 3.2.5 Protocolo Modbus

Este fue desarrollado por Modicon en 1979, es un Protocolo Maestro – Esclavo y está ubicado en la capa de Aplicación (capa 7 del modelo de referencia OSI), la unidad de datos de protocolo (PDU para Modbus se puede apreciar en la figura 5.

# Esclavo	Código de Operación	Subfunciones/Datos	CRC
-----------	---------------------	--------------------	-----

**Figura 5.** Unidad de datos estándar del protocolo Modbus

*# Esclavo:* Tiene una longitud de un byte, se pueden direccionar hasta 63 dispositivos esclavos.

*Código de Operación:* Es el encargado de transmitir órdenes y datos al esclavo, pueden ser de lectura / escritura de registros u órdenes de control (Carga, descarga, encender, detener.) Es de un byte de longitud.

*Subfunciones/Datos:* Contiene los parámetros complementarios para el código de operación, códigos de subfunciones, direcciones del primer byte o bit, número de bytes o palabras a leer o escribir; longitud de 2 bytes.

*CRC:* Es la comprobación de la trama transmitida, se compone de dos bytes.

## 4. Metodología

### 4.1 Conexión con equipos y desarrollo del software

#### 4.1.1 PLC Modicon Quantum 140 (Sistema de enfriamiento)

El software UNITY Pro es el utilizado para comunicarse con este autómata mediante Ethernet, La dirección ip de fábrica del Quantum es 84.24.1.68/8, la computadora se configuró con 84.24.1.69/8, una vez realizado esto se puede transferir el programa o respaldar el que tiene el PLC.

#### 4.1.2 PLC Twido (Sistema de Drenaje)

Se administró mediante Ethernet con el software TwidoSuite, su dirección ip por defecto se obtiene de la MAC y es:

85.16.aa.bb, donde;

**bb:** Dos bytes menos significativos de la dirección MAC  
**aa:** tercer y cuarto byte menos significativos de la dirección MAC.

La dirección MAC del PLC Twido es: 00.80.F4.81.B3.77  
Entonces la ip predeterminada para este autómata es: 85.16.179.119/8

Al igual que con el Quantum se ubican el autómata y la computadora en red para cargar el programa y poder trabajar remotamente.

#### **4.1.3 Aplicación de Pantalla táctil Magelis XBTGT 5230 (Sistema de Enfriamiento)**

El software para la programación de esta pantalla es el Vijeo Designer, la descarga de aplicaciones se realizó vía Ethernet, conexión punto a punto con cable directo, se asigna a la PC una ip que se encuentre dentro de la misma red que el panel.

#### **4.2 Establecimiento de Comunicación entre los equipos**

Para la comunicación de los dos autómatas con el nuevo panel MAGELIS\_DE se eligió el protocolo de comunicación Ethernet puesto que los tres dispositivos tienen la capacidad de utilizarlo, la comunicación entre los arrancadores Altistart y el Twido se hizo mediante Modbus-TCP/IP.

#### **4.3 Programación de panel MAGELIS\_DE para obtención datos y control del sistema de drenaje.**

Se identificaron las variables que almacenan los datos de importancia en este sistema, de ahí se desarrolló la interfaz para:

- Adquisición de datos: Nivel de agua, funcionamiento de las motobombas, Potencia, corriente consumida, factor de potencia, torque del motor y tiempo de funcionamiento.
- Control de Operaciones: Botones para encender y detener motor, así como para reiniciar el sistema luego de una falla.
- Despliegue de alarmas: Nivel alto de agua, fallas de los motores.
- Gráficas de variable: Caudal de agua de entrada, corriente de operación.

#### **4.4 Programación de PLC Twido.**

Se desarrollaron los siguientes módulos:

- Prioridad para comunicación Modbus
- Comunicación Modbus-TCP/IP con los arrancadores
- Visualización de datos y estados mediante el panel MAGELIS\_DE
- Control manual-remoto: Accionamiento y parada de Bombas desde la sala de control así como reset de errores.
- Escogencia automática de bombas para equilibrar el tiempo de Operación.

#### **4.5 Programación del Panel MAGELIS\_DE para adquisición de datos del sistema de Enfriamiento.**

Se llevó a cabo una modificación en los paneles para mostrar la información de trabajo de las bombas del sistema de enfriamiento, de manera que tenga una apariencia estándar con respecto a lo recolección de datos del sistema de drenaje.

Para mostrar de forma específica cuales fueron los últimos problemas que afectaron el sistema, fue agregado un panel de tendencia que muestra la corriente de operación de las tres bombas y una sección de historial de fallas.

#### **4.6 Programación de PLC Modicon Quantum.**

Se agregaron dos secciones en el programa predecesor, estas son N\_Alarmas utilizada para leer mediante Modbus los registros 459 y 4200 (ver registros en anexo 10.2), y NHMI\_4200 en el cual fueron tratados dichos registros para enviar los bits de alarma al panel MAGELIS\_DE.

#### **4.7 Sistema General de Alarmas**

Para recopilar todas las alarmas del sistema de enfriamiento y otros sistemas periféricos se creó un panel resumen, este activa una señal sonora que se mantiene mientras la alarma siga presente o el operador verifique y reconozca la aparición de la misma.

#### **4.8 Unión de Interfaz de control de Sistema de Enfriamiento con Interfaz del Sistema de Drenaje.**

La aplicación gráfica ya existente para el control del sistema de enfriamiento fue unida en un mismo panel junto a la desarrollada en el punto 4.3, esto conllevó exportar variables, establecer direcciones, crear grupos de escaneo y corregir errores introducidos al migrar de pantalla, así como agregar un menú inicial para la elección del sistema a controlar y monitorizar.

#### **4.9 Estudio físico del sistema de Drenaje**

Mediante un modelado matemático se estudió la capacidad del sistema para evacuar las aguas que llegan a este tanque de captación de aguas residuales, esto con el fin de indicar si el control aplicado a las bombas es el más conveniente o debe ser optimizado.



## 5. Descripción de la Solución.

### 5.1 Comunicación Ethernet.

Para conectar los diferentes dispositivos se necesitó 4 direcciones ip de la red técnica, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Se instaló un switch industrial (telemecanique TCSESU053FN0) en el gabinete donde se encuentra el PLC Quantum y el panel Magelis para comunicar ambos con la red técnica

Mediante los software de programación de cada uno de los controladores lógicos programables y pantalla táctil se asignan las direcciones mostradas en la tabla 2 a su respectivo equipo, luego se corrobora mediante el comando ping en consola que todos estén disponibles dentro de la red deseada.

**Tabla 2.** Direcciones IP de equipo para la red Técnica

Equipo	Lugar	Dirección IP / 24
PLC Quantum Sistema de Enfriamiento	C.P. Arenal	20.2.1.34
Panel MAGELIS Sistema de Enfriamiento	C.P. Arenal	20.2.1.35
PLC Twido Sistema de Drenaje	C.P. Arenal	20.2.1.36
Panel Magelis Sala de Control (MAGELIS_DE)	C.P. Arenal	20.2.1.38

### 5.2 Programación de Panel Magelis\_DE para adquisición de datos y control del sistema de Drenaje.

Para empezar se debe capturar los datos que obtiene el PLC Twido, estos pueden ser bits, palabras, dobles palabras, y tener diferentes formatos (booleano, entero, entero doble, entero sin signo, real, cadena).

En la tabla 3 se observan las variables que se usan para mostrar las señales correspondientes al funcionamiento del sistema de drenaje.

**Tabla 3.** Variables Utilizadas en el despliegue de datos

Variable	Dirección	Tipo	Descripción
Bomba_Siguiente	%M6	BOOL	Bomba1 = 0, Bomba2 = 1
FallaFlujoBomba1	%M7	BOOL	Señal de falla de flujo en Bomba 1
FallaFlujoBomba2	%M8	BOOL	Señal de falla de flujo en Bomba 2
ErrorB1	%M10	BOOL	Error (General) en Bomba 1
ErrorB2	%M11	BOOL	Error (General) en Bomba 2
A_BOMBA1	%M12	BOOL	Este bit es uno si se da la orden de encender la Bomba 1
A_BOMBA2	%M13	BOOL	Este bit es uno si se da la orden de encender la Bomba 2
Alarma_NivelHH	%M15	BOOL	Alarma activada por la boya al 85% de la capacidad del Tanque
Alimentación_B1	%M21	BOOL	Es uno si el motor de la Bomba 1 tiene alimentación
Alimentación_B2	%M22	BOOL	Es uno si el motor de la Bomba 2 tiene alimentación
FallaAltistart1	%M23	BOOL	Es cero si existe una falla en el arrancador 1
FallaAltistart2	%M24	BOOL	Es cero si existe una falla en el arrancador 2
Falla_Guarda_MotorB1	%M25	BOOL	Falla en el circuito Guarda del Motor B1
Falla_Guarda_MotorB2	%M26	BOOL	Falla en el circuito Guarda del Motor B2
AI_Temp_At1	%M101	BOOL	Sobrecarga de temperatura en arrancador 1
AI_I_At1	%M102	BOOL	Sobrecarga de corriente en arrancador 1
AI_Torq_At2	%M103	BOOL	Sobrecarga de Torque en Motor 1
AI_Temp_At2	%M104	BOOL	Sobrecarga de temperatura en arrancador 2
AI_I_At2	%M105	BOOL	Sobrecarga de corriente en arrancador 2
AI_Torq_At2	%M106	BOOL	Sobrecarga de Torque en Motor 2

El proceso para mostrar una señal en el software vijeo designer es el siguiente:

- Identificar la dirección y tipo de la variable deseada.
- Crear un grupo de escaneo del cual se tomarán las variables que tengan el mismo origen.
- Crear la variable, asignarle el tipo y dirección identificado anteriormente.
- Hacer un indicador (piloto, visualizador de mensaje) y enlazarlo con la variable correspondiente.

Un grupo de escaneo es una sección similar a una carpeta donde se guardan las variables que tienen un origen común, es decir provienen del mismo autómeta o dispositivo, a esta se le debe asignar la misma dirección ip que tiene el dispositivo de donde se toman los datos (20.2.1.36 en este caso). Es necesario crear este grupo por que más adelante se estará intercambiando información con

el PLC Quantum, y se deben separar los datos que se toman de este con los adquiridos del Twido.

Se creó una sección específicamente para arrancar y detener manualmente las bombas de drenaje, este implica el envío de señales (bits en este caso) hacia el PLC, donde se modificó la sección de control de bombas para que se pudiera llevar estas labores de forma segura, las modificaciones hechas se explicarán en breve (sección 5.3); la creación de los botones para este control llevan el siguiente proceso:

- Crear un interruptor
- Crear una variable del tipo a utilizar (booleana para datos binarios)
- Asignar las acciones necesitadas (set, reset, temporalmente activado, flanco ascendente, flanco descendente)

A un botón se le puede asignar varias acciones como es el caso del botón para el arranque de las bombas (ver tabla 4), el bit %M6 es cero si le toca arrancar a la bomba 1, y es uno si es el turno de funcionamiento de la Bomba 2, por ende se cambia su valor dependiendo de la bomba que se desee activar.

**Tabla 4.** Acciones de los botones de arranque y paro de las Bombas de Drenaje.

Bomba 1		Bomba 2	
Botón	Acciones	Botón	Acciones
Arrancar	Reset %M6	Arrancar	Set %M6
	Pulso %M31		Pulso %M33
Parar	Pulso % M32	Parar	Pulso %M34

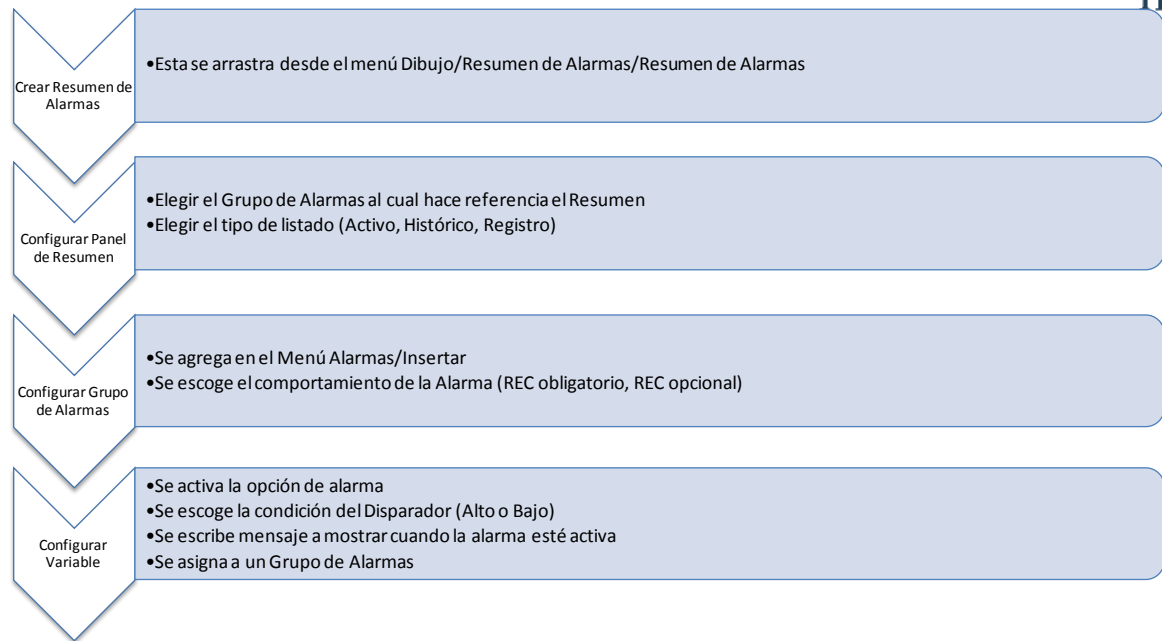
También se creó un botón para reset de fallas, este simplemente pone en alto %M20 el cual desactiva las alarmas que ya han sido revisadas y aceptadas.

El arrancador suave de cada una de estas bombas dispone del registro 4200, este guarda la última falla que ocurrió en el sistema, para exponer esta información se estableció el panel “Historial de fallas en Sistema de drenaje” el cual muestra una descripción del último error que ocasionó un disparo, y va

acumulando estas fallas en el panel, las cuales el operario debe reconocer para poder borrarlas.

Las alarmas se envían al panel MAGELIS\_DE mediante bits desde el PLC Twido, por lo tanto para agregarlas al panel de Historial de fallas se sigue el proceso mostrado en la figura 6.

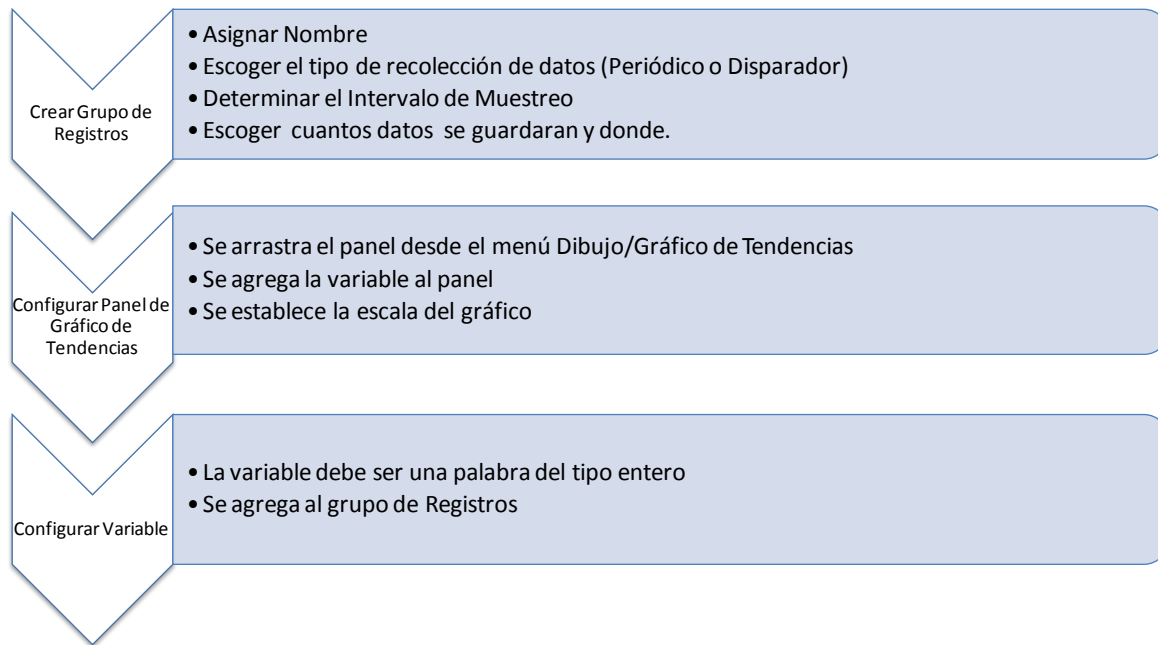
Primero se debe crear el panel de resumen de alarmas, este se debe enlazar con un único grupo de alarmas, por ende en el panel elegido solo se mostrarán las alarmas de las variables que están en dicho grupo. En el caso del historial de fallas del Sistema de Drenaje el grupo de alarmas se llama HSD, y agrupa las 19 variables provenientes del registro 4200. La tabla resumen de alarmas se configuró como Registro, este modo crea una marca cada vez que el bit de alarma cambia su estado. Al grupo de alarmas se eligió el modo REC obligatorio, esto implica que todas las señales que se activen deben ser reconocidas para desactivar las señales sonoras y marcar la hora a la cual se identificó el problema. El resto de la configuración se hace en cada una de los bits de alarma mediante el editor de variables, ahí se agrega al grupo de alarmas al que pertenece, se determina si se activa cuando el bit es alto o bajo y se escribe el mensaje que se muestra en pantalla.



**Figura 6.** Lista de Tareas para crear un panel de Alarmas

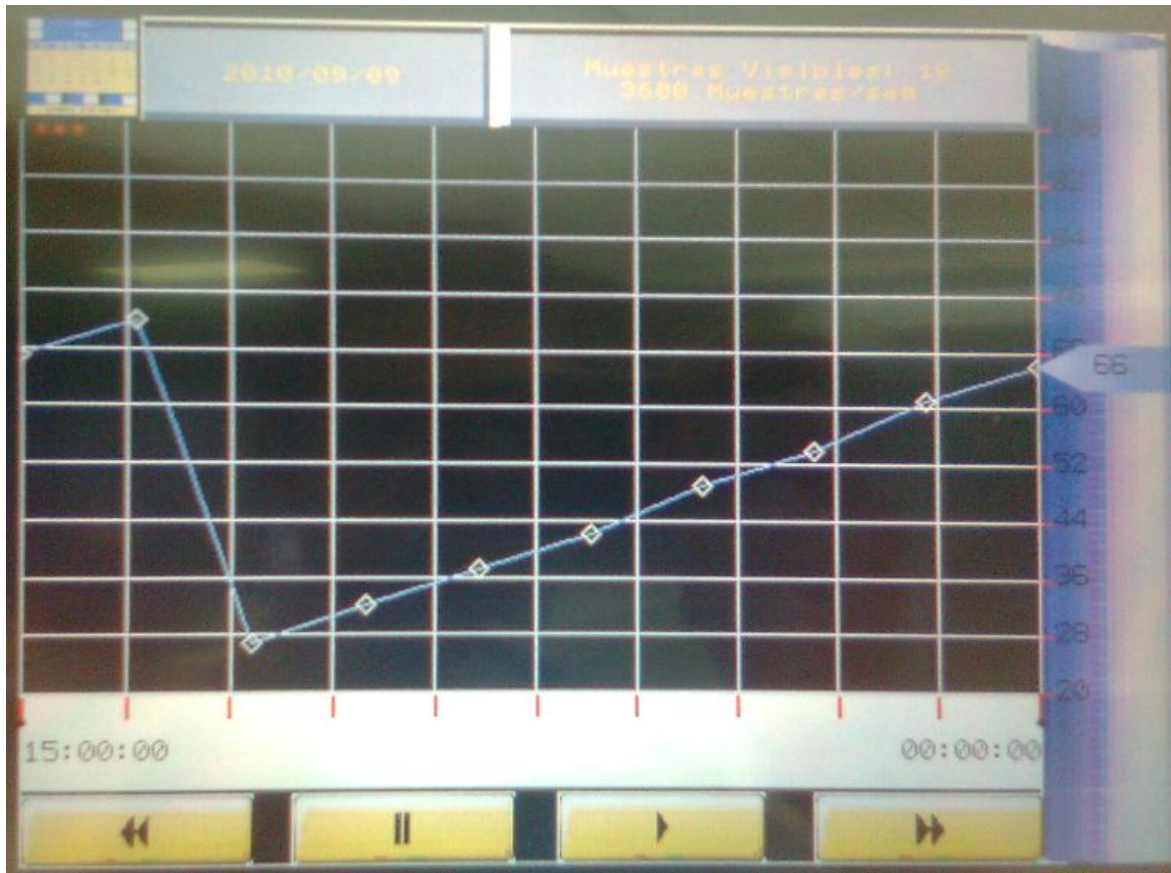
El otro tipo de pantalla que se implementó es para mostrar tendencias, se pueden graficar hasta 8 variables que son muestreadas en un tiempo predeterminado según se necesite, por ejemplo cada 15 minutos para el caudal de entrada de agua en el tanque de drenaje, o cada 2 segundos para la corriente de operación de las bombas.

Se agregó un panel donde se grafica la corriente de operación de las bombas, el proceso para graficar una variable es el mostrado en la figura 7, para el caso concreto de las bombas de drenaje el grupo de registros se llama RegistroOp, este captura el valor de los datos periódicamente cada dos segundos.



**Figura 7.** Lista de Tareas para crear un Gráfico de Tendencias

Con el fin de modelar el comportamiento de la entrada de agua al tanque de drenaje se creó un gráfico del nivel de agua en el tanque de drenaje con respecto al tiempo, este toma el valor de la variable %MW10 cada hora y dibuja la tendencia (figura 8).



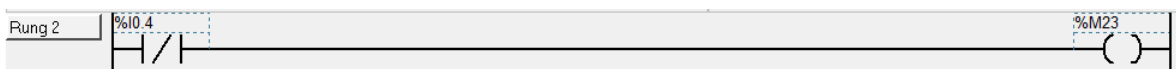
**Figura 8.** Gráfico Entrada de agua al tanque de Drenaje vs Tiempo

### 5.3 Programación de módulos en PLC Twido (Sistema de Drenaje)

#### 5.3.1 Sección Datos Magelis

Las interfaces humano – máquina (HMI) o paneles de operador son el instrumento utilizado para manipular un determinado dispositivo, estas hacen la traducción de imágenes, mímicos, botones, interruptores a el lenguaje de bajo nivel que puede interpretar y ejecutar la maquinaria. Las HMI Magelis sólo leen registros de memoria y no entradas o salidas, por lo cual se agregó la sección DATOS\_HMI para enlazar entradas y salidas con registros de memoria y poder visualizarlos en la interfaz XBTGT5230.

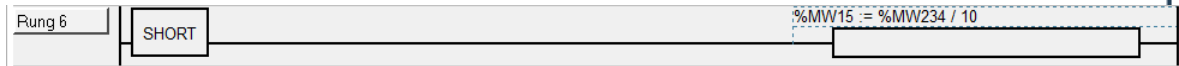
Este apartado se compone de contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados (NA Y NC respectivamente) para cargar la entrada y enlazarlo a una bobina con la dirección de memoria deseada. La figura 9 muestra un ejemplo donde la entrada 4 del PLC que se identifica como %I0.4 une con el bit de memoria %M23, en este ejemplo el bit de memoria se activa cuando la entrada es cero.



**Figura 9.** Sección Datos HMI utilizada para cargar valores de entrada en registros de memoria del PLC Twido.

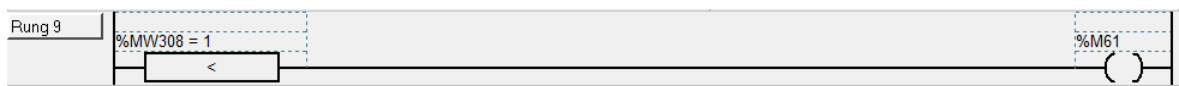
En esta sección se escaló el valor de la corriente de operación de los motores obtenida de los registros 4062 de los arrancadores suaves y relacionados a la palabra de memoria %MW234 dividiéndolo entre 10 ya que el dato que se obtenía directamente del registro estaba multiplicado por dicho factor. Esto se realiza mediante un bloque de operación donde se usan como datos las variables de memoria que se muestran en la figura 10.





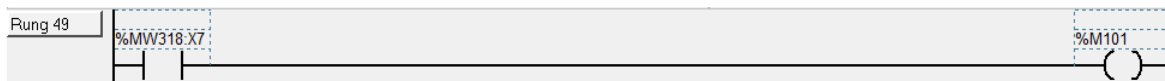
**Figura 10.** Ejemplo del Escalamiento de una variable utilizando un bloque de operación.

El registro 4200 fue descompuesto en las 19 señales de alarma mencionadas en la sección 5.2 mediante bloques de comparación como muestra la figura 11, estos realizan la función de la sentencia condicional if, cuando el valor del registro es igual al establecido se pone en uno el bit de memoria condicionado.



**Figura 11.** Ejemplo del uso de bloque de comparación para activar un bit.

El registro 459 de los arrancadores suaves Altistart proporciona las alarmas de sobrecarga de temperatura, corriente y torque, en los bits 7, 11 y 12 respectivamente. Para leer directamente estos bits se direcciona el registro y se enlaza con un bit de memoria tal como se muestra en la figura 12, en este ejemplo se lee el bit 7 de la palabra 318 con el comando  $\%MW318:X7$  y cuando el mismo está en alto se activa el bit de memoria 101.



**Figura 12.** Ejemplo de lectura de un solo bit de una palabra.

Las figuras 9, 10, 11 y 12 no tienen el nombre de las variables por que se están utilizando como ejemplos, en el programa desarrollado cada uno de ellos tiene un símbolo que lo identifica.

### **5.3.2 Prioridad para lectura Modbus**

Es necesario establecer una secuencia con la cual se dará prioridad para escribir una tabla Modbus en el PLC , se crearon 4 diferentes tablas para cada uno de los arrancadores, como se muestra en la figura 13 se configuró un contador el cual activa un bit (%Mx<sub>i</sub>) que es el que da permiso para realizar la escritura de la tabla.

El conteo se realiza cada 10 ms, por ende a los 50 ms se activa el bit %M51 autorizando la escritura de la tabla 1, a los 100 ms el bit %M52 (tabla 2), a los 150 ms es el turno del bit %M53 (tabla 3) y finalmente a los 200 ms el bit %M54 (tabla 4), cuando se alcanza este valor se reinicia el conteo.

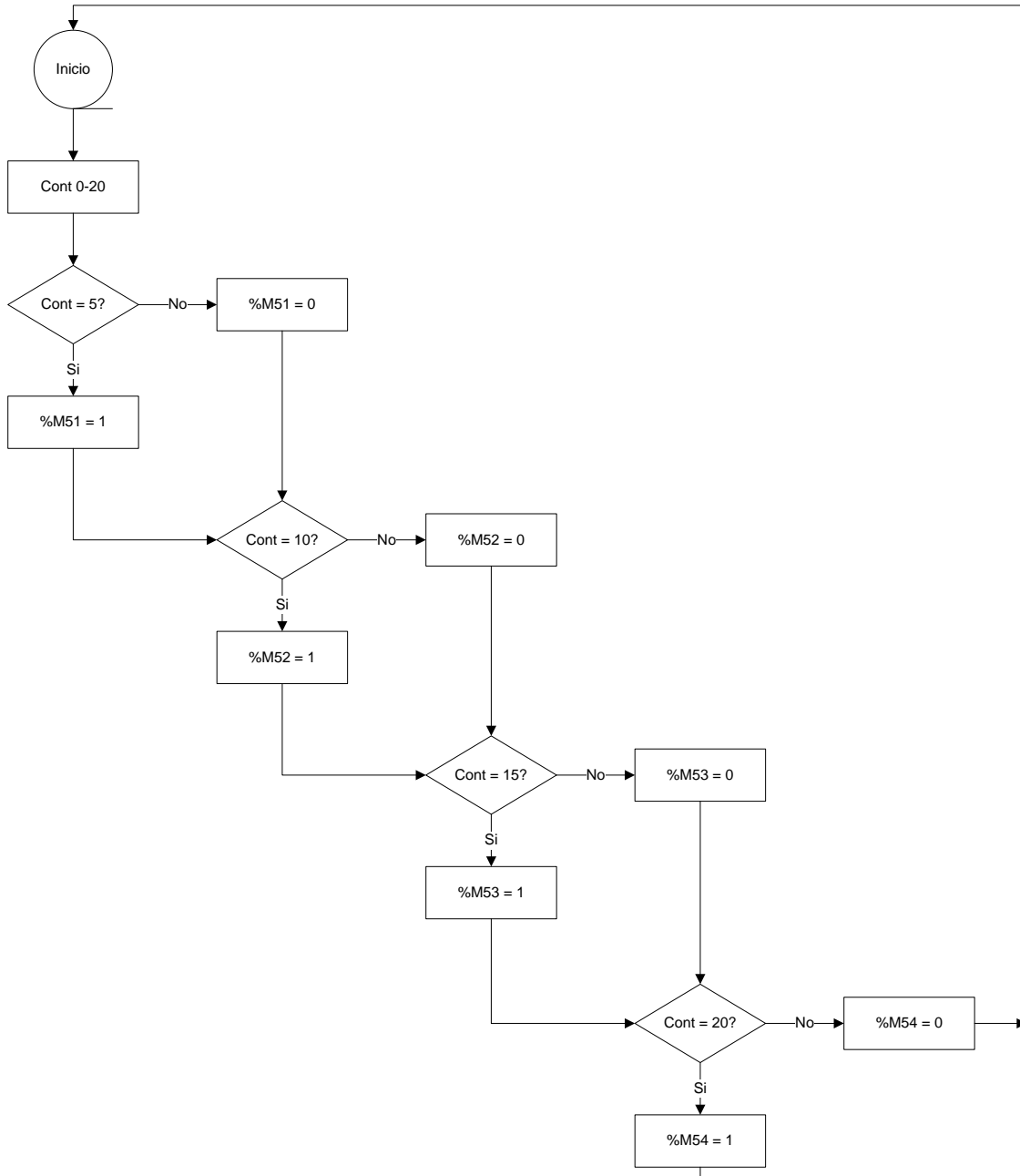


Figura 13. Algoritmo para establecer turnos en la escritura de las tablas Modbus.

### 5.3.3 Comunicación Modbus-TCP/IP con arrancadores suaves.

La figura 14 muestra como se estableció conexión entre los arrancadores y el PLC Twido, este posee tres puertos, un RJ45, un RS485 y un minidin 8, el RJ45 está conectado con la red técnica y como los arrancadores se pueden comunicar por modbusTCP/IP se eligió conectar el Altistart 1 al minidin y el 2 al RS485.

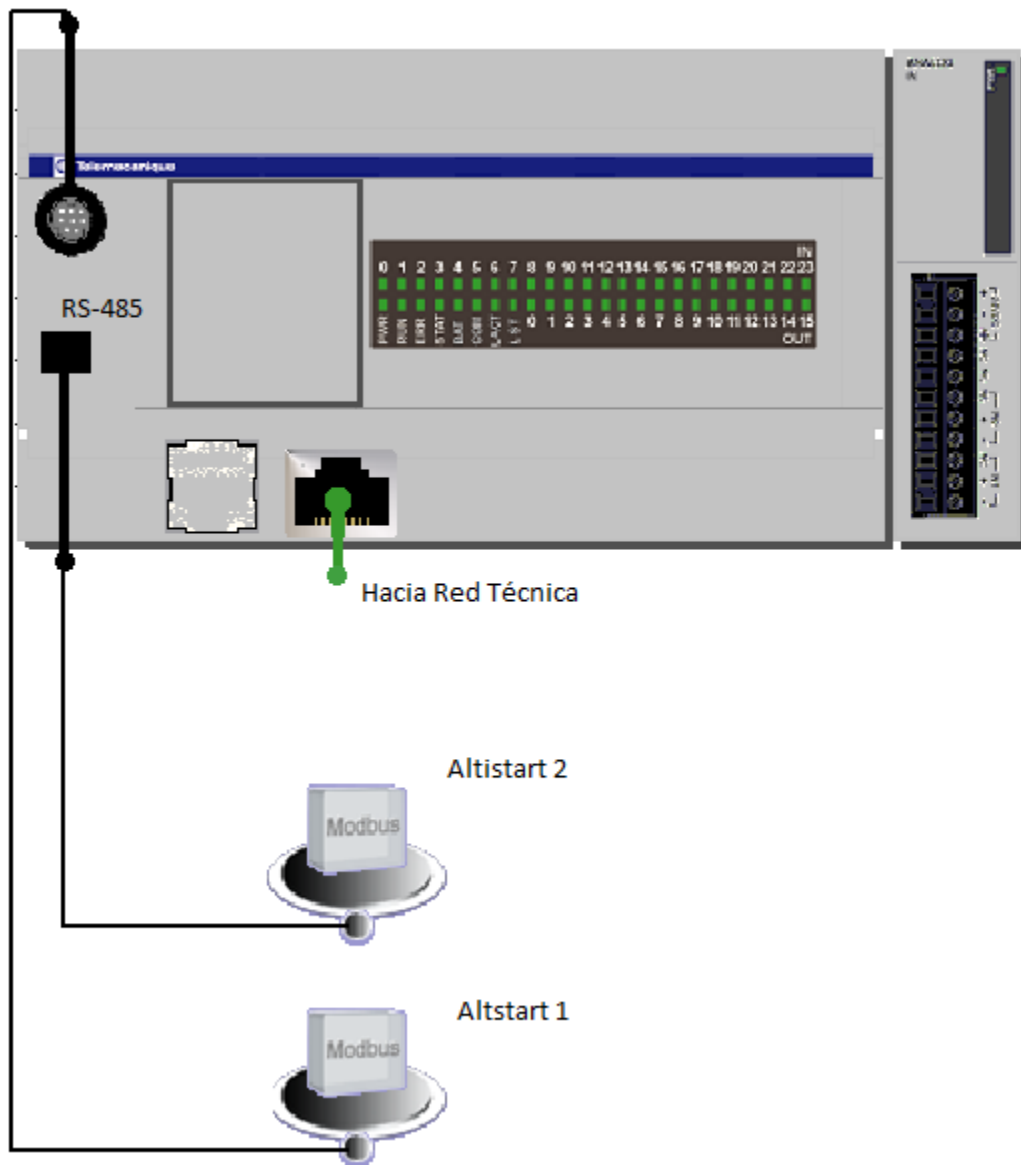
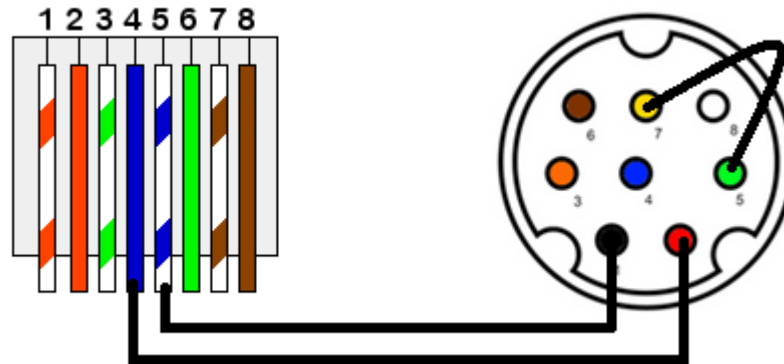
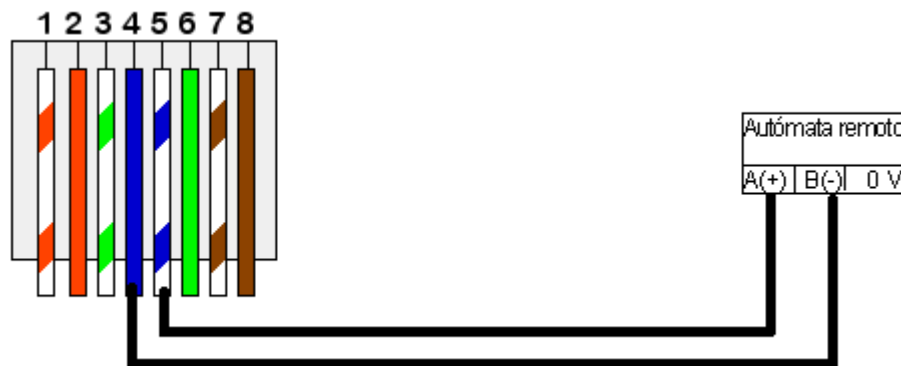


Figura 14. Conexión Modbus-TCP/IP de PLC Twido con arrancadores

Ambos arrancadores se conectaron mediante un cable Ethernet, para la comunicación se utilizan los pines 4 y 5; el puerto de programación por defecto para este PLC es del tipo minidin 8 y se debe cortocircuitar las entradas 5 y 7 para que realice comunicación MODBUS-TCP/IP (ver figura 15).



**Figura 15.** Conexión Modbus-TCP/IP RJ45 – MINIDIN



**Figura 16.** Conexión Modbus-TCP/IP RJ45 – RS485

Los Altistart almacenan datos y parámetros de configuración en registros internos, en este caso nos interesan datos que se encuentran desde el registro número 4043 hasta el 4076 (un total de 34 registros), el 4200 y el 459. El controlador twido maneja tablas Modbus de una longitud de hasta 29 palabras, por lo cual se configuraron 4 tablas por arrancador para un total de 8.

**Tabla 5.** Distribución de las tablas modbus en PLC Twido

TABLA	REGISTRO	DATO	Altistart 1 %MW	Altistart 2 %MW
TABLA 1	4043	Rampa Aceleración	208	258
	4044		209	259
	4045		210	260
	4046		211	261
	4047		212	262
	4048		213	263
	4049		214	264
	4050		215	265
	4051		216	266
	4052		217	267
	4053		218	268
	4054		219	269
	4055	Voltaje de Linea	220	270
	4056		221	271
	4057		222	272
4058		223	273	
4059		224	274	
TABLA 2	4060		232	282
	4061		233	283
	4062	Corriente Operación	234	284
	4063	Torque Motor	235	285
	4064		236	286
	4065		237	287
	4066		238	288
	4067	Factor de Potencia	239	289
	4068		240	290
	4069		241	291
	4070		242	292
	4071		243	293
	4072		244	294
	4073	Potencia	245	295
	4074		246	296
4075	Tiempo Operación	247	297	
4076		248	298	
TABLA 3	4200	Última Falla	308	328
TABLA 4	459	459	459	459

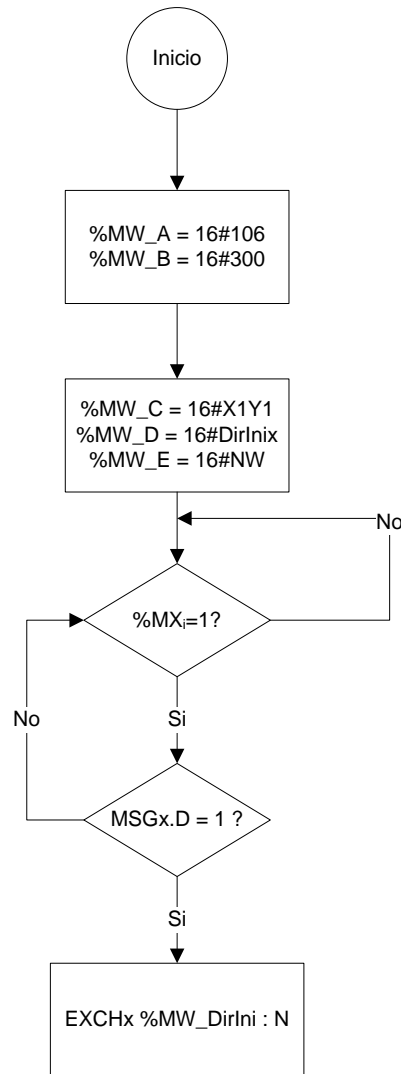
Para implementar la comunicación Modbus se debe crear un programa en el PLC que provea los parámetros de comunicación; una limitación es que el autómatas Twido toma los datos del esclavo para una sola tabla a la vez (y lee un máximo de 29 palabras), por lo que hay que implantar una secuencia en el

muestreo; el diagrama de flujo para programar esta comunicación se puede ver en la figura 17.

Primero se establece lo que se denomina tabla de control, se compone de las palabras 16#106 y 16#300 las cuales se encargan de inicializar el protocolo (ver figura 6).

En el segundo bloque (tabla de Transmisión) se establece de la siguiente forma:

- %MW\_C: El primer byte X1 indica la dirección del esclavo con el que se intercambiará información, Y1 es el tipo de operación (figura 17)
- Para leer varias palabras del esclavo con dirección “n” se utiliza %MW\_C = 16#030n. (ver códigos de función de la tabla 6)
- %MW\_D: En DirInix se escribe la dirección de la primera palabra del autómatas donde se mapearán los datos leídos.
- %MW\_E: NW representa el número de palabras del esclavo que se leerán.
- Mx<sub>i</sub>: Este bit se encarga de dar la prioridad en la comunicación, su funcionamiento se explica en la sección 5.3.2, figura 13.
- MSGx.D: x es el número del puerto donde está conectado el esclavo, este bit se pone en uno cuando el puerto no está ocupado, lo que permite la transmisión.



**Figura 17.** Diagrama de bloques de programa para comunicación Modbus

**Tabla 6.** Códigos de función Modbus

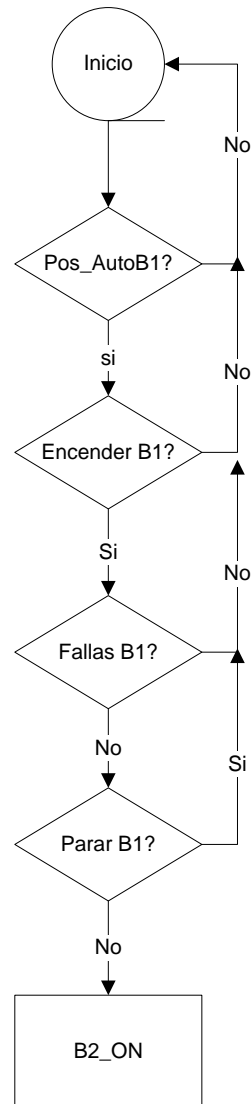
Número de Función (HEX)	Función
01	Leer varios bits
02	Leer varios bits binarios
03	Leer varias palabras
04	Leer varias palabras de entrada
05	Escribir un bit
06	Escribir una palabra
15	Escribir varios bits
16	Escribir varias palabras



### **5.3.4 Arranque y paro de Bombas**

El PLC Twido maneja las bombas para mantener el agua entre un 25% y un 75%, manualmente se pueden manipular desde el panel local, para operarlas manual y remotamente desde la nueva pantalla táctil se implementaron cambios en la lógica de arranque.

La figura 18 muestra la secuencia de condiciones que deben cumplirse para el arranque de la Bomba 1 (se aplica el mismo principio para la Bomba 2), primero se corrobora que el interruptor del panel principal se encuentre en automático (si no lo está significa que la bomba fue encendida localmente o está en posición cero para labores de mantenimiento), se recibe la orden del botón ubicado en el panel principal, si no hay fallas en la bomba y no se ha dado la orden de detener el motor se activa la señal de encender la bomba que es una salida digital (24V) que va al arrancador.



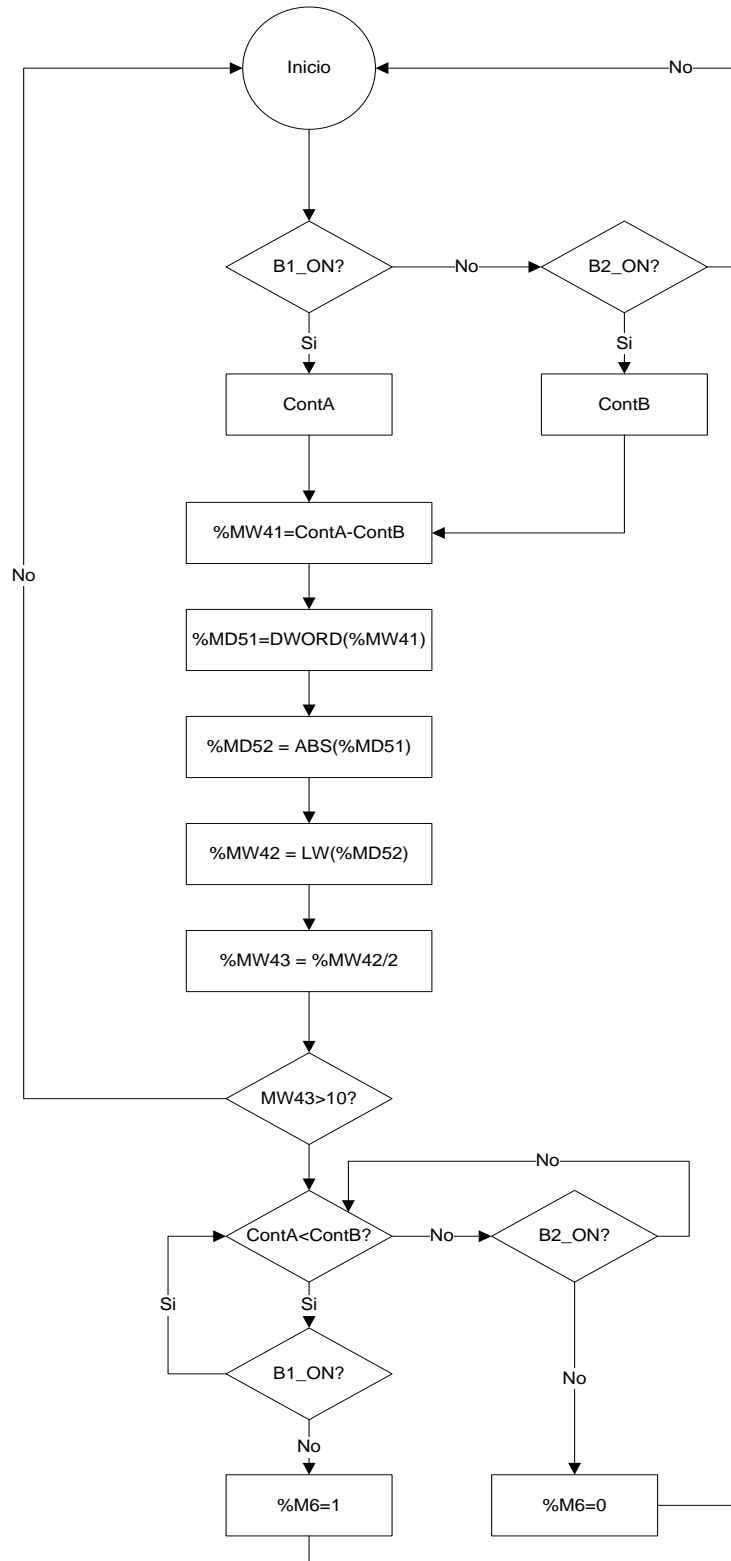
**Figura 18.** Control Manual – Remoto de Bombas en sistema de enfriamiento

### 5.3.5 Arranque de Bombas de drenaje mediante el método de alternancia por tiempo.

Para balancear el tiempo de trabajo de las bombas se desarrolló la sección donde se programó la lógica mostrada en la figura 19. Existen dos contadores que se encienden cuando uno de los motores empieza a funcionar; para realizar el conteo se utiliza el bit de sistema %S7 el cual es un pulso cuadrado que dura un minuto (30 segundos en cada nivel), por ende se realizan dos cuentas por minuto.

En la palabra %MW41 se guarda la diferencia de estos contadores, luego se calcula el valor absoluto de la diferencia; para poder hacer esto primero se debe convertir la palabra %MW41 (16 bits) en una palabra doble (32 bits) por que la operación ABS solo admite este tipo de operando. La doble palabra se guarda en %MD51 y su valor absoluto en %MD52. Mediante el operador LW se almacenan los dos bytes menos significativos de %MD52 en %MW42, luego se divide entre dos para obtener la diferencia en minutos trabajados. Si esta diferencia es mayor a 10 se le otorga el siguiente turno de funcionamiento a la bomba que tiene menos tiempo trabajado, esto se realiza mediante la activación o desactivación del bit %M6.

Este método mantiene una diferencia máxima de 10 minutos en el tiempo que trabajan las bombas, los contadores tienen la capacidad de llegar hasta 9999, por lo cual estos se reiniciarán luego de que una de las bombas alcance 5000 minutos de funcionamiento, al cabo de este tiempo el margen de diferencia representa máximo un 0,2% del total.



**Figura 19.** Diagrama de Solución para programación de encendido de bomba mediante el método de alternancia por tiempo.

#### **5.4 Programación de Panel MAGELIS\_DE para monitorización del sistema de Enfriamiento.**

El panel diseñado para adquisición de datos de las bombas A, B, C del sistema de enfriamiento muestra el porcentaje del torque nominal que se está usando, el factor de potencia, la corriente en amperios, la potencia en kilo watts y el total de horas de funcionamiento. Se agregó un panel de historial de fallas siguiendo el procedimiento ya mencionado en la sección 5.2 y en la figura 6, y un panel de tendencia donde se grafica la corriente de operación de las tres bombas.

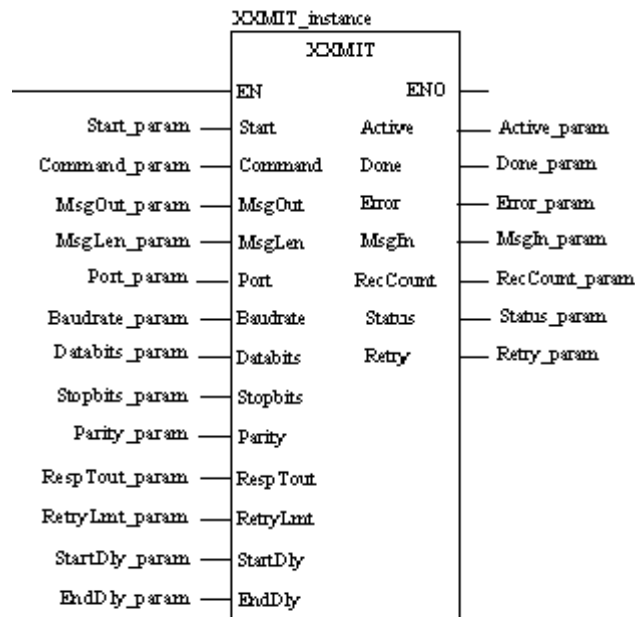
#### **5.5 Programación de PLC Modicon Quantum para adquisición de datos desde los arrancadores de las bombas de Enfriamiento.**

Se agregaron dos secciones al programa que funcionaba en el PLC Quantum, una que configura el protocolo modbus necesario para comunicarse con los arrancadores (N\_Alarmas) y otra para preparar los datos de forma que se puedan leer con el panel Magelis (N\_HMI4200).

##### **5.5.1 Comunicación Altistart - Quantum**

El software para programar el PLC Modicon se llama Unity Pro, este posee diversos bloques funcionales, para configurar la comunicación Modbus con los arrancadores, se utilizó el bloque XXMIT que se muestra en la figura 20, para sincronizar la comunicación se estableció un contador el cual brinda la señal a la entrada *Start*, en *command* se coloca el valor hexadecimal 2100 (0b10000100000000) el cual se utiliza para activar el bit 13 (comunicación modbus por puerto RS485) y el bit 8 (habilitar mensajes modbus), en *msgout* se ubican las palabras de control como se muestra en la tabla 7, en ese ejemplo se está leyendo el registro 4200 y se guarda el valor en la palabra %MW510, es importante considerar que para el equipo que se programa mediante unity las direcciones modbus se deben aumentar una unidad, por eso

el valor de 16#1069 que es igual a 4201 en decimal para leer el registro 4200. *MsgLen* es el largo de la tabla de control (5 según la tabla 7), *port* es uno por ser la dirección del PLC maestro, los parámetros de comunicación se muestran en la tabla 8, en *msgIn* se guardan los datos del mensaje que se recibe, para el caso de la tabla 7 lo hace en %MW510.



**Figura 20.** Bloque funcional utilizado para establecer comunicación Modbus entre los arrancadores Altistart y el PLC Modicon Quantum. (Tomado del Manual “Ayuda On-line de Unity Pro” )

**Tabla 7.** Tabla de control para bloque XXMIT

Palabra	Código	Función
1	16#0003	Lectura de varias palabras modbus
2	16#0001	Número de Palabras a leer
3	16#0002	Dirección del esclavo
4	16#1069	Registro a leer del esclavo
5	16#1FE	Registro a escribir en el maestro

**Tabla8.** Tabla de control para bloque XXMIT

Parámetro	Valor
Baudarate	9600 bps
Bits de datos	8
Bits de parada	1
Paridad	0 (Sin paridad)
Tiempo de respuesta	100 ms
Número de reintentos	10
Tiempo límite de inicio	100 ms
Tiempo límite de espera	100 ms

### 5.5.2 Envío de datos al panel MAGELIS\_DE desde el PLC Modicon Quantum

Procesos análogos a los mostrados en la figura 9, 10, 11 y 12 (sección 5.3.1) se llevaron a cabo en este apartado para enviar los bits de alarma provenientes de los registros 459 y 4200 del autómatas encargado de controlar el sistema de drenaje hasta el panel MAGELIS\_DE.

### 5.6 Sistema General de Alarmas

El panel Magelis XBTGT25230 tiene una salida auxiliar para activar una bocina cuando se da un aviso en un único grupo de alarmas, por esta razón se agruparon todos los bits de alarma en el grupo Global\_Alarmas, luego se siguió el proceso mostrado en la figura 6 para el despliegue de las advertencias.

## 5.7 Unión de panel de Enfriamiento y Drenaje.

La integración de los paneles requirió las siguientes labores:

- Creación de dos grupos de escaneo  
VarsQuantumEnfriamiento: Para variables del sistema de enfriamiento  
VarsTwidoDrenaje: Para variables del sistema de drenaje.
- Importar Variables
- Insertar paneles en un mismo proyecto y redireccionar la navegación entre los paneles.
- Establecer velocidades diferentes de escaneo para ambos grupos

## 5.8 Modelado de Sistema de drenaje para optimización del control de bombas.

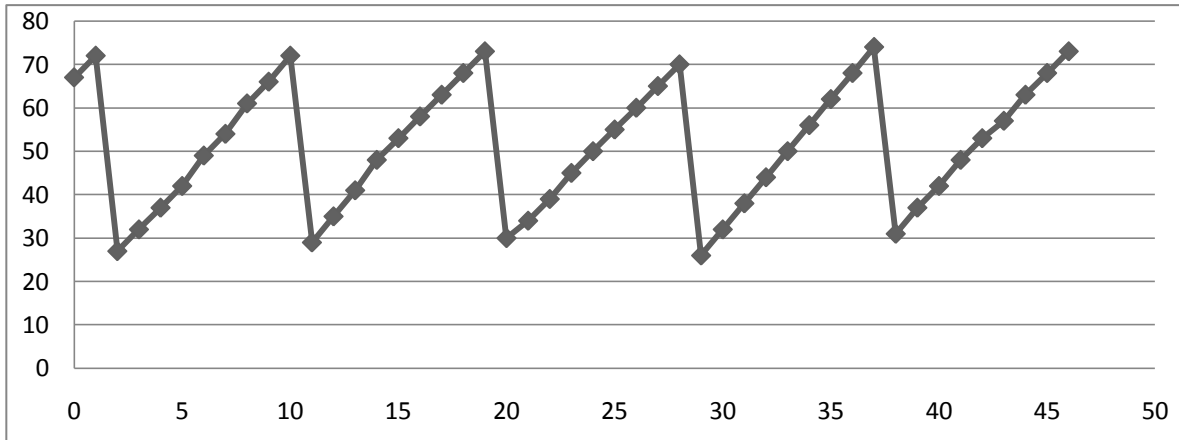
El área del tanque es de  $22.14 \text{ m}^2$ , el flujo de salida de cada una de las bombas es de  $10 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$  y como están ubicadas en paralelo cuando operan las dos el caudal de salida es la suma:  $20 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$ .

El caudal de entrada está compuesto por múltiples fuentes, para efectos del modelado se realizaron mediciones periódicas del nivel de agua en el tanque (ver figura 5), este se considera entonces el comportamiento normal de  $Q_i$ .

La figura 21 muestra un total de 46 mediciones que se realizaron periódicamente cada hora, esta marca claramente una tendencia lineal, los valores del eje y representan el porcentaje de altura del tanque que está lleno, para graficar los metros cúbicos de agua que entran con respecto al tiempo se multiplica el volumen total del tanque por el porcentaje de agua medido (H).

$$V_{\text{tanque}} = 130.626 * H \quad (5.1)$$



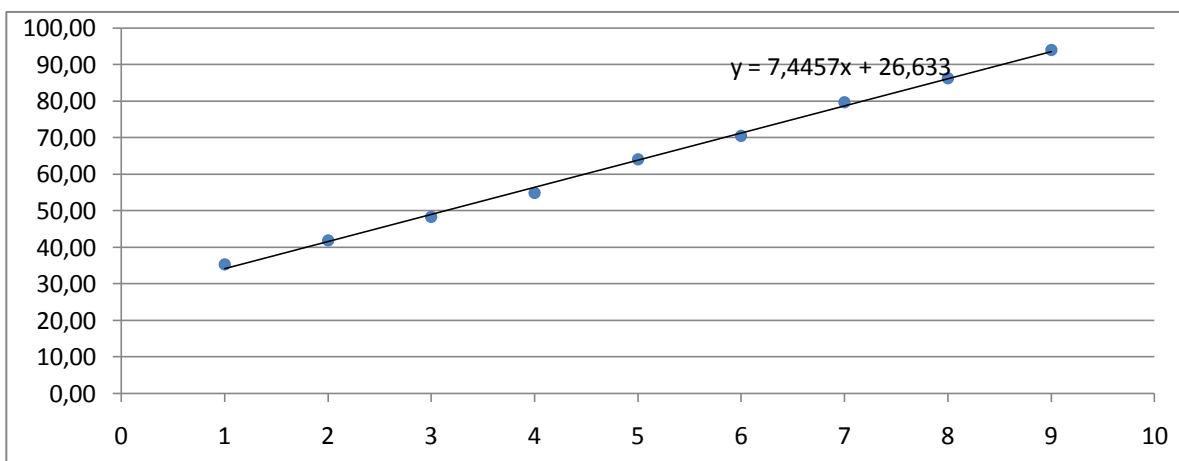


**Figura 21.** Porcentaje de agua en tanque de drenaje vs tiempo en horas

La figura 22 muestra la recta de mejor ajuste a nueve datos consecutivos, desde el 27% hasta el 72%.

$$Q_i = 7,4457t + 26.63 \quad (5.2)$$

Cuando el nivel está entre el 25 % y el 75 % solo trabaja una de las bombas proporcionando un caudal constante de salida de  $10 \frac{m^3}{min}$ .



**Figura 22.** Tendencia lineal del caudal de entrada en el tanque de drenaje

En la ecuación 5.2 el valor 26.63 representa la cantidad de agua en el tanque en la primera medición tomada, 7,4457 tiene unidades de  $\frac{m^3}{h}$ , y es igual a  $0,124 \frac{m^3}{min}$ .

De la ecuación 3.1 (sección 3.2) se tiene entonces que el caudal total será:

$$Q_T = 10 \frac{m^3}{min} - 0,124 \frac{m^3}{min} = 9,88 \frac{m^3}{min}$$

Para pasar del 75% al 25% de la capacidad del tanque se deben drenar  $65,32 m^3$  de agua, y con la  $Q_T$  encontrada se tendría que:

$$\frac{65,32m^3}{9,88 \frac{m^3}{min}} = 6,61min$$

Este resultado es el tiempo que tarda una bomba en vaciar el 50% del agua del tanque en condiciones normales, en consecuencia se establece que el control por niveles implementado para este sistema es eficiente, por lo cual solo se necesitó incorporar el control manual-remoto y la recolección de datos del sistema de drenaje y no cambiar el sistema de accionamiento por nivel de agua.

## 6. Análisis de Resultados

El estudio del sistema de drenaje permitió conocer el comportamiento normal del mismo y así corroborar que la capacidad de las bombas es adecuada; con el nuevo sistema de recolección de datos ahora es posible determinar si hay peligro de una inundación en el nivel 318 msnm mediante la tendencia en el caudal de agua de entrada que se grafica en el panel MAGELIS, esto junto con la alarma que se encenderá si el nivel de agua rebalsa el 85% de la capacidad del tanque.

La posibilidad de inspeccionar el funcionamiento de las bombas de drenaje contribuye en el mantenimiento de los motores para prevenir futuros fallos, las figuras 23 y 24 muestra un ejemplo de alarmas activas (del sistema en general), 25 y 26 son paneles donde se muestra el último fallo detectado en los arrancadores de los motores. Con estas pantallas se puede identificar un total de 33 alarmas y fallas en el sistema de Enfriamiento y 36 para el sistema de Drenaje.

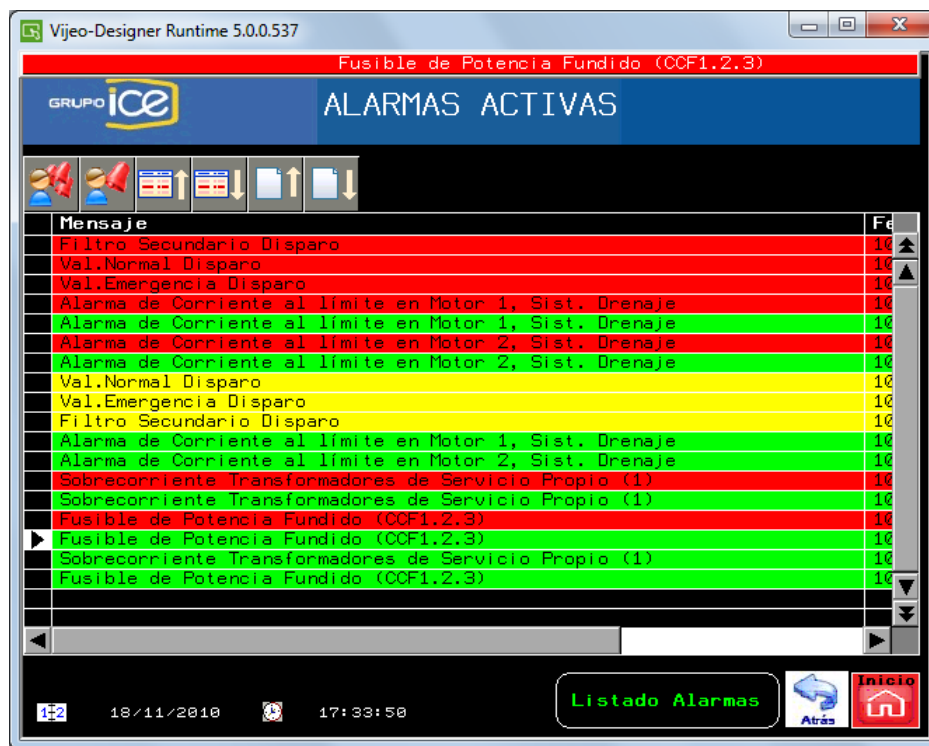


Figura 23. Panel General de Alarmas Activas

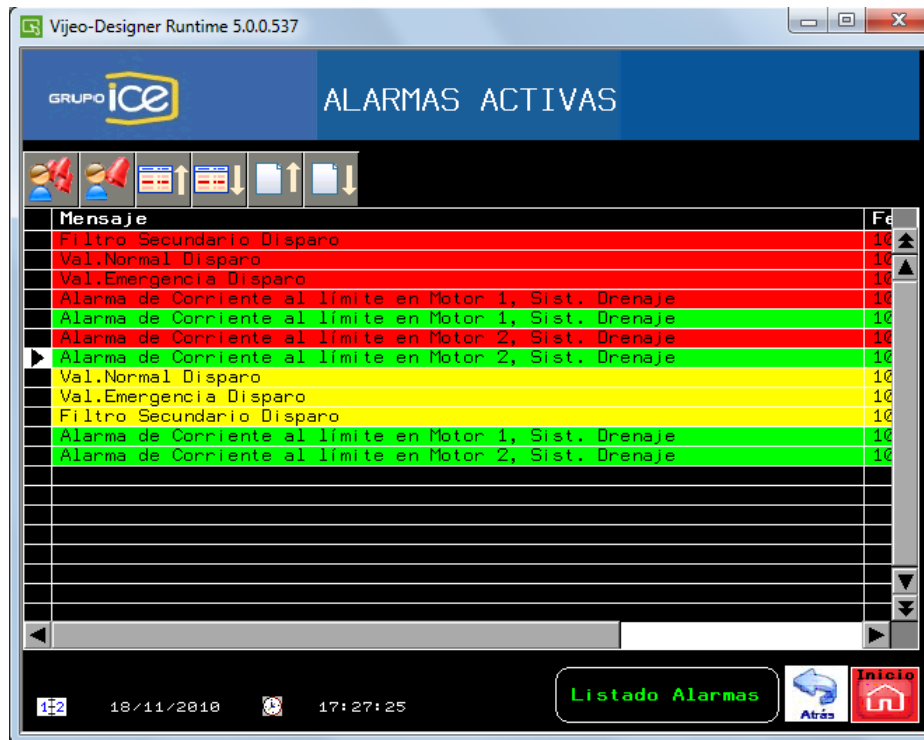
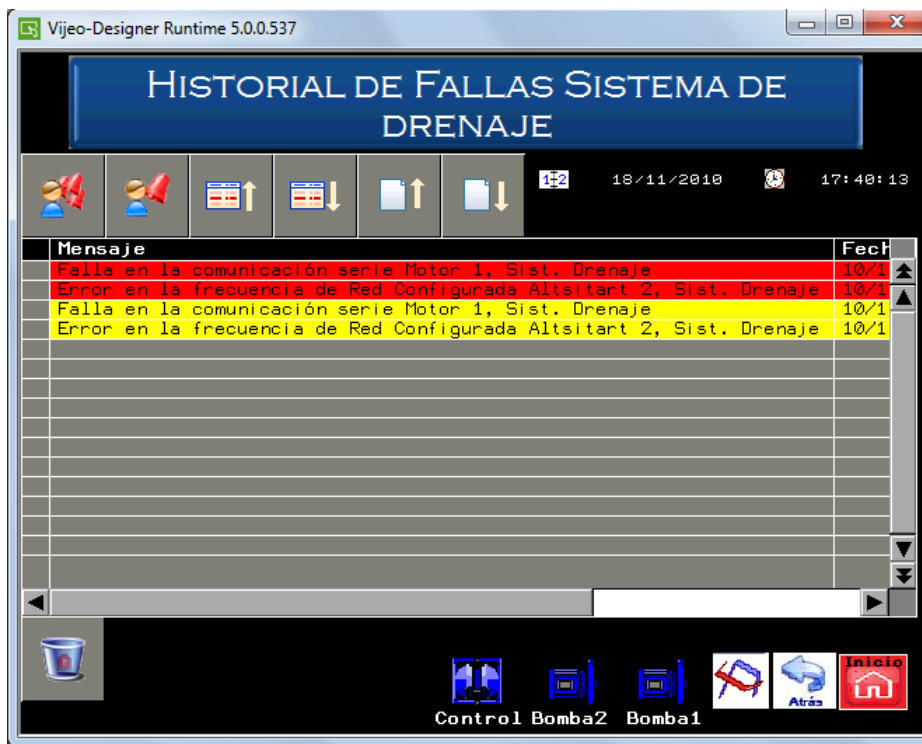


Figura 24. Panel General de Alarmas Activas



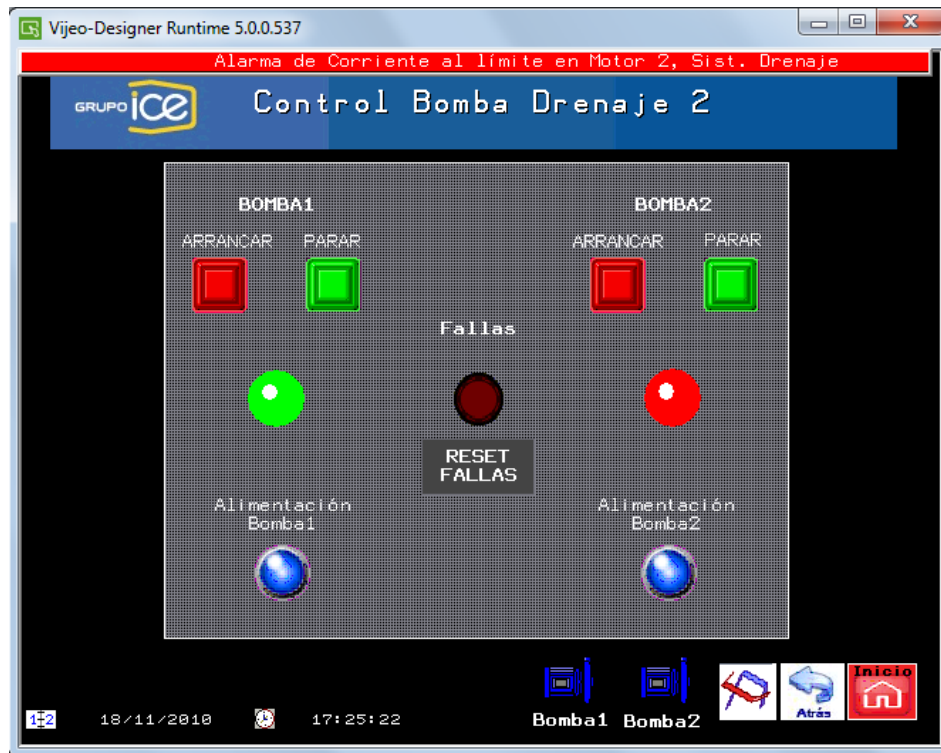
Figura 25. Resumen de últimos fallos en el sistema de Enfriamiento



**Figura 26.** Resumen de últimos Fallos en el sistema de drenaje

La figura 27 muestra el control Manual-Remoto del las bombas de drenaje, este permite arrancar el sistema en el momento que lo desee el operador, lo cual previene que se inunde el nivel 318 msnm, en caso de darse un error en el sistema automático de encendido de bombas, el operador será alertado una vez que el agua llegue al 85% de la capacidad del tanque.

En la figura 27 también se puede ver que se activó la bomba 2, aparece una etiqueta de alarma porque se dio una corriente alta de aproximadamente 4 veces la nominal (figura 30). Cuando un equipo está en operación el color del indicador es rojo, esto se hizo para seguir la convención que se usa en la planta ya que un motor encendido indica que hay peligro por movimiento o tensión; se corroboró que los operadores interpretan este color como encendido. La ubicación y forma de los botones se diseñó para que fuera idéntica al panel que se encuentra en el cuarto de drenaje.



**Figura 27.** Pantalla para el control Manual-Remoto de las bombas de drenaje.

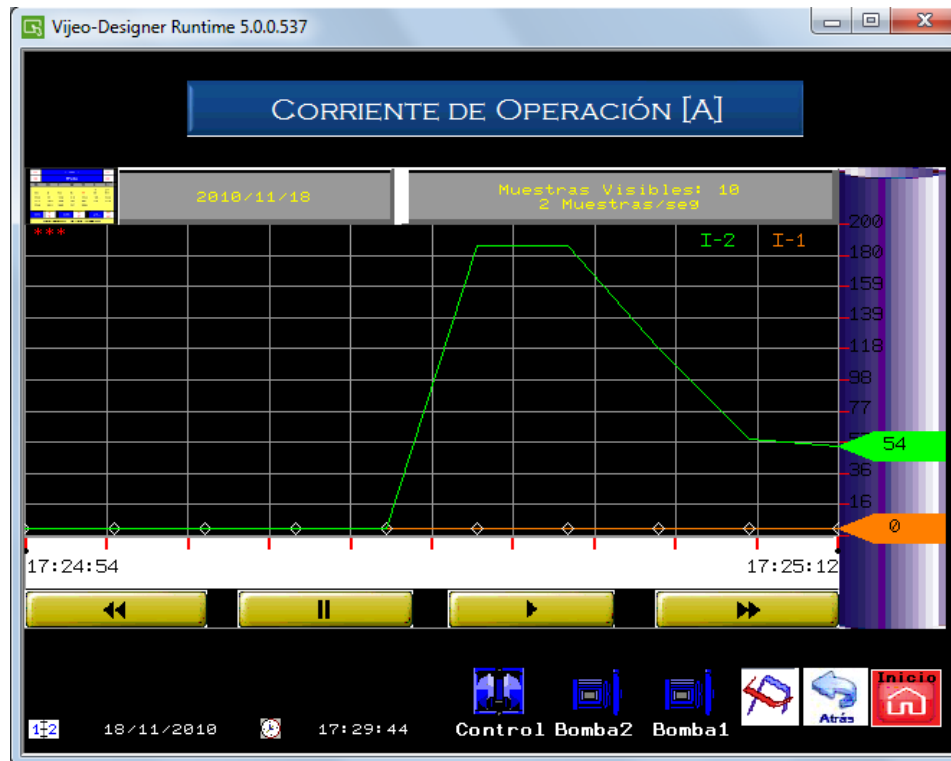
La adquisición de datos de las bombas de drenaje se pueden ver en las figuras 28 y 29 en esta última se nota como en estado estable la misma trabaja al 90% de su torque nominal, con un factor de potencia de 0,85, consumiendo 54 Amperios para un total de 38 kw. En esta pantalla también se puede obtener el nivel del agua que estaba a un 51 % de la capacidad del tanque, además es posible desplazarse para ver la corriente de operación de la misma (figura 30), se nota como en el momento del arranque aparece el pico de corriente y luego se estabiliza alrededor del valor nominal.



Figura 28. Adquisición de datos en bomba de drenaje 2



Figura 29. Adquisición de datos en bomba de drenaje 2



**Figura 30.** Corriente de operación (A) vs tiempo (s)

Presionando el botón “Tiempos” de las figuras 28 y 29 se tiene acceso a los datos de tiempo trabajados por las bombas, estos valores se pueden ver en las figuras 31 y 32, el tiempo de operación en horas es el dato obtenido de los registros del Altistart y que es de solo lectura, el tiempo en minutos es el que ha trabajado la bomba desde que se implementó el método de alternancia por tiempo en el PLC Twido, este programa mantiene la diferencia de tiempo trabajado menor a 10 minutos, en los ejemplos de las figuras 31 y 32 la diferencia es de 9 minutos cumpliendo el objetivo previamente trazado.



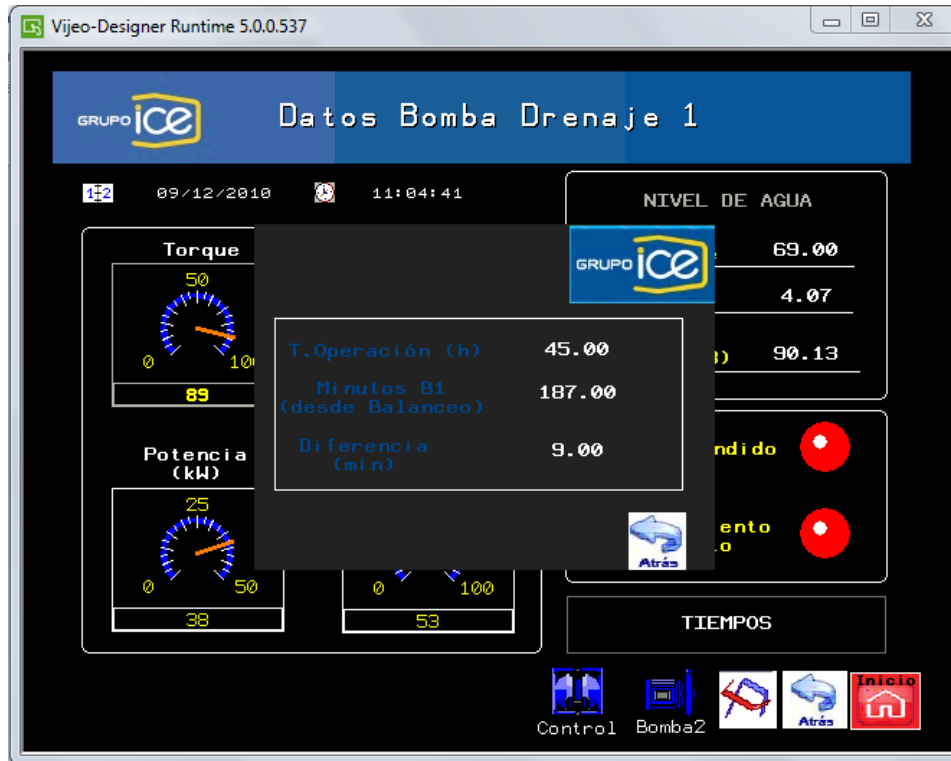


Figura 31. Balanceo de tiempos de operación en las bombas de drenaje, Bomba 1

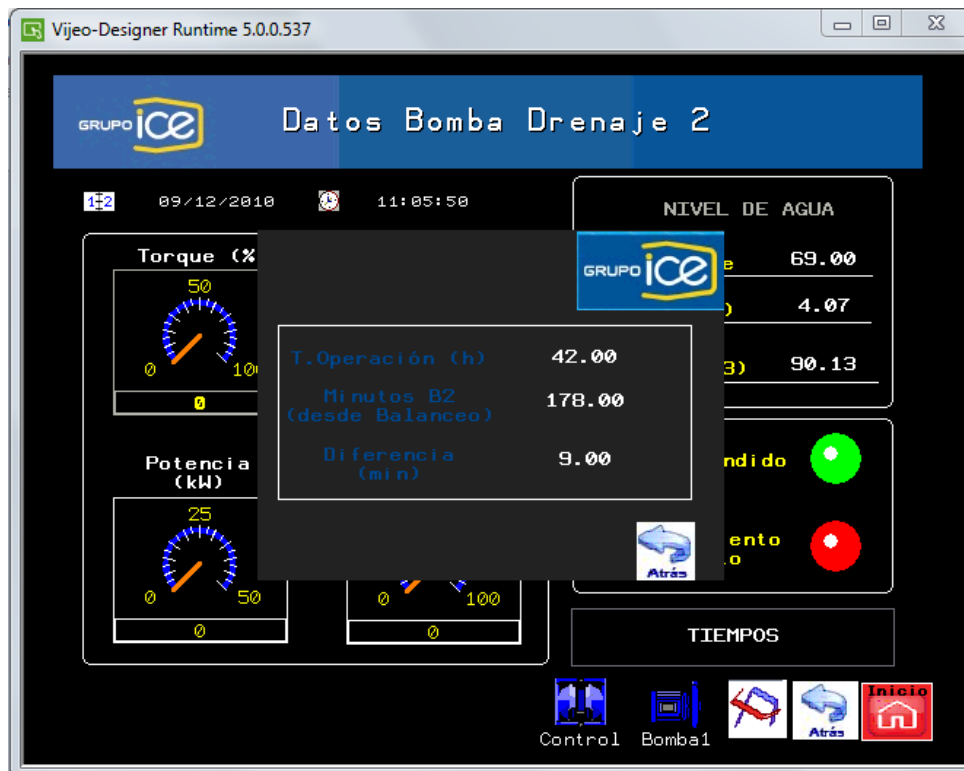


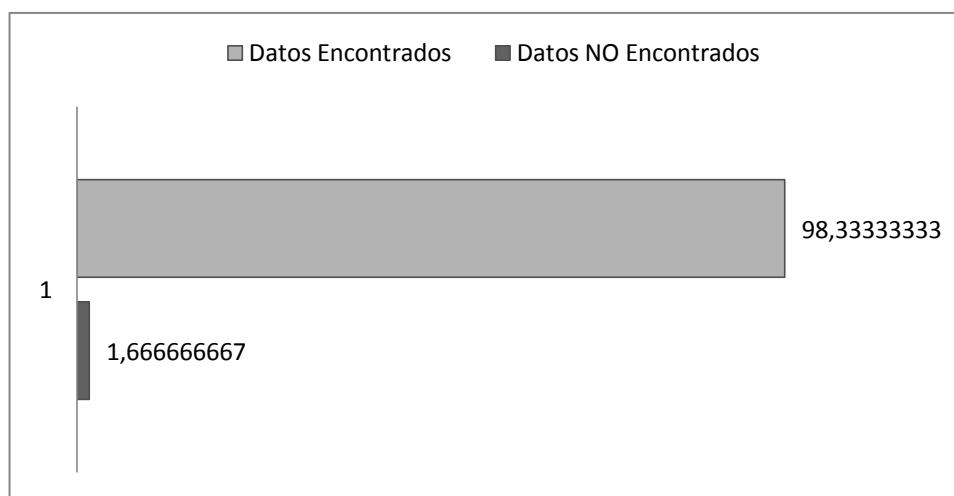
Figura 32. Balanceo de tiempos de operación en las bombas de drenaje, Bomba 2

Se realizaron mediciones del tiempo que le tomaba a un operador recolectar datos y operar bombas en los sistemas de drenaje y enfriamiento antes y después de la implementación del nuevo panel, en los resultado mostrados en la tabla 9 se aprecia que se consiguió reducir este tiempo en un 76,67 % para el sistema de Enfriamiento y en un 83,33% para el de Drenaje; esto debido principalmente a que ahora es necesario recorrer una distancia menor para realizar las diferentes operaciones de estos sistemas.

**Tabla 9.** Porcentaje de tiempo ahorrado en la recolección de datos y operación de los sistemas de Enfriamiento y Drenaje luego de la implementación del panel Magelis\_DE

Columna1	Enfriamiento	Drenaje
Tiempo Antes (s)	150	210
Tiempo Después (s)	35	35
Tiempo Ahorrado (%)	76,67	83,33

Con el fin de estimar la complejidad del uso del panel MAGELIS\_DE se le realizó a 3 operadores la encuesta mostrada en el Anexo 10.1, la misma consta de 20 preguntas, del total de 60 datos a buscar se encontraron un total de 59, lo cual da un porcentaje de efectividad para encontrar la información solicitada de un 98,33 % (figura 33) corroborando que el software diseñado es amigable para el operador.



**Figura 33.** Porcentaje de ítems encontrados por parte de los operadores

## 7. Conclusiones

- El tiempo necesario para la recolección de datos y operación de los sistemas de drenaje y enfriamiento en el centro de producción Arenal se disminuyó en un 83,30% y un 76,67% respectivamente luego de la implementación de este proyecto.
- El nuevo panel MAGELIS\_DE hace que el control del sistema de drenaje sea redundante mediante el accionamiento manual - remoto de las bombas desde la sala de operadores.
- El panel de alarmas identifica 33 fallos para el sistema de enfriamiento y 36 para el sistema de drenaje lo cual permite tomar las acciones correctivas indicadas para la reactivación de los equipos.
- El software diseñado le permite a los operadores de la planta controlar eficazmente los procesos de drenaje y enfriamiento.
- El controlador de las bombas de drenaje alterna el arranque de las mismas según el tiempo funcionamiento, evitando la sobrecarga de trabajo en ellas.

## 8. Recomendaciones

- En el panel de control local del sistema de drenaje se debe sustituir el cable de red que une el Altistart 1 con el PLC Twido mediante el puerto minidin 8 con uno de la serie TSXCRJMD25 o similar, esto para garantizar la conectividad entre estos equipos.
- El paso de agua por el sistema de enfriamiento de las unidades turbogeneradoras se regula por medio de la válvula de emergencia (ver figura 2) la cual tiene una velocidad de subida muy lenta, en serie la válvula de emergencia se encuentra otra que se le denomina reguladora y que tiene la capacidad de cambiar de estado en menor tiempo que la de emergencia, se recomienda modificar el control automático para que el cambio del sistema Normal de enfriamiento al sistema de emergencia se realice abriendo la válvula reguladora y manteniendo igualmente abierta la de emergencia.

## 9. Bibliografía

### 9.1 World wide web

[1] Sitio oficial del Schneider Electric en español, visitado el miércoles 3 de agosto del 2010. Disponible en:

<http://www.schneiderelectric.es/>

### 9.2 Libros

[2] Neira A. 2010 “**Sistema Automatizado Bombas de Drenaje**”, C.R.

[3] PRAI (Proyectos de Automatización Industrial, CR). 2008 “**Modernización del Sistema de Enfriamiento de Generadores**”, C.R. PRAI

[4] Schneider Electric,C.R. 2008 “**Altistart 48 Telemecanique: Guía de explotación**”, C.R. Schneider Electric.

[5] Schneider Electric,C.R. 2008 “**MAGELIS XBT GT: Guía de Referencia Rápida**”, C.R. Schneider Electric.

## 10. Anexos

### 10.1 Sondeo aplicado a operadores de la planta Hidroeléctrica Arenal con el fin de parametrizar la facilidad de uso del software desarrollado.


Prueba de Datos encontrados

Encontrado (Marque con una equis si fue encontrado)

1. ( ) Nivel de Agua \_\_\_\_\_
2. ( ) Estado de bomba de Drenaje 1 Encendido\_\_\_\_\_ Apagado\_\_\_\_\_
3. ( ) Estado de bomba de Drenaje 2 Encendido\_\_\_\_\_ Apagado\_\_\_\_\_
4. ( ) Corriente Consumida Bomba drenaje 1 \_\_\_\_\_
5. ( ) Corriente Consumida Bomba drenaje 2 \_\_\_\_\_
6. ( ) Factor de Potencia Bomba drenaje 1 \_\_\_\_\_
7. ( ) Factor de Potencia Bomba drenaje 2 \_\_\_\_\_
8. ( ) Potencia consumida Bomba de drenaje 1 \_\_\_\_\_
9. ( ) Potencia consumida Bomba de drenaje 2 \_\_\_\_\_
- 10.( ) Última Falla Bomba de drenaje 1 \_\_\_\_\_
- 11.( ) Última Falla Bomba de drenaje 2 \_\_\_\_\_
- 12.( ) Minutos trabajados por Bomba de drenaje 1 \_\_\_\_\_
- 13.( ) Minutos trabajados por Bomba de drenaje 2 \_\_\_\_\_
- 14.( ) Grupo de Bombas del sistema de Enfriamiento Trabajando \_\_\_\_\_
- 15.( ) Válvula del sistema de enfriamiento abierta \_\_\_\_\_
- 16.( ) Corriente Consumida Bomba A del sistema de Enfriamiento \_\_\_\_\_
- 17.( ) Último Fallo del sistema de Enfriamiento \_\_\_\_\_
- 18.( ) Alarmas Activas
- 19.( ) Panel de filtros Autolimpiantes
- 20.( ) Panel de tendencia de Nivel de agua en bombas de drenaje.

## 10.2 Registros del Arrancador Altistart 48

Code Address	Name	Unit	Range	Factory setting
COS W4067	Cos $\varphi$	0.01	0 to 100	
THR W4064	Motor thermal state	%	0 to 125 (nominal mode) or 0 to 250 (downgraded mode)	
	100% corresponds to the nominal thermal state for the nominal current $I_n$ (W4026).			
LCR W4062	Motor current	0.1 A	(1)	
RNT W4068	Operating time since the last reset	hr	0 to 65,535	
	Operating time is counted when the motor is not stopped, i.e. when the thyristors are fired (heating, acceleration, steady state, deceleration, braking) and in continuous bypass operation. The hour counter is reset on line via control word RPR, by applying the value of $trE$ (W4401 = 2) to it. This reset can also be performed, when the motor is stopped, from the starter terminal. When the starter is switched off, the hour counter is saved to the EEPROM. After a period in excess of 65,535 hours, or almost 7.5 years of continuous operation, the value of the RNT counter changes from 65535 to 0.			
LPR W4072	Active power	%	0 to 255	
	100% corresponds to the power at nominal current and at full voltage.			
LTR W4063	Motor torque	%	0 to 255	
	100% corresponds to the nominal torque.			
LAP W4073	Active power in kW	kW	0 to 999	
	This parameter requires configuration of the exact value of the voltage $UL_n$ (W4055) or $drC$ menu.			

Code Address	Name	Unit	Range	Factory setting
LFT W4200	Last fault		0 to 21	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0 = NOF: No fault</li> <li>- 1 = INH: Inhibit protection/faults</li> <li>- 2 = INF: Internal fault</li> <li>- 3 = OCF: Short-circuit/overcurrent fault</li> <li>- 4 = PIF: Phase inversion</li> <li>- 5 = SLF: Line communication fault</li> <li>- 6 = ETF: External fault</li> <li>- 7 = STF: Excessive starting time</li> <li>- 8 = USF: Voltage fault</li> <li>- 9 = PHF: Phase, line or motor fault</li> <li>- 10 = OHF: Starter thermal fault</li> <li>- 11 = LRF: Rotor fault</li> <li>- 12 = OLF: Motor thermal fault</li> <li>- 13 = FRF: Frequency fault</li> <li>- 14 = ULF: Motor underload fault</li> <li>- 15 = EEF: EEPROM fault</li> <li>- 16 = OLC: Current overload fault</li> <li>- 17 = CFI: Invalid configuration</li> <li>- 18 = OTF: Motor thermal fault detected by the PTC probes</li> <li>- 19 = Unused</li> <li>- 20 = CFF: Invalid configuration requiring factory settings</li> <li>- 21 = CLF: Loss of control supply</li> </ul>			
PHE W4065	Phase rotation direction viewed from the starter		0 to 2	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0 = no: no direction recognized</li> <li>- 1 = 123 : forward</li> <li>- 2 = 321 : reverse</li> </ul>			
COD W64007	Terminal locking code		0 to 998	
	<p>Enables the starter configuration to be protected by an access code. When access is locked, only the displayed parameters (SUP menu) can be accessed from the terminal. Access via the line (configuration, adjustment, control, monitoring) are not affected. Locking is possible from the terminal or the line. The COD parameter (although in the category of displayed parameters) can be modified, when the motor is stopped.</p> <p> Do not lose the code.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0 = OFF: No code.</li> <li>- 1 = On: Access is locked, the code is not visible.</li> <li>- 2 to 998: A code is present, but the display unit is not locked.</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• To lock it: Write the code xxx, a number between 0 and 998. (Next reading: COD = 1).</li> <li>• To unlock: Write the code xxx which was used to lock the starter. (Next reading: COD = xxx).</li> <li>• To delete the code: Unlock Write COD = 0. (Next reading: COD = 0).</li> <li>• To change the code: Ensure there is no code (0) or that the code is visible (2 to 998). Write a new code. (Next reading: COD = 1).</li> <li>• When switch off then switch on the control part, if a code is present, the terminal is locked. Read COD = 1.</li> </ul>			





Code Address	Name	Unit	Range	Factory setting
ETA W458	Status register			
	Bit 0 – “Ready to switch on”: active at 1. Bit 1 – “Switched on”: active at 1. Bit 2 – “Operation enabled”: active at 1. Bit 3 – “Malfunction”: absence of faults (0) / “Malfunction” Drivecom status active and fault present (1). Bit 4 – No power / “Voltage disabled”: active at 1. Bit 5 – “Quick stop” active: active at 0. Bit 6 – “Switch on disabled”: active at 1. Bit 7 – Alarm present: active at 1. Bit 8 – Reserved for Drivecom. Bit 9 – FORCED LOCAL active: active at 0. Bit 10 to 15 – Reserved.			
ETI W459	Extended status register			
	Bit 0 – Write parameter authorization: Parameter writing authorized (0) / Parameter writing not authorized (1). Parameters cannot be written when saving to EEPROM is already in progress. Bit 1 – Parameter consistency check: No parameter consistency check and drive locked when stopped (0) / parameter consistency check (1). Bit 2 – Starter reset authorization: Fault reset not authorized (0) / fault reset authorized (1). Bit 3 – Motor preheating: active at 1. Bit 4 – Motor operating status: Motor stopped (0) / motor running (1). When this bit is at 1, it means that the motor is either running, or subject to a time delay before starting. Bit 5 – Braking active: active at 1. Bit 6 – Starter in continuous operation: Transient state (0) / steady state (1). Bit 7 – Thermal overload alarm: active at 1. Bit 8 – Reserved. Bit 9 – Starter accelerating: active at 1. Bit 10 – Starter decelerating: active at 1. Bit 11 – Current limit alarm: active at 1. Bit 12 – Torque limit alarm: active at 1. Bits 13 and 14 – Active mode Bit 14 = 0 and Bit 13 = 0: LOCAL mode or FORCED LOCAL mode. Bit 14 = 1 and Bit 13 = 0: State not possible. Bit 14 = 1 and Bit 13 = 0: LINE mode (ATS46 profile); see <b>Compatibility with the ATS46</b> section. Bit 14 = 1 and Bit 13 = 1: LINE mode (Drivecom profile). Bit 15 – Reserved.			