



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
COMUNICACIÓN HARDWARE/SOFTWARE PARA EL PLC  
MMI-CPC02A Y UNA PANTALLA TFT EN LA EMPRESA  
ACSIMB CIA. LTDA.”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN: DISPOSITIVO TECNOLÓGICO**  
**Para optar al Grado Académico de:**  
**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES**  
**INDUSTRIALES**

**AUTOR:** ALEX SANTIAGO ARIAS BORJA  
**TUTOR:** ING. JORGE LUIS PAUCAR SAMANIEGO

Riobamba – Ecuador.  
2017

©2017, Alex Santiago Arias Borja

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



Yo, **ALEX SANTIAGO ARIAS BORJA** soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

ALEX SANTIAGO ARIAS BORJA

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mi madre Gladys Borja Cepeda, quien es artífice principal de mi formación académica y personal, por brindarme su amor, consejos y el apoyo incondicional en cada trayecto de mi vida.

“Por ti y para ti madre”

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por guiar mi camino y bendecirme con una madre honorable y ejemplar.

Agradecimiento especial a la empresa ACSIMB Cia. Ltda. por la oportunidad brindada y los conocimientos compartidos.

A cada una de las personas que en base a sus lecciones y enseñanzas han influenciado en mí.

**Alex**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xv
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Automatización de procesos industriales .....</b>	<b>4</b>
<i>1.1.1 Introducción .....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2 Definición .....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.3 Elementos de un Proceso Automatizado .....</i>	<i>5</i>
<b>1.2 Sistemas de control.....</b>	<b>5</b>
<i>1.2.1 Definición .....</i>	<i>6</i>
<i>1.2.2 Tipos de sistemas de control.....</i>	<i>6</i>
<b>1.3 Controladores .....</b>	<b>7</b>
<i>1.3.1 Tipos de controladores .....</i>	<i>7</i>
<i>1.3.2 Controlador PID.....</i>	<i>8</i>
<i>1.3.3 Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID.....</i>	<i>8</i>
<i>1.3.4 Sintonía de parámetros .....</i>	<i>10</i>
<b>1.4 Controlador Lógico Programable (PLC).....</b>	<b>11</b>
<i>1.4.1 Introducción .....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.2 Definición .....</i>	<i>12</i>
<i>1.4.3 Funciones de un PLC .....</i>	<i>12</i>
<i>1.4.4 Tiempo de SCAN .....</i>	<i>12</i>
<i>1.4.5 Arquitectura de un PLC.....</i>	<i>13</i>
<b>1.5 Interfaz hombre-máquina (HMI) .....</b>	<b>15</b>
<i>1.5.1 Introducción .....</i>	<i>15</i>
<i>1.5.2 Definición .....</i>	<i>15</i>
<i>1.5.3 Funciones del software HMI .....</i>	<i>15</i>
<b>1.6 Microcontroladores.....</b>	<b>16</b>
<i>1.6.1 Introducción .....</i>	<i>16</i>
<i>1.6.2 Definición .....</i>	<i>17</i>
<i>1.6.3 Componentes de un microcontrolador .....</i>	<i>17</i>
<i>1.6.4 Control de periféricos.....</i>	<i>18</i>

<b>1.7</b>	<b>Interfaz de comunicación .....</b>	<b>19</b>
<i>1.7.1</i>	<i>Protocolos de comunicación serial .....</i>	<i>19</i>
<i>1.7.2</i>	<i>Puerto serie RS232 .....</i>	<i>21</i>
<b>1.8</b>	<b>Errores de comunicación.....</b>	<b>22</b>
<i>1.8.1</i>	<i>VRC y LRC .....</i>	<i>22</i>
<i>1.8.2</i>	<i>CRC.....</i>	<i>22</i>
<b>1.9</b>	<b>Microcontroladores con arquitectura ARM.....</b>	<b>23</b>
<i>1.9.1</i>	<i>Introducción .....</i>	<i>23</i>
<i>1.9.2</i>	<i>Características de la arquitectura ARM .....</i>	<i>23</i>
<b>1.10</b>	<b>Microcontroladores stm32.....</b>	<b>23</b>
<i>1.10.1</i>	<i>Programación de los microcontroladores STM32 .....</i>	<i>24</i>
<b>1.11</b>	<b>STM32CubeMX .....</b>	<b>25</b>
<b>1.12</b>	<b>MDK V5 (KEIL) .....</b>	<b>25</b>
<b>1.13</b>	<b>STM Studio .....</b>	<b>26</b>
<b>1.14</b>	<b>Algoritmos de programación.....</b>	<b>26</b>
<b>1.15</b>	<b>Lenguajes de programación .....</b>	<b>26</b>
<b>1.16</b>	<b>Lenguaje de programación C.....</b>	<b>27</b>
<b>1.17</b>	<b>Circuitos impresos (PCB) .....</b>	<b>28</b>
<i>1.17.1</i>	<i>Reglas de diseño general.....</i>	<i>28</i>
<i>1.17.2</i>	<i>Software para diseñar circuitos impresos.....</i>	<i>28</i>
<i>1.17.3</i>	<i>Proteus-Ares .....</i>	<i>29</i>
<b>1.18</b>	<b>Componentes del sistema.....</b>	<b>29</b>
<i>1.18.1</i>	<i>Pantalla de tipo TFT 4.3” .....</i>	<i>29</i>
<i>1.18.2</i>	<i>PLC MMI-CPC02A .....</i>	<i>30</i>
<b>CAPÍTULO II</b>		
<b>2</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>32</b>
<b>2.1</b>	<b>Planta.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2</b>	<b>Actuador .....</b>	<b>35</b>
<b>2.3</b>	<b>Sensor .....</b>	<b>35</b>
<b>2.4</b>	<b>Controlador .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5</b>	<b>Diseño del dispositivo PLC+HMI .....</b>	<b>36</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Diseño del software de comunicación .....</i>	<i>36</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Microcontroladores implementados .....</i>	<i>37</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Componentes del sistema de comunicación .....</i>	<i>38</i>
<i>2.5.4</i>	<i>Microcontrolador STM32F746 (maestro).....</i>	<i>39</i>
<i>2.5.5</i>	<i>Microcontrolador STM32F411 (esclavo).....</i>	<i>40</i>
<i>2.5.6</i>	<i>Configuración de los osciladores.....</i>	<i>41</i>

2.5.7	<i>Ciclo de comunicación</i> .....	43
2.5.8	<i>Selección del periférico serial</i> .....	44
2.5.9	<i>Comunicación por UART</i> .....	44
2.5.10	<i>Configuración del UART</i> .....	45
2.5.11	<i>Velocidad de transmisión</i> .....	45
2.5.12	<i>Configuración del DMA</i> .....	46
2.5.13	<i>Detección de errores</i> .....	47
2.5.14	<i>Algoritmo de comunicación</i> .....	49
2.6	<b>Control por software para sistemas de presión constante</b> .....	53
2.6.1	<i>Linealidad de señales análogas</i> .....	53
2.6.2	<i>Alarmas y condicionantes</i> .....	55
2.6.3	<i>Controlador PID</i> .....	56
2.6.3.1	<i>Desarrollo del PID</i> .....	56
2.6.4	<i>Modo automático y manual</i> .....	60
2.7	<b>Diseño del Hardware</b> .....	64
2.7.1	<i>CPU</i> .....	65
2.7.2	<i>Comunicación</i> .....	65
2.7.3	<i>Señales analógicas</i> .....	66
2.7.4	<i>Señales digitales</i> .....	66
2.7.5	<i>Placa resultante</i> .....	67
<b>CAPÍTULO III</b>		
3	<b>MARCO DE RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	69
3.1	<b>Análisis del sistema implementado</b> .....	69
3.1.1	<i>Variable de control (linealidad)</i> .....	68
3.1.2	<i>Respuesta del controlador PID</i> .....	70
3.1.3	<i>Comunicación binaria serial</i> .....	71
3.1.4	<i>Variación transmisión en base a la velocidad</i> .....	71
3.1.5	<i>Datos válidos durante una transmisión</i> .....	73
3.1.6	<i>Planteo de la hipótesis</i> .....	75
3.1.7	<i>Decisión</i> .....	76
3.2	<b>Análisis y resultados obtenidos</b> .....	77
<b>CONCLUSIONES</b> .....		79
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		81
<b>GLOSARIO</b>		
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1</b>	Regla de sintonía basada en la respuesta de escalón.....	9
<b>Tabla 2-1</b>	Regla de sintonía basada en la ganancia y periodo crítico .....	10
<b>Tabla 1-2</b>	Cuadro comparativo de las características de microcontroladores.....	37
<b>Tabla 2-2</b>	Detalle de las características del microcontrolador STM32F746.....	39
<b>Tabla 3-2</b>	Detalle de las características del microcontrolador STM32f411.....	40
<b>Tabla 4-2</b>	Descripción de las características para seleccionar periféricos de comunicación...43	
<b>Tabla 5-2</b>	Características del dispositivo PLC+HMI.....	62
<b>Tabla 1-3</b>	Respuesta de presión frente a la señal de corriente .....	68
<b>Tabla 2-3</b>	Variación de la velocidad de transmisión y errores generados.....	70
<b>Tabla 3-3</b>	Velocidad de transmisión y error porcentual .....	71
<b>Tabla 4-3</b>	Datos transmitidos durante 30 minutos.....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1</b>	Automatización de procesos industriales.....	4
<b>Figura 2-1</b>	Esquema de un sistema .....	6
<b>Figura 3-1</b>	Sistema de control en lazo abierto .....	6
<b>Figura 4-1</b>	Sistema de control en lazo cerrado .....	6
<b>Figura 5-1</b>	Tipos de controladores.....	7
<b>Figura 6-1</b>	Curva de respuesta en forma de S .....	8
<b>Figura 7-1</b>	Oscilación sostenida (Pcr).....	10
<b>Figura 8-1</b>	Tiempo de SCAN .....	12
<b>Figura 9-1</b>	Arquitectura de un PLC .....	13
<b>Figura 10-1</b>	Ejemplo de HMI .....	16
<b>Figura 11-1</b>	Componentes de un microprocesador .....	17
<b>Figura 12-1</b>	Esquema de conexión por SPI.....	19
<b>Figura 13-1</b>	Esquema de conexión por I2C.....	20
<b>Figura 14-1</b>	Esquema de conexión por USART .....	21
<b>Figura 15-1</b>	Diagrama de bloques puerto serie RS232 por UART .....	21
<b>Figura 16-1</b>	Entorno de la herramienta STM32CubeMX .....	24
<b>Figura 17-1</b>	Pantalla de tipo TFT 4.3” .....	29
<b>Figura 18-1</b>	PLC MMI-CPC02A.....	30
<b>Figura 1-2</b>	Representación en diagrama de bloques del proceso.....	33
<b>Figura 2-2</b>	Diseño del sistema.....	35
<b>Figura 3-2</b>	Diagrama de bloques sistema de comunicación .....	36
<b>Figura 4-2</b>	Diagrama de bloques comunicación ente microcontroladores .....	38
<b>Figura 5-2</b>	Estructura del microcontrolador STM32F746 .....	38
<b>Figura 6-2</b>	Estructura del microcontrolador STM32F411.....	40
<b>Figura 7-2</b>	Configuración del oscilador STM32F746 .....	41
<b>Figura 8-2</b>	Configuración del oscilador STM32F411.....	41
<b>Figura 9-2</b>	Configuración del oscilador STM32F746 .....	42
<b>Figura 10-2</b>	Configuración del oscilador STM32F411.....	42
<b>Figura 11-2</b>	Asignación del UART STM32F746 .....	44
<b>Figura 12-2</b>	Asignación del UART STM32F411 .....	44
<b>Figura 13-2</b>	Configuración del periférico UART STM32F746.....	45
<b>Figura 14-2</b>	Configuración del periférico UART STM32F411.....	45

<b>Figura 15-2</b>	Configuración de parámetros DMA STM32F746 .....	46
<b>Figura 16-2</b>	Configuración de parámetros DMA STM32F411.....	46
<b>Figura 17-2</b>	Algoritmo CRC (Emisor).....	47
<b>Figura 18-2</b>	Algoritmo CRC (Receptor) .....	47
<b>Figura 19-2</b>	Algoritmo para la comunicación del microcontrolador maestro .....	49
<b>Figura 20-2</b>	Continuación del algoritmo para la comunicación del microcontrolador maestro .....	50
<b>Figura 21-2</b>	Algoritmo para la comunicación del microcontrolador esclavo.....	51
<b>Figura 22-2</b>	Algoritmo principal de control para el sistema.....	52
<b>Figura 23-2</b>	Algoritmo para control de variables de presión y temperatura .....	53
<b>Figura 24-2</b>	Algoritmo de tiempo para alarmas y condicionantes .....	54
<b>Figura 25-2</b>	Forma de la curva característica temporal.....	55
<b>Figura 26-2</b>	Algoritmo controlador PID.....	57
<b>Figura 27-2</b>	Algoritmo para afinar el PID .....	58
<b>Figura 28-2</b>	Algoritmo de las condicionantes del proceso automático-manual .....	59
<b>Figura 29-2</b>	Algoritmo de selección automático-manual.....	60
<b>Figura 30-2</b>	Algoritmo del modo automático.....	60
<b>Figura 31-2</b>	Algoritmo para accionar la Bomba 1 como piloto.....	61
<b>Figura 32-2</b>	Algoritmo para accionar la Bomba 2 como piloto.....	62
<b>Figura 33-2</b>	Esquema 1 del control manual .....	63
<b>Figura 34-2</b>	Esquema 2 del control manual .....	63
<b>Figura 35-2</b>	Diseño del CPU.....	64
<b>Figura 36-2</b>	Asignación de comunicaciones.....	65
<b>Figura 37-2</b>	Diseño de Señales analógicas.....	65
<b>Figura 38-2</b>	Diseño salidas digitales.....	66
<b>Figura 39-2</b>	Diseño de entradas digitales .....	66
<b>Figura 40-2</b>	Visión en 3D de la placa de desarrollo (capa superior) .....	67
<b>Figura 41-2</b>	Visión en 3D de la placa de desarrollo (capa inferior) .....	67
<b>Figura 1-3</b>	Prueba para normalidad de datos mediante SPSS.....	73
<b>Figura 2-3</b>	Datos descriptivos mediante SPSS .....	74
<b>Figura 3-3</b>	Representación de resultados mediante T Student (SAIE).....	75

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3</b> Respuesta de la señal de control .....	69
<b>Gráfico 2-3</b> Respuesta del controlador PID.....	69
<b>Gráfico 3-3</b> Transmisión de información y errores .....	71
<b>Gráfico 4-3</b> Error porcentual de datos.....	72

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1-1</b> Función sistema de primer orden.....	9
<b>Ecuación 2-1</b> Función de controlador PID.....	9
<b>Ecuación 3-1</b> Función de controlador PID.....	10
<b>Ecuación 1-2</b> Cálculo de la pendiente.....	56
<b>Ecuación 2-2</b> Cálculo tiempo de retardo (L) .....	56
<b>Ecuación 3-2</b> Cálculo constante de tiempo (T) .....	56
<b>Ecuación 1-3</b> Fórmula de T de Student.....	75

## **RESUMEN**

El objetivo fue diseñar e implementar un Sistema de Comunicación Hardware/Software para el Procesador Lógico Programable (PLC) MMI-CPC02A y una pantalla con Transistores de películas fina (TFT) destinados al control para sistemas de bombeo de agua a una presión constante con un alcance de dos bombas alternantes. El proceso fue realizado mediante dos microcontroladores de arquitectura ARM de 32 bits, colocados en ambos dispositivos, uno actuando como maestro y el otro como esclavo, se realizó la interfaz de comunicación para el intercambio de datos entre ambos controladores. Se enlazaron estos microchips de forma serial asincrónica (UART), a una velocidad de 2.5 Mbs, en busca de obtener una transmisión y recepción de datos de manera permanente y estable. Se desarrollaron algoritmos y sentencias necesarias para que el nuevo dispositivo controle sistemas hidráulicos, la finalidad de estos procesos es abastecer con líquido vital a viviendas o industrias a pesar de las variaciones en la red. Se implementó un controlador proporcional integral derivativo (PID) que es capaz de controlar este tipo de sistemas sin conocer la función de transferencia a la que se rige el proceso. Se minimizaron los errores que acarrea el procesamiento de la información mediante la implementación del código de redundancia cíclica (CRC); con un margen de error del 1%, dando como resultado un sistema de comunicación confiable. Se concluye que a medida que se incrementa la velocidad del traspaso de datos el error incrementará proporcionalmente. Se recomienda conocer la estructura de los microcontroladores implementados y los protocolos existentes para la transferencia de información.

**PALABRAS CLAVE:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA>, < SISTEMAS DE COMUNICACIÓN>, <CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)>, <PANTALLA CON TRANSISTORES DE PELÍCULAS FINA>, <MICROCONTROLADORES STM32>, < RECEPTOR TRANSMISOR ASÍNCRONO UNIVERSAL (UART)>, <VERIFICACIÓN DE REDUNDANCIA CÍCLICA (CRC)>.

## ABSTRACT

The objective was to design and implement a System of Communication Hardware /Software for the Programmable Logical Processor (PLC) MMI-CPC02A and screen with thin film transistors (TFT) intended to the control for water pumping systems with a constant pressure with a range of two alternating pumps. The process was developed through two micro controllers of architecture ARM of 32 bits, placed in both devices, one acting as master and the other as slave, the communication interface was developed for the data exchanging between both controllers. These microchips were linked in an asynchronous serial way (UART), with a speed of 2.5 Mbs, looking for obtaining a data transmission and reception in a permanent and steady way. Necessary algorithms and judgements for the new device controlling of the hydraulic systems were developed, the aim of the net variations. A Proportional – Integral - Derivate controller (PID) was implemented; it was capable to control this kind of systems without knowing the function of transference to witch the process is governed. Errors that carry the information processing were reduced through the implementation of the clinical redundancy code (CRC); with an error margin of 1%, giving as result a reliable communication system. It is concluded that as the data transfer speed increases the error will increase proportionally. It is recommended to know the structure of the implemented microcontrollers and the existing protocols for the information transference.

Keywords: < TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, < ENGINNERING AND ELECRONIC TECHNOLOGY>, <COMMUNICATION SYSTEMS>, <PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER (PLC)>, <SCREEN WITH THIN FILM TRANSISTORS>, < MICROCONTOLLERS STM32 >, <UNIVERSAL ASYSCHRONOUS RECEIVER TRANSMITTER (UART)>, <CYCLIC REDUNDANCY CHECK (CRC)>

## **INTRODUCCIÓN**

### **ANTECEDENTES**

ACSIMB CIA. LTDA. es una empresa radicada en la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua (Ecuador).

Entre las actividades que desempeña se encuentran la automatización y control de sistemas y procesos industriales, parte de sus recursos son destinados al desarrollo de dispositivos de alta calidad en busca de brindar soluciones tecnológicas a sus clientes y aportar así al avance del país.

Fruto de su arduo trabajo y su experiencia por más de 30 años en el ámbito industrial, se ha desarrollado módulos que ayudan al control de sistemas.

Entre los procesos de control que brinda ACSIMB, se encuentran los sistemas de presión constante controlado por bombas de velocidad variable, su principal función es abastecer de manera permanente de agua a una determinada industria, hotel o residencia, a pesar de las variaciones existentes en la red. Es por esta razón en el año 2014, se creó un Controlador Lógico Programable (PLC) denominado MMI-CPC02A dedicado a supervisar esta clase de procesos.

Entre las funciones que posee incluyen: supervisión de sensores de nivel, indicación de alarmas mediante su pantalla LCD de 16x2, manejo de teclado para configuración de parámetros, conteo de horas de trabajo de cada las bombas instaladas, manejo en modo manual o automático de bombas, control PID de la presión, señales de voltajes adecuados para trabajar conjuntamente con variador de frecuencia.

Con el trascurso del tiempo la demanda para el control de los sistemas hidráulicos de presión se ha incrementado, requiriendo dar mayor prestancia al PLC.

Es así como surge la idea y necesidad de crear un prototipo de dispositivo, unificando al módulo MMI-CPC02A y una pantalla de tipo TFT, que den origen a un solo elemento PLC+HMI, el cual brindará seguridad, eficiencia, confort; a los usuarios donde el módulo desarrollado sea instalado.

El prototipo tendrá la capacidad de controlar y supervisar los sistemas de presión constante con un alcance de dos bombas alternantes y una fija.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿El desarrollo de un sistema hardware/software de comunicación entre PLC-HMI permitirá encontrar un gran desempeño del algoritmo de control?

¿Qué circuito de acondicionamiento permitirá la medición de la variable de control y manipulación?

¿El presente trabajo facilitará obtener los parámetros del controlador sintonizado bajo un método clásico de modelo matemático?

¿La factibilidad de uso de una pantalla de tipo TFT implementada sobre el controlador MMI-CPC02A permitirá el desarrollo eficiente de un sistema de control?

¿Qué impacto producirá la implementación del control de presión constante?

## **JUSTIFICACIÓN**

Las razones por las cuales se realizará este proyecto están enfocadas a tener mayor prestancia a futuro del PLC MMI-CPC02A con el que cuenta la empresa ACSIMB Cía. Ltda.

Con el afán de brindar mejores servicios se pretende unificar dos dispositivos, el Controlador Lógico Programable y una pantalla de tipo TFT, los cuales permitan dar como resultado un Prototipo robusto PLC+HMI, destinado al control de sistemas de presión constante implementados en industrias, residencias, hospitales, entidades educativas y otras instituciones que lo requieran.

Realizar este prototipo no solo involucra los componentes físicos, es necesario desarrollar un sistema de comunicación(software) entre los microcontroladores de módulo CPC02A y la pantalla, en base a protocolos existentes, la comunicación ayuda a intercambiar información de manera continua y minimizando los errores que se producen en los tiempos de ejecución del proceso.

Una placa electrónica de circuito impreso, contendrá a uno de los microcontroladores, el cual hará las veces de esclavo; donde estarán almacenados el programa del proceso y las sentencias necesarias para controlar los sistemas de presión constante con un alcance de dos bombas alternantes.

Entre los argumentos para controlar estos sistemas se mencionan los siguientes:

- Suministrar de manera permanente el fluido sin importar horarios.
- Racionamiento de agua
- Ahorro energético.
- Evita los golpes de ariete, uno de los factores principales para los daños en las infraestructuras.
- Ejecución del proceso de forma silenciosa.
- Calibración de presión

De este modo el usuario u operador, no necesita supervisar de forma continua el desempeño del sistema.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General:**

Diseñar e Implementar un Sistema de Comunicación Hardware/Software para el PLC MMI-CPC02A y una pantalla de tipo TFT.

### **Objetivos Específicos:**

- Desarrollar un sistema de control para el proceso de dos bombas alternantes
- Diseñar un circuito de acondicionamiento para medir y manipular la variable presión.
- Desarrollar un modelo matemático tipo PID que permita controlar el sistema.
- Aplicar procedimientos de pruebas experimental sobre el sistema de comunicación para verificar su funcionamiento óptimo basado en el criterio del error.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1 Automatización de procesos industriales

#### 1.1.1 Introducción

La automatización se ha convertido en un recurso particular y necesario que poseen los procesos industriales, para de esta forma efectuar sus actividades operativas de modo autónomo y ordenado.

En los últimos años la automatización se ha incrementado de acuerdo a las necesidades y a los avances tecnológicos; se ha añadido dispositivos electrónicos que han permitido perfeccionar las características de los sistemas, los cuales buscan optimizar recursos y obtener mejoras en la producción.

Un sistema autónomo debe ser confiable, eficiente, óptimo, que brinde seguridad a los operadores y al sector productivo de una empresa.



**Figura 1-1:** Automatización de procesos industriales

**Fuente:** <http://www.coinatsas.com/>

### ***1.1.2 Definición***

Un sistema automatizado tiene la capacidad de reaccionar de forma autónoma ante las variaciones que puedan ocurrir dentro de un proceso, realizando las operaciones adecuadas para cumplir con los objetivos de diseño; sin necesidad de la intervención manual del operador.

Son sistemas de bucle cerrado; la información del trabajo que realizan los elementos que componen un proceso, son captados por medio de los sensores que aportan señales para que el procesador efectúe los cambios correspondientes bajo parámetros de programación ya establecidos, y de esta forma se mantengan controladas las variables del sistema.

La automatización permite asegurar el funcionamiento óptimo de las plantas, reduce tiempos, previene y corrige errores, además de proteger a las personas. (Sanchis et al, 2010 p.6).

### ***1.1.3 Elementos de un Proceso Automatizado***

La automatización de procesos se obtiene mediante dos componentes fundamentales:

#### Automatismos cableados

Son los dispositivos físicos que conectándolos entre si están destinados a cumplir con un trabajo específico dentro del sistema de control; están unidos mediante cables eléctricos (relés, disyuntores, contactos, motores, interruptores magnetotérmicos y más).

#### Automatismos programados

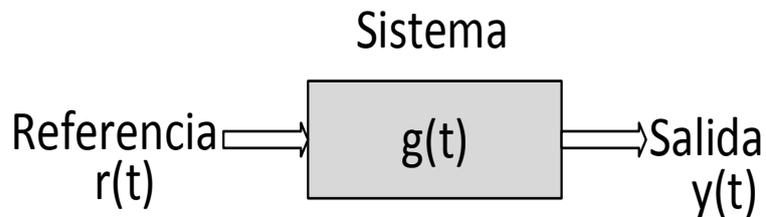
Dentro de esta clasificación se aprecia a los componentes y módulos, los cuales, por medio de un programa, ejecutan instrucciones determinadas para controlar en tiempo real a los procesos (PC, PLC, HMI, microcontroladores, variadores de frecuencia y más).

Ambos elementos trabajan unificados en busca de supervisar las señales de entra y salida de un sistema. (Sanchis et al, 2010 pp-7-8).

## **1.2 Sistemas de control**

### 1.2.1 Definición

Un sistema de control presenta elementos físicos, los cuales se acoplan entre sí de manera ordenada; en busca de mejorar el desempeño del control de una máquina o proceso. Debe poseer la capacidad de garantizar estabilidad frente a las distintas perturbaciones que puedan presentarse en el transcurso del procedimiento e impida el trabajo adecuado de la planta.



**Figura 2-1:** Esquema de un sistema

Fuente: ARIAS, Alex 2017

### 1.2.2 Tipos de sistemas de control

Al analizar sistemas de control, se estudia dos clases de ellos:

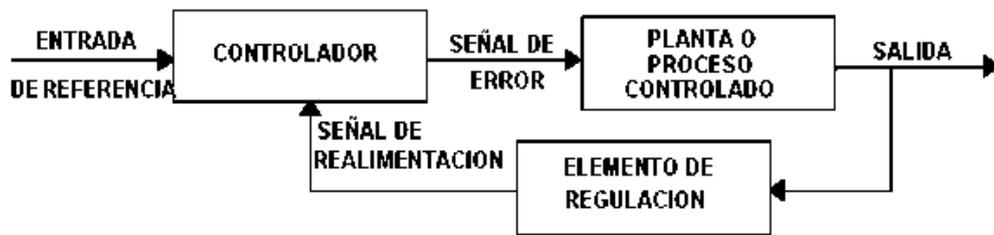
Sistemas de control en lazo abierto: Son aquellos en los cuales las variables resultantes, no tiene ninguna repercusión sobre las variables de control, es decir que la salida no influye de forma directa sobre la entrada de sistema.



**Figura 3-1** Sistema de control en lazo abierto

Fuente: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

Sistema de control en lazo cerrado: Este tipo de sistemas se los denomina retroalimentados, su controlador acoge la señal de error intentando minimizarlo, mediante la relación que establece la señal de salida a la etapa de entrada.



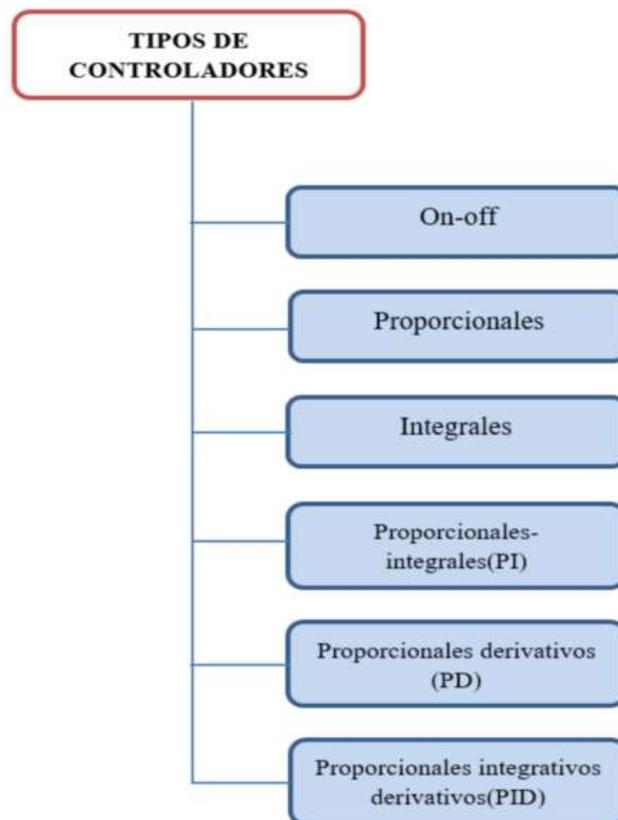
**Figura 4-1:** Sistema de control en lazo cerrado

Fuente: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>

### 1.3 Controladores

Los controladores son elementos principales de los bucles cerrados, fueron creados para detectar y modificar las señales de salida de un sistema que se comparan con las señales de referencia de la planta. Las señales son receptadas por un actuador, el cual permite corregir el funcionamiento del sistema:

#### 1.3.1 Tipos de controladores



**Figura 5-1:** Tipos de controladores

### ***1.3.2 Controlador PID***

En la actualidad la mayoría de sistemas de control industrial y procesos automáticos, incorporan en su diseño controladores de tipo PID o PID modificado.

La utilidad de los controles PID radica en su aplicación en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular son de gran utilidad cuando el modelo matemático de la planta no es conocido, en estas instancias no es posible utilizar métodos de diseño analíticos.

En el instante de emplear un controlador en un sistema se aporta con un nivel satisfactorio a perturbaciones existentes en el entorno, mas no un control óptimo.(Ogata, 2003:p.682)

### ***1.3.3 Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID***

Las reglas de Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID, son muy convenientes al no conocer los modelos matemáticos o funciones de transferencia de la planta. Estas reglas aplican valores de ganancia proporcional( $K_p$ ), tiempo integral( $T_i$ ), tiempo derivativo( $T_d$ ), que ayudan a estabilizar el sistema.

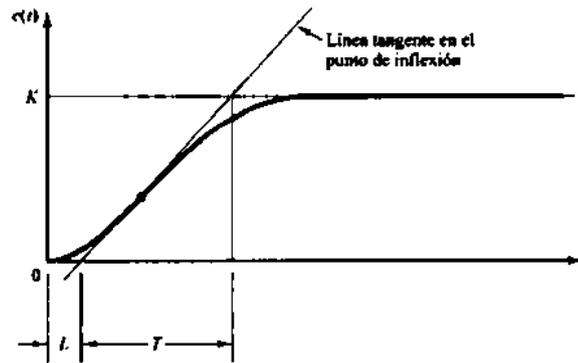
Los criterios de Ziegler-Nichols se fundamentan en la característica de respuesta transitoria de los sistemas. (Ogata, 2003:p.683)

Existen dos métodos dentro de las reglas de sintonía.

- Método Reacción de la curva
- Método de Oscilación

#### **Método Reacción de la curva**

Se obtiene de manera experimental, la curva que caracteriza a este tipo de sintonía adquiere una forma de S.



**Figura 6-1:** Curva de respuesta en forma de S.

Fuente: (Ogata, 2003:pág.683). Ingeniería de control moderna

**Tabla 1.1:** Regla de sintonía basada en la respuesta de escalón

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2L	0.5L

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Fuente: Ogata, 2003

**Ecuación 1-1:** Función sistema de primer orden

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{1 + ts}$$

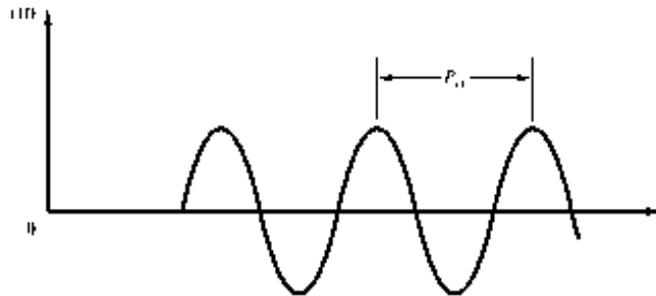
La curva se basa en dos parámetros: constante de tiempo(T) y el tiempo de retardo(L).

**Ecuación 2-1:** Función de controlador PID

$$G_c(s) = Kp(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

## Método de Oscilación

El segundo método se basa en un controlador de bucle cerrado, solo con una acción proporcional. Sus valores se modifican a partir de la ganancia proporcional  $K_p$ , se añade una variable  $K_{osc}$  la cual permite oscilar la respuesta del sistema en un cierto periodo de tiempo  $T_{osc}$ . Esta segunda regla es implementada comúnmente en sistemas donde se conoce los modelos matemáticos en conjunto del lugar geométrico de las raíces. (Ogata, 2003:p.685).



**Figura 7-1:** Oscilación sostenida ( $P_{cr}$ )

Fuente: (Ogata, 2003:pág.685). Ingeniería de control moderna

**Tabla 2-1:** Regla de sintonía basada en la ganancia y periodo crítico.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5K_{cr}$	$0.125K_{cr}$

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Fuente: Ogata, 2003

**Ecuación 3-1:**Función de controlador PID

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

### 1.3.4 Sintonía de parámetros

La sintonía de parámetros es el proceso realizado para modificar valores de un tipo de controlador elegido.

Los parámetros pueden ser considerados mediante dos métodos:

- Cuando se cuenta con valores empíricos, es decir, sin conocer los modelos matemáticos por los cuales están regidos el sistema.
- Cuando se aplica mediante métodos analíticos, mediante técnicas en dominio de frecuencia o tiempo.

Para realizar este tipo de procedimiento se debe considerar con los pasos siguientes:

- Identificar las características y funciones del proceso a ser controlado.
- Aplicar criterios de optimización mediante la respuesta transitoria y respuesta permanente.
- Ajustar parámetros mediante resultados anteriores.

## **1.4 Controlador Lógico Programable (PLC)**

### ***1.4.1 Introducción***

Los autómatas programables aparecen en la década de los 60, con objetivo de minimizar costos de tecnología cableada; diez años más tarde, el PLC controló las entradas y salidas con mayor facilidad de máquinas secuenciales gracias al manejo de datos mediante bits e instrucciones definidas, mejoró sus funciones contando con temporizadores, bucles, selección de estrada de lógica múltiple.

Este tipo de procesadores logra inspeccionar secuencias en paralelo, pueden controlar y realizar la toma de decisiones de más de un sistema a la vez; permitiendo obtener un control centralizado a velocidades mayores a 50 millones de instrucciones por segundo.

La tecnología y el desarrollo continuo ha dado origen a PLCs de distintos fabricantes, con aplicaciones diversas, siendo implementados en el aspecto industrial, así como en la Inmótica y la domótica. (Solbes, 2013: p.139).

### ***1.4.2 Definición***

El controlador lógico programable (PLC) se define como un aparato, creado para el control de sistemas industriales en forma secuencial y en tiempo real. Es un instrumento con un número determinado de entradas y salidas para acoplar elementos que integran el proceso, por medio del software permite controlar las señales de los dispositivos conectados. (Solbes, 2013,pp-139-140).

### ***1.4.3 Funciones de un PLC***

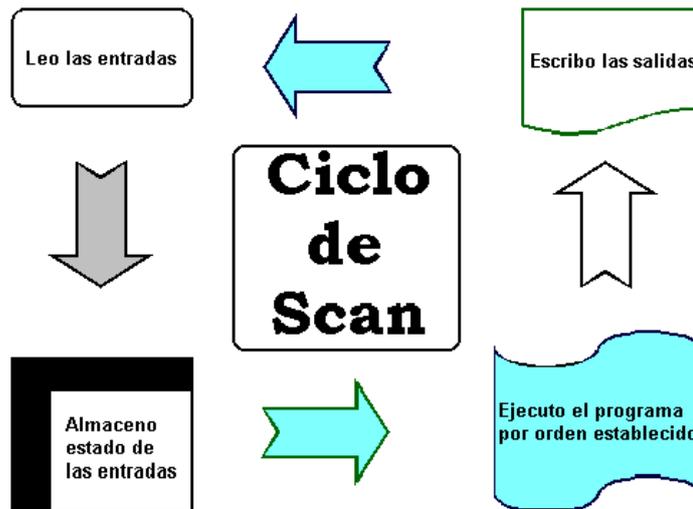
Un autómatas programable, dentro de un sistema autónomo desempeña las siguientes funciones:

- Recolecta datos resultantes de las entradas a través de las fuentes digitales y analógicas.
- Toma decisiones en base a las sentencias de programa de control.
- Almacenamiento de datos en la memoria.
- Realiza cálculos matemáticos.
- Controla los dispositivos externos mediante las salidas analógicas y digitales.
- Se comunica con otros sistemas externos para mejorar el control de la planta.
- Inspecciona procesos continuos.

### ***1.4.4 Tiempo de SCAN***

El tiempo SCAN es el ciclo en el cual el controlador lógico programable repite las tareas necesarias para completar el proceso; dentro de estas tareas se encuentran las lecturas de entradas y salidas, operaciones propias del programa de control y escritura de los resultados.

Este ciclo está vigilado mediante un timer, que hace las veces de reloj guardián; supervisa que el tiempo sea el indicado.



**Figura 8-1:** Tiempo de SCAN

Fuente: <http://unicrom.com/software-de-un-plc-bascula-rs-salidas/>

### 1.4.5 Arquitectura de un PLC



**Figura 9-1:** Arquitectura de un PLC

Fuente: <https://davidrojasticsplc.wordpress.com/>

Un PLC está constituido por los siguientes elementos:

#### Fuente de alimentación

Los plc son diseñados para funcionar por medio de fuentes de corriente alterna (AC); sin embargo, algunos de ellos se alimentan mediante corriente directa (DC); a la vez, acciona distintos elementos electrónicos que forma parte del sistema de control. Este tipo de controladores deben aceptar una variación de alimentación entre 10% y 15%.

#### Módulo CPU (Unidad central de procesamiento)

El CPU es considerado el cerebro del PLC, está constituido por microcontroladores con la capacidad de interpretar y ejecutar las instrucciones que permanecen en la memoria; es el elemento que toma las decisiones sobre las entradas y salidas del sistema.

Dentro de la unidad central están almacenadas las instrucciones para el procesamiento lógico, en arquitecturas de 8, 16, 32 y 64 bits.

Cuatro son los tipos de memoria más comunes:

- EPROM
- EEPROM
- RAM
- FLASH

### Módulo de entradas y salidas

Al instante de elegir que PLC implementar en un proceso, la cantidad de entradas y salidas es uno de los factores más influyentes; mediante estos bloques se obtiene la información de los dispositivos conectados al exterior controlados por señales eléctricas. Entre las señales de entrada y salida tenemos las siguientes:

- Entradas digitales  
También denominadas discretas, acogen dos valores 0 y 1, permite representar estados de elementos por medio de señales de tensión.
- Entradas análogas  
Este tipo de señales admiten valores de tensión de 0-5 VDC, o rangos de corriente de 0-20 mA; los tipos análogas son utilizadas para las señales generadas por los sensores.
- Salidas a transistor  
Son aquellas con la capacidad de funcionar a corriente continua, tiene una vida útil mayor que las de relé.
- Salidas de relé  
Es posible conectar cargas de corriente continua o alterna, poseen la capacidad de soportar hasta 2A; su vida útil es menor.
- Salidas análogas

Son aquellas señales variantes en el tiempo, puede admitir cualquier valor dentro de un rango establecido; son utilizados para determinar las variables físicas de los procesos.

### Módulos especiales

Dentro de los módulos especiales, se encuentran aquellos destinados a la comunicación, aplicados para el monitoreo de las variables que intervienen en el proceso, integrado además por bloques compactos y modulares, los cuales permiten al usuario contar con entradas y salidas extras; estos elementos también se los conocen como módulos de expansión.

## **1.5 Interfaz hombre-máquina (HMI)**

### ***1.5.1 Introducción***

El término HMI proviene de la interacción que se brinda entre el hombre y una máquina, su función es permitir al usuario recabar y transmitir información para de esta forma controlar un proceso; el panel de control de un interfaz se caracteriza por ser agradable de usar, accesible y funcional, la administración del proceso se realiza en tiempo real en base a las señales de entrada y salida provenientes del procesador y los elementos conectados dentro de un sistema. (Barrios & Galeano, 2014: pp.6-7)

### ***1.5.2 Definición***

Un interfaz hombre máquina conocido como HMI, provee un interfaz de control, visualización y manipulación entre el usuario y un proceso o computadora; proporciona niveles de confianza al instante de monitorizar y gestionar una determinada aplicación. (Barrios & Galeano, 2014, p.7).

### ***1.5.3 Funciones del software HMI***

Monitoreo: Esta función facilita obtener los datos del proceso, por medio de gráficos o números, con lo cual el operador podrá tomar decisiones.

Supervisión: Permite acceder y editar las condiciones de trabajo de la planta directamente desde el panel de control.

Control: Admite configurar y agregar sentencias para ajustar valores del proceso.

Alarmas: En base a esta caracteriza se puede visualizar eventos no deseados a los algoritmos previamente programados

Historial: Mediante esta función se almacenan datos necesarios para llevar registros de los trabajos efectuados en el sistema



**Figura 10-1:** Ejemplo de HMI

**Fuente:** <http://www.duranmatic.nl/en/hakko-technoshot-hmi.html>

## 1.6 Microcontroladores

### 1.6.1 Introducción

Los microcontroladores son elementos importantes en el área de la electrónica, han logrado cambiar la manera de diseñar los circuitos electrónicos.

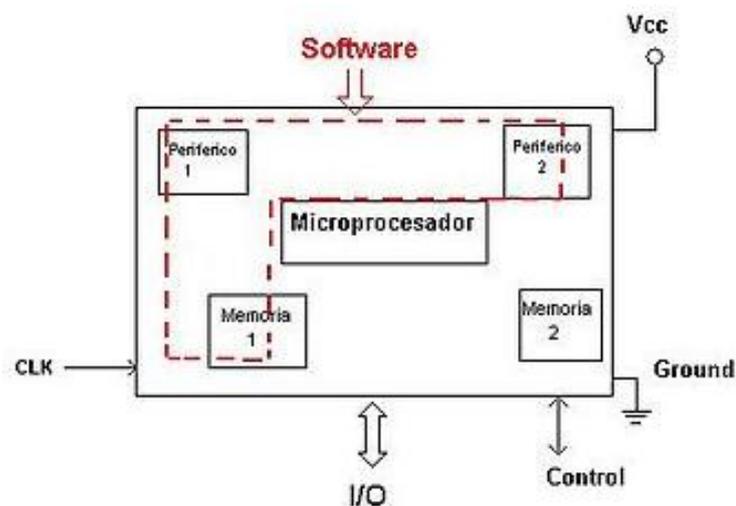
Están capacitados para ejecutar e interpretar las instrucciones que el programador indique.

El desarrollo de los microcontroladores hoy en día se ha integrado núcleos los cuales añaden mayor capacidad de procesamiento.(Banchimot, 2011: p.52).

### 1.6.2 Definición

Los microcontroladores son circuitos integrados constituidos en su interior por transistores; mediante estos elementos se crean circuitos que ayudan a realizar y administrar tareas complejas almacenadas en la memoria; se los puede denominar unidad de procesamiento central. Puede actuar como el cerebro de un sistema computacional. (Banchimot, 2011,p.52).

### 1.6.3 Componentes de un microcontrolador



**Figura 11-1:** Componentes de un microprocesador

Fuente: <http://microcontroladores-e.galeon.com/>

- **CPU.** - La unidad de procesamiento central es el componente que controla los procesos, es decir, cada una de las instrucciones dentro del microcontrolador.
- **Memoria RAM.** - Es utilizada para acumular los datos y variables implicadas para ejecutar procesos, si la señal de alimentación es cortada se borra toda la información almacenada, es decir que es un componente volátil.

- **Memoria Remanente.** - Dentro de la memoria RAM están almacenados los datos y el software propios de cada microcontrolador elaborados por el fabricante.

Tipos de memoria:

- PROM
- ROM
- EPROM
- EEPROM
- FLASH

- **Periféricos de entrada y salidas.** - Unas de las partes funcionales de un microcontrolador son los puertos de entrada y salida, mediante los cuales el procesador ejecuta tareas de baja o alta complejidad. Cada microcontrolador posee un número determinado de terminales dedicados a realizar funciones de emisión o transmisión por medio de circuitos de interfaz como puerto serie, paralelo o control de transferencia.

#### ***1.6.4 Control de periféricos***

El control de periféricos de entrada y salida es realizado por módulos, característica que poseen la mayoría de microcontroladores, y estos son:

- **Temporizadores:**

Los temporizadores o Timers facilitan que el microcontrolador trabaje o realice algún procedimiento en un intervalo de tiempo establecido.

Un microcontrolador maneja más de un contador, estos pueden ser programados para así llevar un registro de pulsos internos o externos, este tipo de temporizadores son de tipo asincrónico de 8 o 16 bits.

Los temporizadores también incorporan un contador asincrónico, como una especie de contador auxiliar, su función es actuar como un pre-divisor o post-divisor (prescaler-postscaler) dependiendo de la ubicación de este.(Valdés & Pallás , 2007: pp.224-228)

- **Convertor análogo digital (A/D):**

Un convertidor A/D convierte valores variantes en el tiempo en digitales discretos de n bits, es decir que transforma un número real a uno binario por medio de un muestreo. Su objetivo es medir el voltaje en algún pin de entrada del microchip.

- **Convertor digital análogo (D/A):**

Este tipo de convertidores realiza el trabajo inverso al anterior, transformando valores binarios a números reales.

## **1.7 Interfaz de comunicación**

La interfaz de comunicación permite intercambiar datos de un microcontrolador a otro, o a su vez con otro dispositivo.

Su transmisión se lo realiza mediante dos maneras: comunicación paralela y comunicación serie.

La comunicación serial en la actualidad alcanza mayores niveles de estandarización, es por esta razón que se la utiliza con mayor frecuencia en relación a la comunicación en paralelo.

### ***1.7.1 Protocolos de comunicación serial***

Un componente principal en un sistema de comunicación son los protocolos, están considerados como un conjunto de reglas y normas estándar con un procedimiento específico que ayudan a transmitir y receptor información de un punto a otro.

Existen diferentes protocolos o periféricos que ayudan a intercambiar datos y estos son:

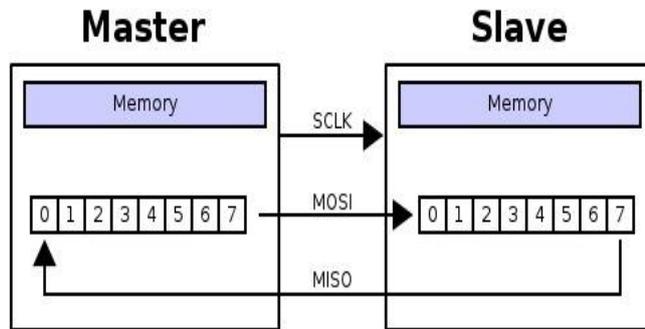
- **SPI**

Su nombre proviene las siglas en inglés (Synchronous Peripheral Interface), es uno de los enlaces de datos seriales de manera sincrónica, su forma de operación es enviar datos en ambas direcciones al mismo tiempo, a esta acción se la denomina full dúplex.

El SPI fue desarrollado inicialmente para un alcance de 20 centímetros y velocidades de transmisión de 10 (Mbps).

Maneja un esquema maestro/esclavo, el maestro establece un tiempo el cual debe responder el esclavo.

El SPI comunica por medio de cuatro señales denominadas MOSI, MISO, SCK y SS, necesita de 8 pulsos para poder transmitir 1 byte



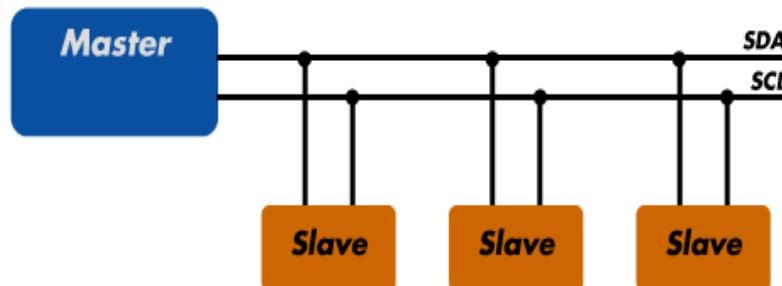
**Figura 12-1:** Esquema de conexión por SPI

Fuente: <http://panamahitek.com/como-funciona-el-protocolo-spi/>

- **I2C**

El circuito inter-integrado es un tipo de estándar muy utilizado en sistemas embebidos, se caracteriza por tres líneas de transmisión, una de ellas transfiere datos, la otra es la señal del reloj y una como GND. Es por esta razón que la información lo hace de forma Half- dúplex.

Los dispositivos I2C, pueden ser manipulados como maestros o esclavos. Maneja una velocidad de comunicación alrededor de 100kbps, de bajo costo, muy sensible a las interferencias como ruido eléctrico.



**Figura 13-1:** Esquema de conexión por I2C

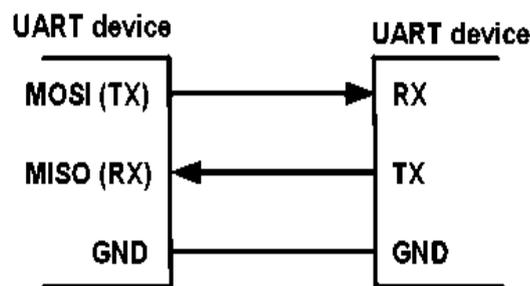
Fuente: <http://dignal.com/el-bus-i2c/>

- **USART y UART**

El receptor transmisor sincrónico y asincrónico universal y receptor transmisor asincrónico universal, se caracterizan por ostentar dos señales, una de ellas como transmisor de datos de un dispositivo y la otra como un receptor. La transición de información es de dos modos:

Asíncrono full dúplex: La transmisión y recepción de los datos se realizan al mismo tiempo, independiente de las frecuencias a las cuales han sido programados los dispositivos; de este modo duplica su velocidad de transferencia.

Síncrona half duplex: La transmisión no es realizada de manera simultánea después de un lapso de tiempo, dando lugar al maestro y esclavo de la comunicación.

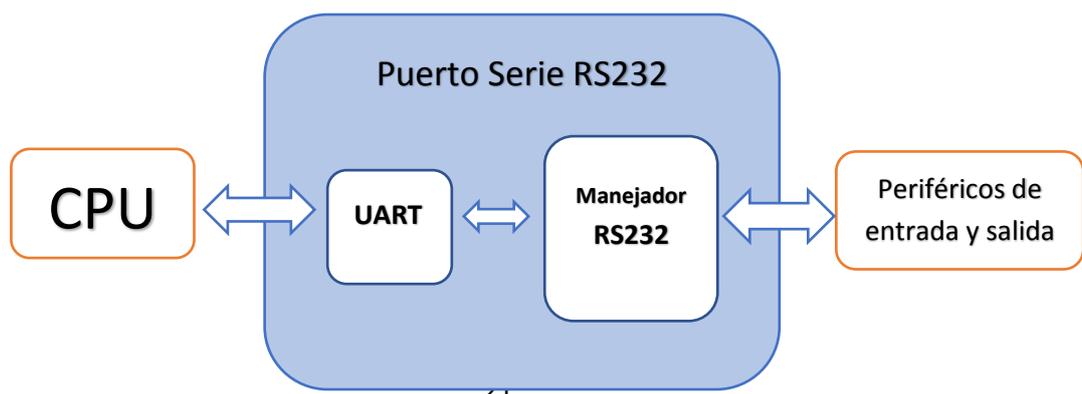


**Figura 14-1:** Esquema de conexión por USART

Fuente: <https://geekytheory.com/puertos-y-buses-1-i2c-y-uart>

### 1.7.2 Puerto serie RS232

El puerto serie RS232 es una forma por la cual se completa la interfaz de comunicación, es un puente entre los dispositivos externos a conectar y los distintos estándares de comunicación existentes, los niveles de tensión que maneja son de -12 V y +12 V



## **Figura 15-1:** Diagrama de bloques puerto serie RS232 por UART

**Realizado por:** ARIAS, Alex 2017

### **1.8 Errores de comunicación**

Al instante de almacenar, procesar y transmitir información; se generan variaciones en los datos enviados o recibidos, conocidos como errores; se originan debido al ruido existente en el procesamiento o por características propias de los elementos implementados. Por estas razones están diversas técnicas que se fundamentan en añadir un número determinado de bits redundantes.

La redundancia consiste en transmitir los datos en ambas direcciones, de tal forma que el dispositivo A, realiza una comparación con los bits del dispositivo B, detectando las desigualdades en la comunicación.

Algunos de los métodos son:

#### **1.8.1 VRC y LRC**

La detección de errores por VRC permite calcular datos en dirección vertical mientras LCR los hace en dirección horizontal. Sus usos están destinados con el código ASCII y es una de las técnicas más sencillas de ser implementadas; pero posee sus limitaciones.

En esta clase de métodos se identifica un bit de control, denominado bit de paridad, el cual puede tomar dos tipos de detención

- Bit de paridad par
- Bit de paridad impar

#### **1.8.2 CRC**

El código de redundancia cíclica o denominado secuencia de chequeo de trama; añade un número determinado de bits a todo el tren de datos, la información transmitida es dividida para

el factor CRC asignado, este método se basa en el residuo de una división de polinomio, el valor del CRC se compara tanto en el transmisor como receptor, si existe alguna diferencia, la trama en transcurso es retirada por aparición de datos equivocados.

## **1.9 Microcontroladores con arquitectura ARM**

### ***1.9.1 Introducción***

Los microcontroladores con arquitectura ARM fueron desarrollados por Acorn Computers para el uso de computadoras, son ordenadores con un conjunto reducido de instrucciones (RISC); han evolucionado al punto de predominar el mercado mundial de la electrónica móvil.

Ofrecen una gama alta de periféricos, al ser una clase de arquitectura simple dan origen a dispositivos de alta velocidad y bajo consumo de energía; separa las instrucciones que acceden a la memoria con aquellas que procesan datos, establece una longitud uniforme y fija al instante de decodificar la información.

### ***1.9.2 Características de la arquitectura ARM***

- Las instrucciones se ejecutan en un solo ciclo de reloj.
- Control del procesamiento de datos en base a la unidad aritmética (ALU).
- Maximiza el rendimiento, al cargar y almacenar las instrucciones.
- Ejecuta la instrucción siguiente antes de que la actual finalice.
- Gracias a su tamaño ocupa un área pequeña.
- Son microprocesadores de bajo costo.

## **1.10 Microcontroladores stm32**

La familia de microprocesadores STM32, está basada en un núcleo ARM de 32 bits y en un procesador Cortex® -M, ofrecen alto rendimiento, procesan señales digitales, bajo consumo en energía, operación en baja tensión, trabajo en tiempo real y la facilidad que brinda al usuario para el desarrollo de sus trabajos.

La familia ST posee amplia gama de series y tarjetas de desarrollo, apoyadas en un núcleo con características estándar para la industria, herramientas y software ideales para proyectos en todo tipo de plataforma.

### ***1.10.1 Programación de los microcontroladores STM32***

Al instante de programar microcontroladores con arquitectura ARM, se puede mencionar tres modos de programación más conocidos y utilizados:

- Interrupciones
- Sondeo
- DMA

#### Programación por interrupciones:

Esta clase de herramienta permite al microcontrolador interrumpir por un instante de tiempo el suceso que se está ejecutando, mientras tanto en ese intervalo consigue atender otra solicitud de rutina; una vez terminada regresa al trabajo que dejó pendiente.

Las interrupciones deben ser atendidas de forma instantánea dependiendo de la prioridad asignada.

#### Programación por sondeo:

Programación por sondeo o polling, busca sincronizar los procesos, las ejecuciones de este tipo son realizadas con un orden específico, este método es catalogado como un tipo de programación muy pobre, pues complica el procesamiento de información de algunas aplicaciones.

#### Programación por DMA:

El acceso directo a memoria es otro de los recursos para manipular periféricos; esta herramienta es diseñada para facilitar la transferencia de información desde la memoria, sin necesidad de intervención por parte del procesador. Este método es conveniente puesto que la unidad central de procesamiento dedica su ejecución a tareas más útiles para el sistema, dejando que las rutinas con menor prioridad sean ejecutadas por DMA.



### **1.13 STM Studio**

STM Studio es un software el cual depura y diagnostica los trabajos realizados en el entorno STM32, otorga la facilidad de lectura y supervisión de las variables, formas de onda, gráficos a semejanza de un osciloscopio en tiempo real.

Está diseñado para acoplarse de manera perfecta en la depuración de aplicaciones donde se necesita un registro permanente de los datos procesados. (STMMicroelectronics, 2015).

### **1.14 Algoritmos de programación**

Los algoritmos de programación están afines a la lógica y hace relación tanto a la matemática como al lenguaje; pretende dar solución a un problema determinado por medio del conjunto de reglas definidas; una vez finalizado se logra implementar en cualquier programa de computadora, máquina o procesamiento electrónico de datos.

A menudo distintos algoritmos pueden resolver el mismo problema, elegir el mejor es muy complicado, muchas veces depende de la lógica del programador y del tiempo que conlleve diseñar una de estas estructuras. ( Mancilla et al, 2014: pp 3-4)

Un algoritmo debe contar con tres acciones:

- Entrada
- Proceso
- Salida

### **1.15 Lenguajes de programación**

Encontramos una variedad de lenguajes de programación, a pesar del transcurso de los años muchos de los softwares siguen en vigencia. Para que un procesador puede efectuar un proceso, debe iniciar con un algoritmo apropiado, el cual permita entender las estructuras diseñadas y así realizar las operaciones.

Tipos de lenguajes utilizados

- Lenguajes de máquina. - Son aquellos constituidos por cadenas binarias las cuales resuelven una operación determinada; este tipo de lenguajes depende del computador donde se implemente, ya que cada uno de ellos manejan códigos distintos.
- Lenguajes de bajo nivel o ensamblador. - Son más fácil de utilizar y codificar que la clasificación anterior, sus sentencias se caracterizan por ser instrucciones aritméticas en inglés (ADD, SUB, DIV); esta clase de programas no pueden ser ejecutados de forma directa por la computadora, necesitan de una traducción al lenguaje de máquina.
- Lenguajes de alto nivel. - Son lenguajes más manipulados por los programadores. Denominados así por la facilidad que ofrecen a los usuarios de entender el contenido de los programas; se los desarrolla de manera independiente a la máquina, es decir mediante plataformas que suelen ser portables e instalables en cualquier tipo de procesador. Su tiempo de realización y el tamaño del código son menores.

### 1.16 Lenguaje de programación C

C es un lenguaje de programación que a inicios se creó para sistemas operativos UNIX, sin embargo, su gran ampliación permitió el desarrollo dentro de otros sistemas de inicio. Es adecuado para cualquier tipo de aplicación

Elementos de un programa C:

- Constantes
- Identificados
- Palabras reservadas
- Comentarios
- Operadores

Una de las características que identifica al lenguaje C, es identificar los elementos enumerados, sean estos mayúsculas o minúsculas; **int** es la palabra con la cual se asigna una variable y se la denomina reservada.(Serrano, 2011: pp.11)

## **1.17 Circuitos impresos (PCB)**

Los circuitos impresos o PCB, son tarjetas compuestas por materiales conductores laminados soportados en una base de material no conductor. Esta clase de elementos son usados para interconectar componentes electrónicos de forma fija evitando así el ruido blanco.

Elaborar un circuito impreso es abarcar un área del desarrollo tecnológico por la constante renovación de elementos, más compactos y funcionales; los circuitos impresos se realizan de forma manual o, a su vez industrial; desde la colocación de piezas hasta el ensamble dentro de la tarjeta de los materiales a utilizar. (Torres, 2014: pp.3-4)

### ***1.17.1 Reglas de diseño general***

A continuación, se enumera un conjunto de reglas recomendables al instante de diseñar un PCB.

- Evitar el uso de número de vías excesivas; a menor cantidad mejora la transmisión de señales y menor las perforaciones.
- Realizar primero las señales de reloj de alta velocidad y aquellas que conllevan frecuencias altas.
- Para evitar desfasamientos, las pistas deben ser diseñadas de manera simétrica.
- El espesor de las vías debe ser considerado entre 0.050 y 0.025 pulgadas, son las medidas más comunes para señales de potencia; en caso de comunicación pueden ser menores; el ancho depende de la intensidad de corriente eléctrica que circula por las pistas.
- Asignar valores a los componentes de la tarjeta; para facilitar la colocación de elementos.
- Evitar ángulos de 90° por acumulación de cargas las cuales generan ruido, es mejor si se trabaja con una inclinación de 45°.
- Tomar como consideración la tensión eléctrica para determinar las distancias entre las vías.
- Si se utiliza más de una capa, asignar una de ellas para señales de GND.

### ***1.17.2 Software para diseñar circuitos impresos***

Al momento de diseñar circuitos impresos o PCB en el ámbito profesional, existe gran variedad en programas que ofrecen todo tipo de funcionalidades para crear los proyectos.; diferenciados uno de otro por las disponibilidades de elementos que se encuentran dentro de sus galerías. Entre los más relevantes tenemos:

- Multisim-Utilboard
- Proteus-Ares
- Eagle
- Kicad
- Circuit Maker
- Livewire
- etc

### ***1.17.3 Proteus-Ares***

El software Proteus-Ares está compuesto por dos tipos de aplicaciones Ares e Isis.

- Isis. - Permite diseñar esquemas de circuitos electrónicos gracias a su galería que posee un extenso número de materiales existentes en el mercado; se aprecia los periféricos de cada uno de ellos y su distribución de pines. Consta además de una simulación que facilita comprobar si el proyecto el cual se desarrolló cumple con las expectativas del diseñador.
- Ares. - Es una aplicación que ayuda a determinar la ubicación de los elementos utilizados en Isis e implementarlos dentro de la tarjeta a ser impresa. Dentro de Ares se asigna el tamaño de la placa, pistas, perforaciones, pasantes, separación entre elementos y la nomenclatura que estos tendrán.

## **1.18 Componentes del sistema**

### ***1.18.1 Pantalla de tipo TFT 4.3”***



**Figura 17-1:** Pantalla de tipo TFT 4.3”

**Fuente:** <https://www.adafruit.com/product/1591>

Las siglas TFT provienen del significado en inglés ("Thin Film Transistor") ó transistor de película delgada, permite encender y apagar píxeles de manera individual y los tiempos de respuesta son muy altos; es una mejora de la tecnología LCD para perfeccionar la calidad de imagen.

La pantalla de 4.3 pulgadas posee en sus características 480x272 píxeles, una luz de fondo led y una pantalla táctil de tipo capacitiva. Un gran espacio para manipular gráficos e interfaz de usuario.

Estos tipos de pantalla son implementados en ordenadores portátiles, celulares y en distintos proyectos tecnológicos.

### ***1.18.2 PLC MMI-CPC02A***



**Figura 18-1:** PLC MMI-CPC02A

Fuente: <http://acsimb-tech.com/index.php/productos/productos-acsimb>

El módulo es un control automático para bombas de agua en sistemas hidráulicos de casas, industrias o edificios para suministrar la presión demandada. (ACSIMB, 2016: p. 1)

#### Usos

- Servicio agua potable: Hospitales, complejos turísticos, conjuntos habitacionales, hoteles, edificios, industrias (alimentos, textil, plásticos, etc.)
- Control Sistemas de aire comprimido.
- Estaciones de bombeo para incendios.

Entre las funciones que incluyen están:

- Supervisión de sensores
- Indicación de alarmas
- Configuración de parámetros
- Pantallas de lectura
- manejo manual o automático de bombas
- manejo de teclado para configuración de parámetros
- conteo de horas de trabajo de las bombas
- señales de voltajes adecuados para trabajar conjuntamente con variador

## **CAPÍTULO II**

### **2 MARCO METODOLÓGICO**

#### **INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se realiza la descripción de los pasos hacia el diseño y posterior implementación del software y hardware para un sistema de comunicación que permita obtener un solo dispositivo PLC+HMI, destinado al control de agua en un sistema de presión constante con un alcance de dos bombas alternantes.

El procedimiento para lograr el intercambio de datos de un elemento a otro se efectuó mediante los microcontroladores, uno ubicado en la pantalla TFT el cual desempeñará las labores de maestro y el microchip del PLC es el destinado como esclavo del sistema.

Uno de los parámetros a considerar es comprobar que los datos transmitidos y receptados en el funcionamiento del sistema sean los correctos; es por esta razón que se implementó un detector de errores en busca de minimizar de manera considerable los datos inválidos que entorpecen el desarrollo del proceso, de esta forma se busca una comunicación confiable y estable.

Para lograr esto es necesario conocer el funcionamiento y estructura de los sistemas de control de presión constante, se consideró parámetros y elementos que la empresa ACSIMB en base a su experiencia implementa dentro de la inspección de esta clase de procesos.

### **Sistema de presión constante para suministrar agua**

En base al desarrollo de procesadores se afinan esta clase de sistemas para su implementación en el ámbito residencial o industrial.

El objetivo principal de este tipo de sistemas es la distribución de agua de manera permanente, sin importar las variaciones presentadas en la red.

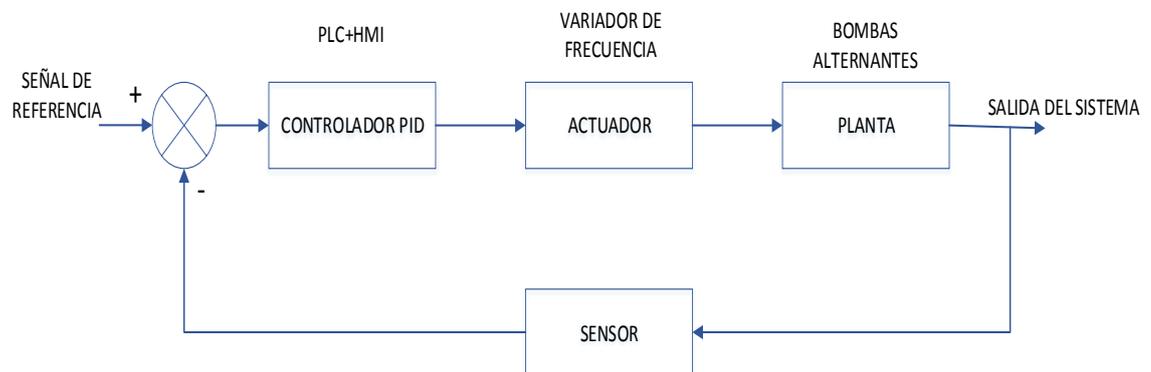
Los beneficios que producen la instalación de los procesos de presión constante son:

- Suministrar de manera permanente el fluido sin importar la variación de la red.
- Racionamiento de agua
- Ahorro del consumo energético.
- Evita los golpes de ariete.
- Calibración de presión.
- Confort al usuario

- Misma vida útil de los elementos del sistema
- Evita supervisión continua del proceso

## Modelo del proceso

En la Figura 1-2 se detalla en diagrama de bloques la constitución del modelo del proceso.



**Figura 1-2:** Representación en diagrama de bloques del proceso

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.1 Planta

La planta dentro de un proceso es el elemento sobre el cual se pretende actuar o controlar.

El sistema a inspeccionar está compuesto por dos bombas alternantes o modulantes, las cuales rotan en forma automática controladas por variadores de frecuencia, su velocidad de funcionamiento depende de la presión registrada por el sensor.

Aquella bomba modulante activa, varía su velocidad para mantener la demanda del caudal y de esta manera conservar la presión deseada, en caso de ser necesario entra en funcionamiento la bomba adicional a una velocidad fija.

Dentro de las consideraciones al momento de elegir las bombas se debe optar que ambas posean características iguales en potencia, RPM, corriente, etc.

## **2.2 Actuador**

El actuador dentro de un sistema permite controlar a los dispositivos mecánicos.

En el proceso de presión constante el dispositivo que cumple con estas funciones es el variador de frecuencia, efectúa modificaciones de velocidad en las bombas instaladas mediante la manipulación de la frecuencia.

La respuesta por parte del variador se fundamenta en las lecturas emitidas por el sensor de presión, de esta forma controlara la velocidad a la cual funcionaran las bombas

En instantes del proceso donde no existe consumo, el sistema está programado para apagar completamente los variadores hasta su requerimiento

## **2.3 Sensor**

El sensor dentro de los procesos, acoge una magnitud física y la transforma en una señal capaz de ser interpretada por el sistema.

El sensor de presión implementado adquiere los valores de presión en unidades de PSI y realiza su lectura en un rango por medio de una señal analógica de 4 a 20 mA.

Por ejemplo, al implementar un sensor de presión de 150 PSI el valor de lectura mayor del sensor corresponde a la señal de 20 mA y su valor de 0 PSI será 4 mA.

Este instrumento de medición permitirá controlar, la presión seteada al momento de configurar el sistema y emitirá lecturas para que la bomba activa ejerza mayor o menor trabajo, si la presión no llega al valor deseado durante un tiempo, dará una señal de aviso para que entre en funcionamiento la bomba inactiva.

## **2.4 Controlador**

El controlador es el responsable de procesar la información y lectura de las variables provenientes de los sensores, además lleva acabo el comando de los elementos implementados dentro del sistema. en la actualidad existen diferentes tipos de controladores destinados el control y supervisión del proceso.

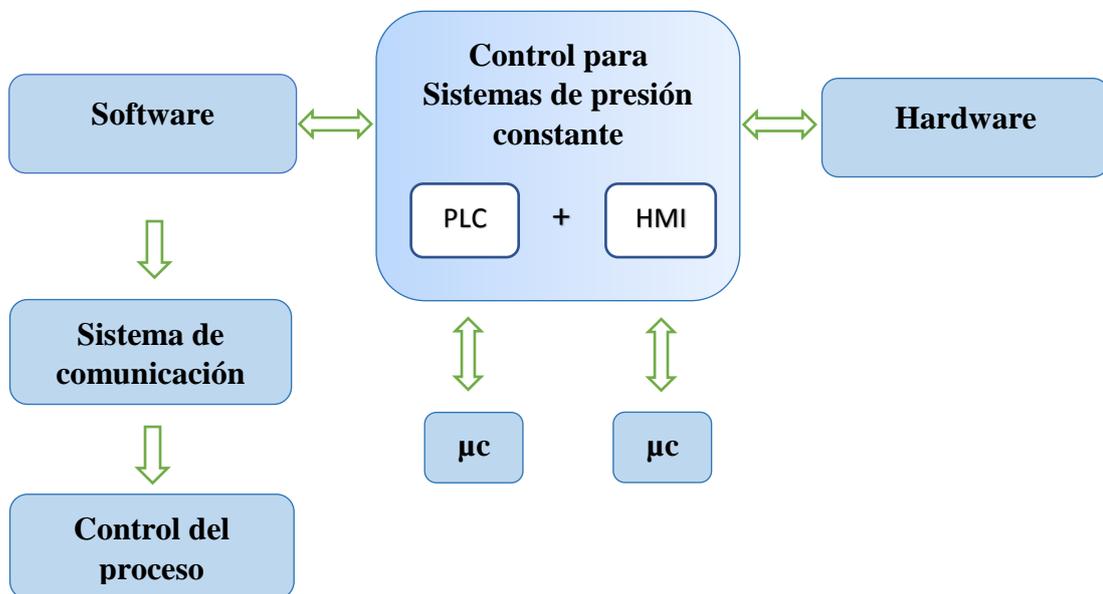
Para realizar el control de sistemas de presión por parte de ACSIMB se implementará el procesador lógico programable MMI CPC02A y una pantalla de tipo TFT la cual realizará las funciones de un interfaz usuario máquina, el dispositivo PLC+HMI permiten por medio de sentencias establecidas monitorear el proceso en busca de un funcionamiento correcto.

## 2.5 Diseño del dispositivo PLC+HMI

En la Figura 2-2 se muestra el esquema hacia el diseño del componente deseado.

Dentro del software se detallará el sistema de comunicación para enlazar ambos dispositivos mediante microcontroladores, así como la etapa de control, rutinas de tiempos, control PID, con el propósito de monitorear sistemas de presión constante para dos bombas moduladoras.

En hardware se diseñará una placa de circuito impreso, en la cual se implementará los elementos necesarios para las lecturas de las salidas y entradas del sistema.



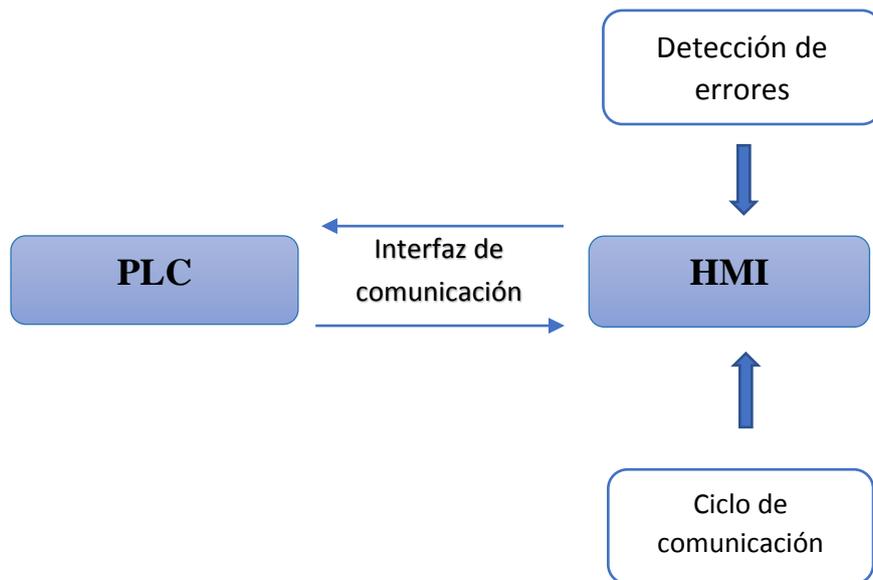
**Figura 2-2:** Diseño del sistema

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.5.1 Diseño del software de comunicación

El sistema de comunicación permitirá intercambiar datos entre PLC y HMI, actualizando así las variables en tiempo real acorde al funcionamiento del proceso.

La recepción y transmisión de la información será efectuado por medio de un periférico de comunicación, el cual permite intercambiar los datos de una manera efectiva y se encuentra en capacidad de detectar tramas invalidas.



**Figura 3-2:** Diagrama de bloques sistema de comunicación

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.5.2 Microcontroladores implementados

En base a la Tabla 1-2, se expone una comparación entre diferentes microcontroladores y las características principales que posee cada uno de estos elementos, es así como se determinó que tipo de familia utilizar

Se analizó parámetro como capacidad de memoria flash, frecuencia de oscilación máxima, la cantidad de pines que posee acorde a las necesidades y costos del microchip.

**Tabla 1-2:** Cuadro comparativo de las características de microcontroladores.

Microcontrolador	Memoria flash	Memoria RAM	Frecuencia de oscilación	Número de pines	Costos
STM32F746 	1 Mb	340 Kb	200 MHz	225	13,25

STM32F411 	512 Kb	128 Kb	100 MHz	100	3,32
MEGA2560 Arduino Mega 	256 Kb	8 Kb	16 MHz	100	37,6
ATMEGA Arduino UNO 	32 Kb	2 Kb	16 MHz	20	3,6

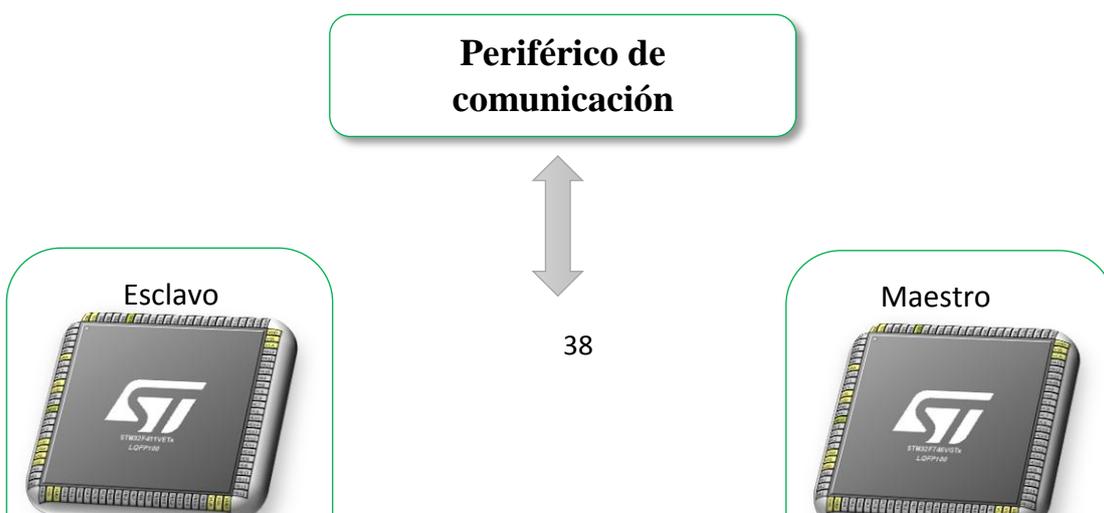
Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Se consideró este tipo de microchips por su gran variedad de aplicaciones dentro de ámbitos industriales y electrónica de consumo.

Son caracterizados por su ahorro energético, gran procesamiento de datos, accesos por DMA, facilidad de modificar sus pines, instrucciones de longitud fija las cuales facilitan la decodificación de sentencias.

### 2.5.3 Componentes del sistema de comunicación

El sistema de comunicación se realizó mediante el enlace entre dos microcontroladores de la familia STM32 con arquitectura ARM, uno de ellos desempeña las funciones de maestro del sistema de comunicación y el otro como esclavo.





**Figura 4-2** Diagrama de bloques comunicación ente microcontroladores

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

#### 2.5.4 Microcontrolador STM32F746 (maestro)



**Figura 5-2** Estructura del microcontrolador STM32F746

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

**Tabla 2-2:** Detalle de las características del microcontrolador STM32F746.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Memoria flash	1 MB (megabyte)
RAM	340 Kb (kilobytes)

Compatible	St-link
Fuente de alimentación	3V– 5V
Máxima frecuencia del CPU	200 MHz
Pines	225
Temporizadores	15

**Realizado por:** ARIAS, Alex 2017

**Fuente:** <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f746ng.html>

El microchip 32F746 de la familia STM, es el dispositivo implementado como manejador de la pantalla de tipo TFT, la cual cumple las funciones de un interfaz hombre máquina (HMI)

Es el encargado de enviar las acciones de mando para el control del sistema de presión, capaz de monitorear las operaciones que se efectúan dentro de la planta.

En base a la HMI en los sistemas de presión constante, se podrá insertar parámetros para la configuración inicial del proceso, editar valores que permitan mejorar el control, conocer el incremento o disminución de cada una de las señales, visualizar el comportamiento de los componentes como las revoluciones por minuto de las bombas de agua, se podrá observar los fallos y alarmas del proceso.

### **2.5.5 Microcontrolador STM32F411 (esclavo)**



La señal de reloj es generada por osciladores que permite al microcontrolador trabajar a una frecuencia específica.

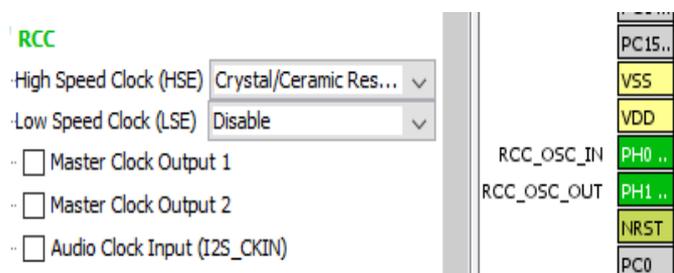
El oscilador interno está constituido por dos osciladores uno de alta frecuencia y el otro de baja frecuencia.

Al asignar entradas del reloj para los microcontroladores, se activan dos pines necesarios para el control del oscilador interno.



**Figura 7-2:** Configuración del oscilador STM32F746

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 8-2:** Configuración del oscilador STM32F411

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

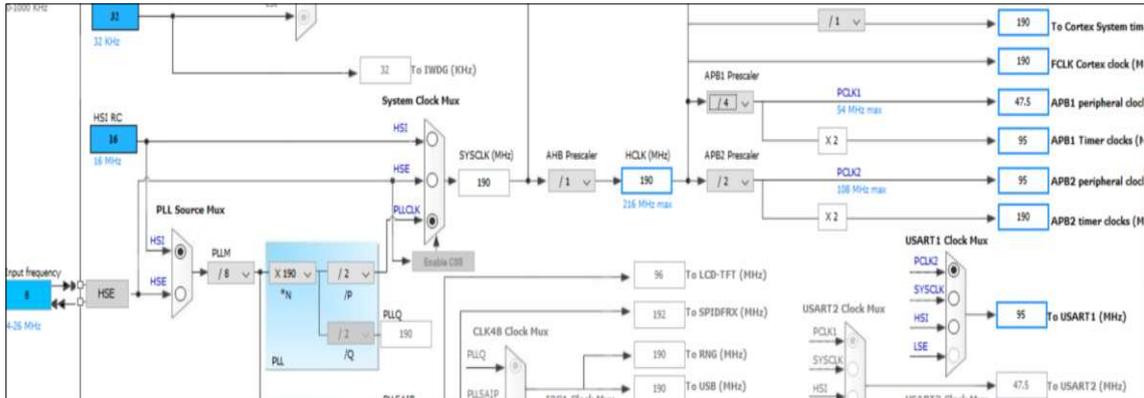
Por medio del software STM32CUBE MX, se ingresa en el ítem configuración del reloj y mediante múltiplos y submúltiplos asignamos la frecuencia a la cual el microchip trabajará.

En el ANEXO A y ANEXO B, se observa el datasheet para la configuración de cada elemento. El microcontrolador STM32F746 está establecido a una frecuencia de 200 MHz y el STM32F411 hasta 100 MHz; al momento de configurar el valor de oscilación se determinó no ocupar la máxima frecuencia; es por esto que se restó un valor de 10MHz a cada componente.

Los valores finales de frecuencia son los siguientes:

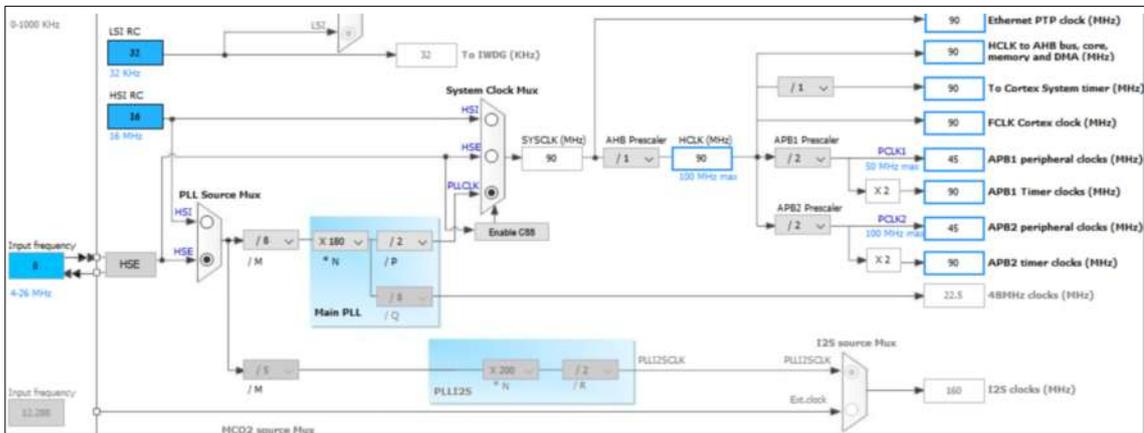
- STM32F746 a 190 MHz

- STM32F411 a 90 MHz



**Figura 9-2:** Configuración del oscilador STM32F746

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 10-2:** Configuración del oscilador STM32F411

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.5.7 Ciclo de comunicación

El ciclo de comunicación, es el intervalo de tiempo el cual se determinó para la ejecución del programa de transferencia de datos.

Se realizó mediante la asignación y configuración de un temporizador en el microcontrolador maestro, con una duración de 100 milisegundos tiempo suficiente para realizar la ejecución de tareas y minimizar errores.

Se adoptó por este intervalo de tiempo ya que la actualización de las variables que percibe el ojo humano y evitar parpadeos en la pantalla.

### 2.5.8 Selección del periférico serial

Para seleccionar el periférico de comunicación, se tomó a consideración los aspectos expuesto en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Descripción de las características para seleccionar periféricos de comunicación.

DESCRIPCIÓN	I2C	SPI	UART
Tipo de comunicación	Sincrónica	Sincrónica	Asincrónica
Designación de pines	SDA SLC	SCLK MOSI MISO SS	TX DX
Velocidad	100kbps 400Kbps 3.4Mbps	10 Mbps a 20 Mbps	230Kbps 460Kbps Casos especiales hasta 6Mbps
Distancia	Bajas	Medianas	Grandes
Complejidad	Mínima	Mediana	Máxima

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Fuente: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/UART-vs-SPI-vs-I2C.html>

Al contar con varios periféricos en serie, se optó por realizar el sistema de comunicación en base al receptor y transmisor asincrónico universal (UART) con características half-dúplex que permita transmitir información en ambas direcciones.

### 2.5.9 Comunicación por UART

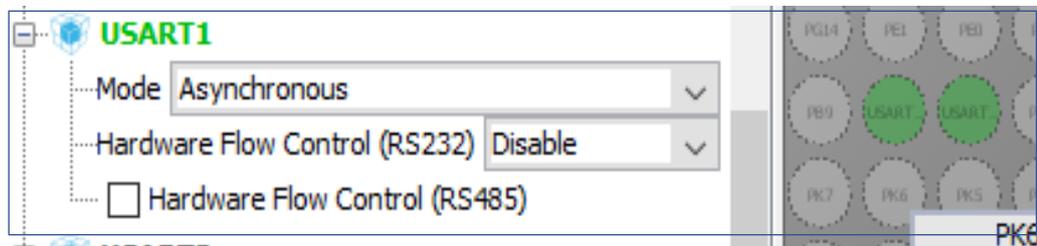
La comunicación serial en forma asíncrona beneficia al sistema transmitiendo los datos en cualquier instante de tiempo, se manipula 8 bits, dentro del tren de datos se asigna a un bit encargado de iniciar el intercambio de información de esta manera sincroniza el reloj, seguida de los bits que completan la trama.

Se consideró las siguientes ventajas que posee el UART.

- Desarrollo de software estandarizados.
- Asignación de pines es menor.
- Su alcance es suficiente para la implementación requerida.
- Al transmitir los datos uno a uno se pierde una cantidad mínima de información, evitando generar errores críticos.
- Permite ahorros económicos en elementos tecnológicos.
- Se desempeña a grandes velocidades

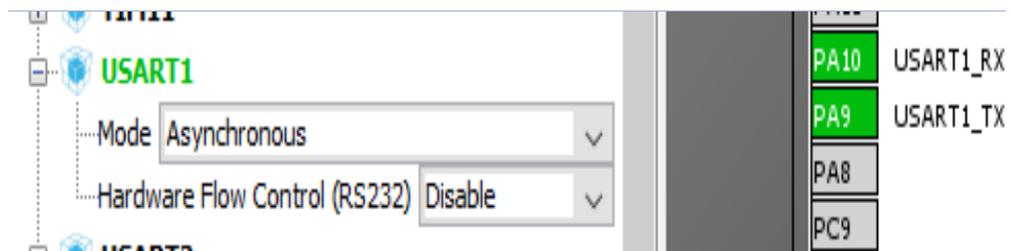
### 2.5.10 Configuración del UART

Se designó los pines que corresponde al periférico USART en modo asincrónico, de esta manera se levantarán los GPIOs de recepción y transmisión para enlazar a los microcontroladores.



**Figura 11-2:** Asignación del UART STM32F746

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 12-2:** Asignación del UART STM32F411

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.5.11 Velocidad de transmisión

La velocidad de transmisión asignada en ambos componentes se configuró a 2.5Mbps/s, a pesar de realizar la comunicación a tan alta velocidad, el traspaso de datos es muy fiable, se estableció una longitud del UART de 8 bits.

Se descartó velocidades superiores ya que a medida que se incrementó el traspaso de bits en relación a tiempos prolongados, se produjo mayores errores, dando así un sistema con datos inválidos los cuales ocasionan riesgos en el proceso.

Basic Parameters	
Baud Rate	2500000 Bits/s
Word Length	8 Bits (including Parity)
Parity	None
Stop Bits	1

**Figura 13-2:** Configuración del periférico UART STM32F746

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Basic Parameters	
Baud Rate	2500000 Bits/s
Word Length	8 Bits (including Parity)
Parity	None
Stop Bits	1

**Figura 14-2:** Configuración del periférico UART STM32F411

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.5.12 Configuración del DMA

Se implementó la transferencia de datos por medio del periférico DMA con el objetivo de mejorar la velocidad de procesamiento de tareas.

El acceso directo a memoria ejecuta el traspaso de información si necesidad de la intervención por parte del CPU, de este modo el procesador se encarga de otras tareas.

DMA Request	Stream	Direction	Priority
USART1_RX	DMA2 Stream 2	Peripheral To Memory	Low
USART1_TX	DMA2 Stream 7	Memory To Peripheral	Low

**Figura 15-2:** Configuración de parámetros DMA STM32F746

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

DMA Request	Stream	Direction	Priority
USART1_RX	DMA2 Stream 2	Peripheral To Memory	Low
USART1 TX	DMA2 Stream 7	Memory To Peripheral	Low

**Figura 16-2:** Configuración de parámetros DMA STM32F411

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

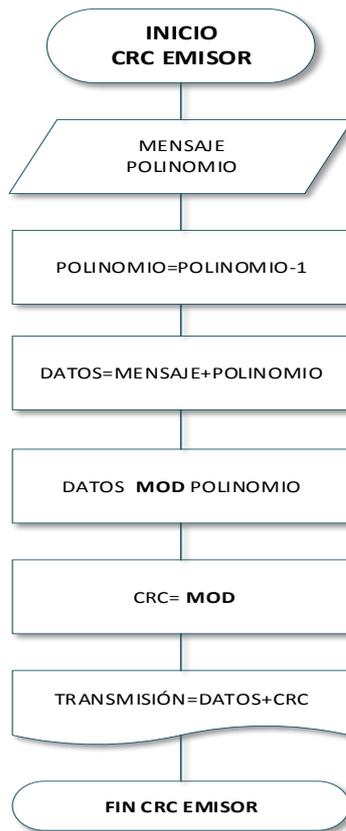
### 2.5.13 *Detección de errores*

La detección de errores es uno de los aspectos fundamentales en una etapa para la transición de información.

En este caso se implementó la verificación de redundancia cíclica (CRC) como método de comprobación para conocer si el contenido de las transmisiones es el correcto.

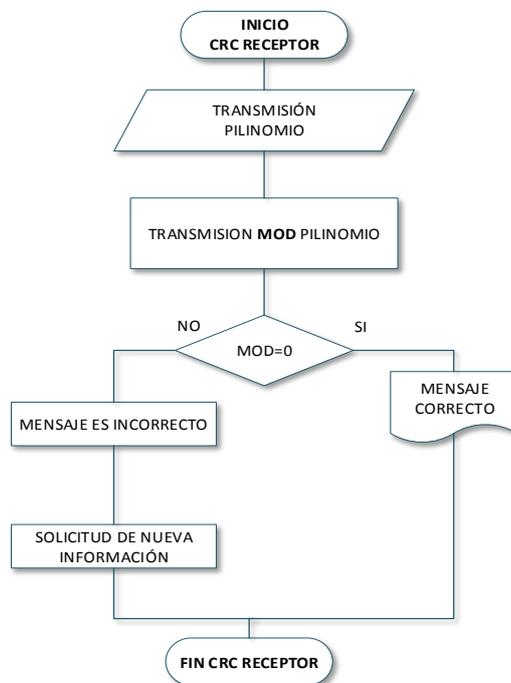
El microcontrolador que hace la labor de maestro, envía la tabla de memoria y espera la respuesta del esclavo basándose en el residuo de una división de polinomio; si no levanta un bit de comprobación, significa que los datos intercomunicados son los correctos.

Se añadió dos bits al final de la trama original y total, a menor tamaño que se implemente el CRC, mejor es el control del procesamiento, si la información que llega al receptor es incorrecta, se levanta una bandera y existe una nueva petición de la unidad de datos.



**Figura 17-2:** Algoritmo CRC (Emisor)

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 18-2:** Algoritmo CRC (Receptor)

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

#### ***2.5.14 Algoritmo de comunicación***

Se diseñó dos algoritmos de programación para la comunicación serial entre los microcontroladores implementados, ya que el trabajo de recepción y emisión de datos son diferentes para cada microchip.

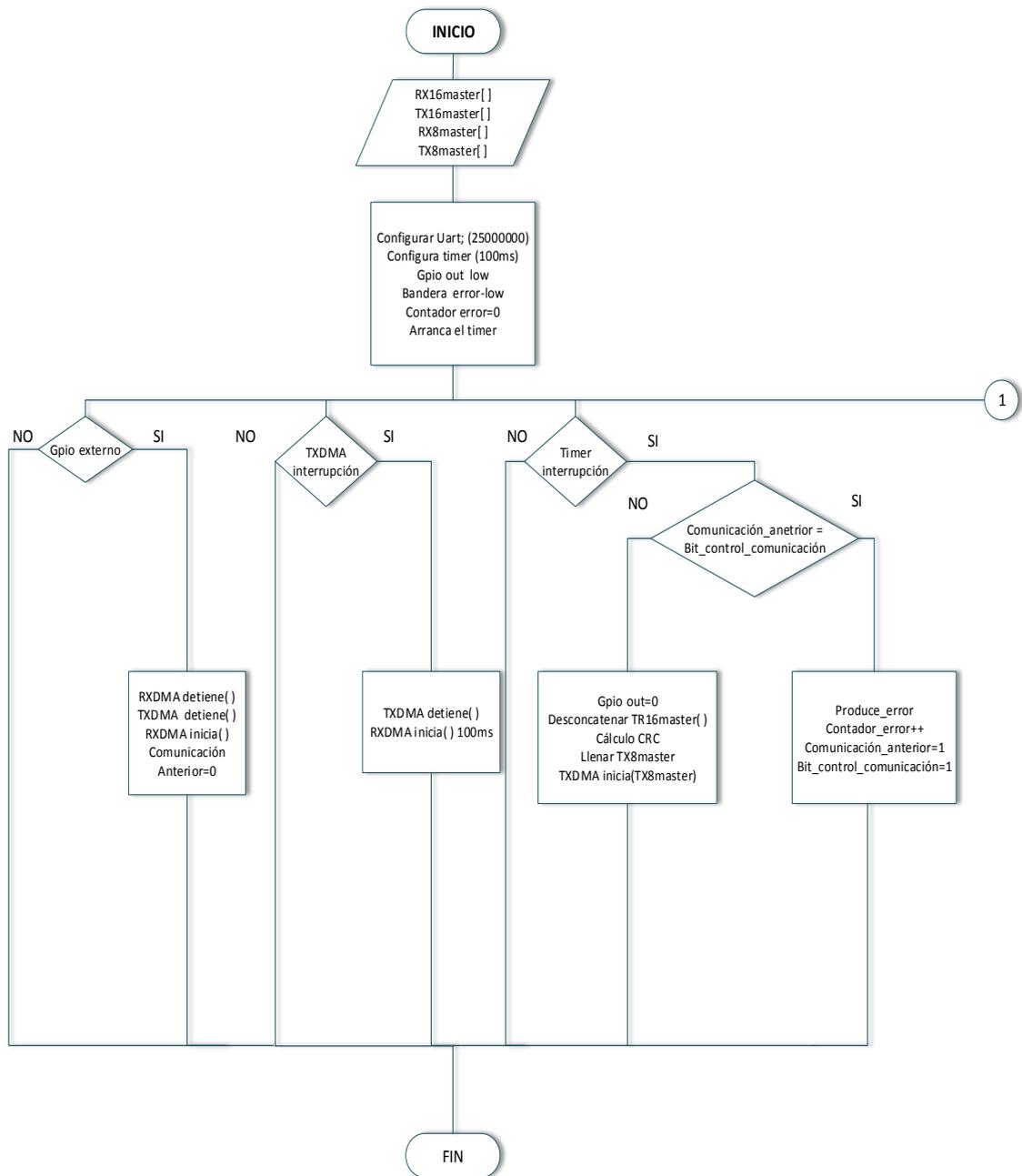
Una vez configurado el UART y timer, se necesita de un GPIO y una bandera para enviar las señales de error que puedan ocurrir.

La trama de datos enviada es de 82 bytes de 16 bits, al emplear la comunicación asincrónica, esta proporciona una transferencia de información en un tren de 8 bits, es por esta razón que se debe concatenar y desconcatenar los vectores de datos mientras circula por el UART y dos bits del CRC.

Todo el proceso para la comunicación está previsto que se efectúe en un lapso de 100 milisegundos.

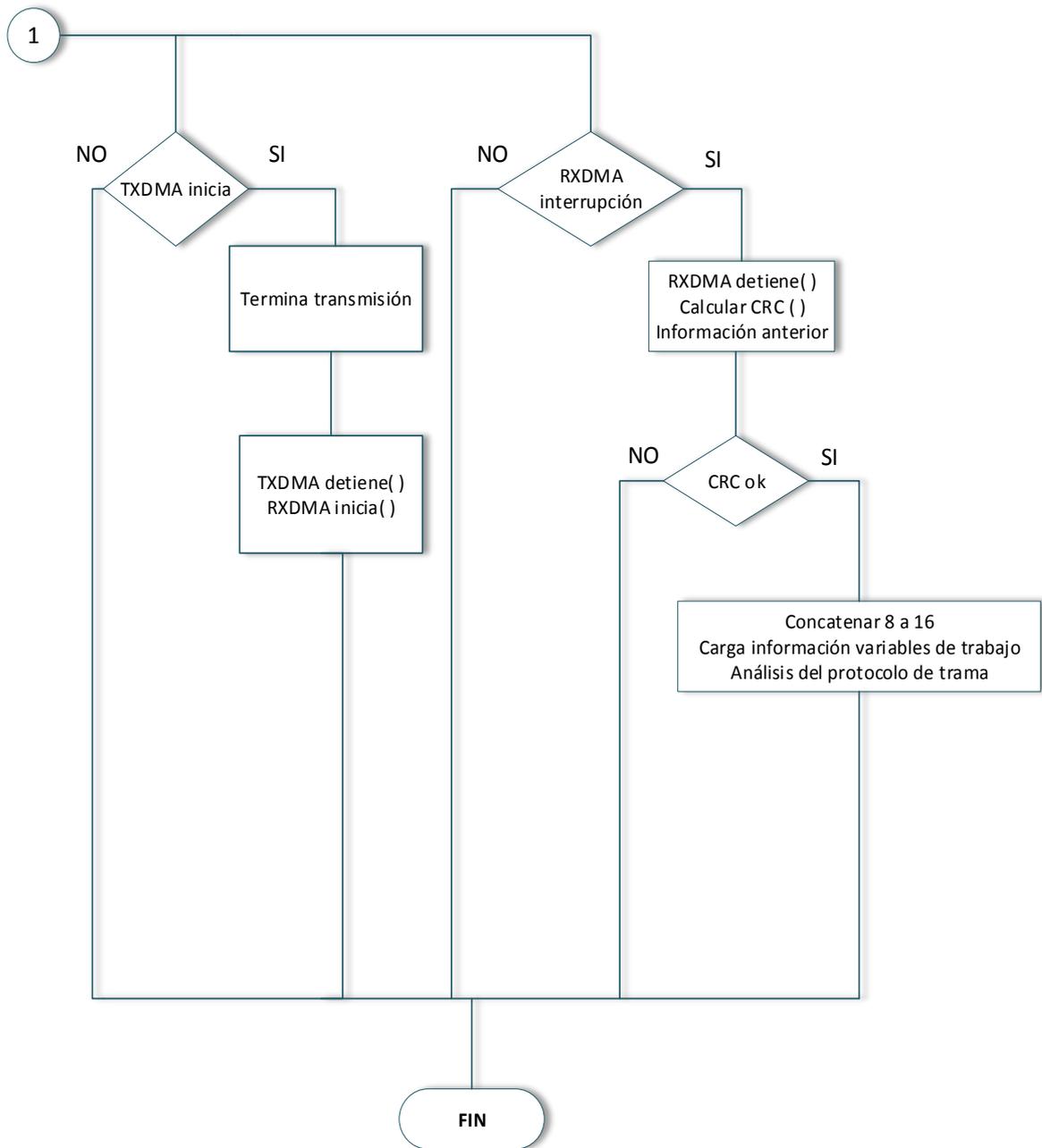
Con la ayuda del control de registro de comunicación CRC, se detecta si en realidad la información cumplió con el ciclo de transmisión y recepción o viceversa.

El desarrollo del flujograma del dispositivo que actuará como maestro (STM32F746) del sistema se observa en la Figura 19-2, Figura 20-2 y Figura 21-2.



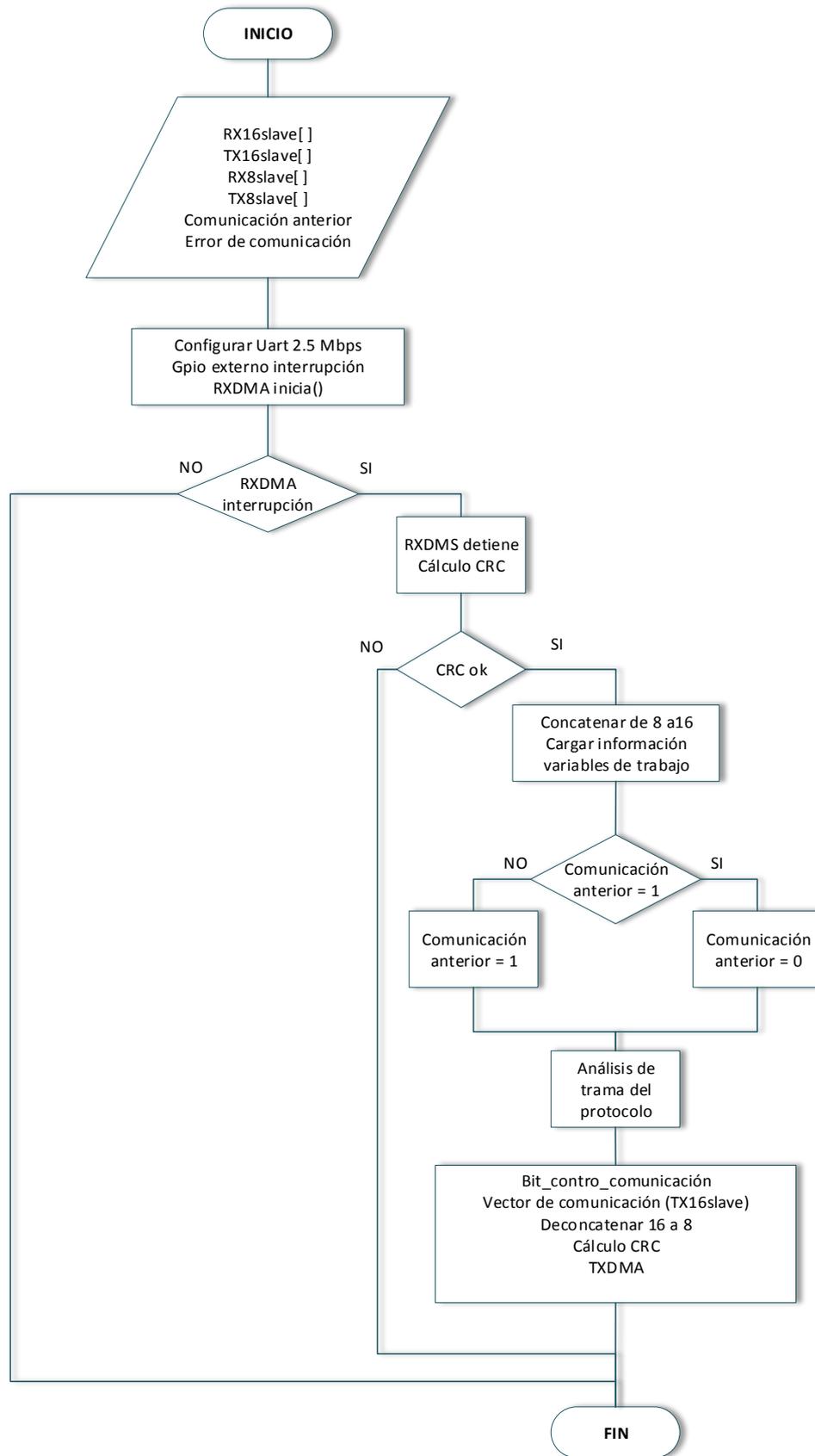
**Figura 19-2:** Algoritmo para la comunicación del microcontrolador maestro

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 20-2:** Continuación del algoritmo para la comunicación del microcontrolador maestro

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



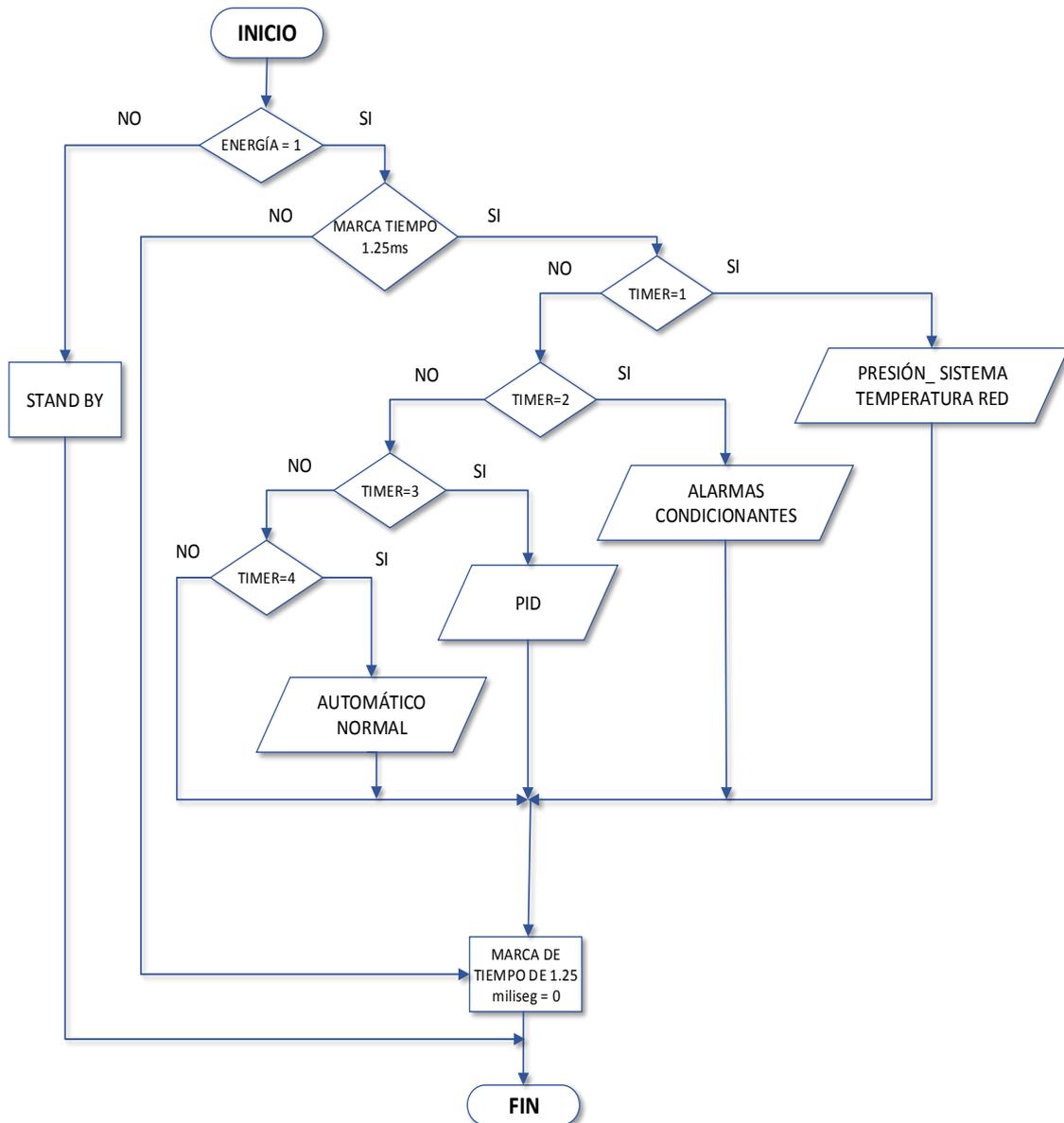
**Figura 21-2:** Algoritmo para la comunicación del microcontrolador esclavo

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

## 2.6 Control por software para sistemas de presión constante

En la Figura 22-2 se observa el diagrama total de control. El ciclo de ejecución del proceso se cumplirá en un lapso de 5ms, periodo en el cual se debe realizar cada una de las subrutinas establecidas.

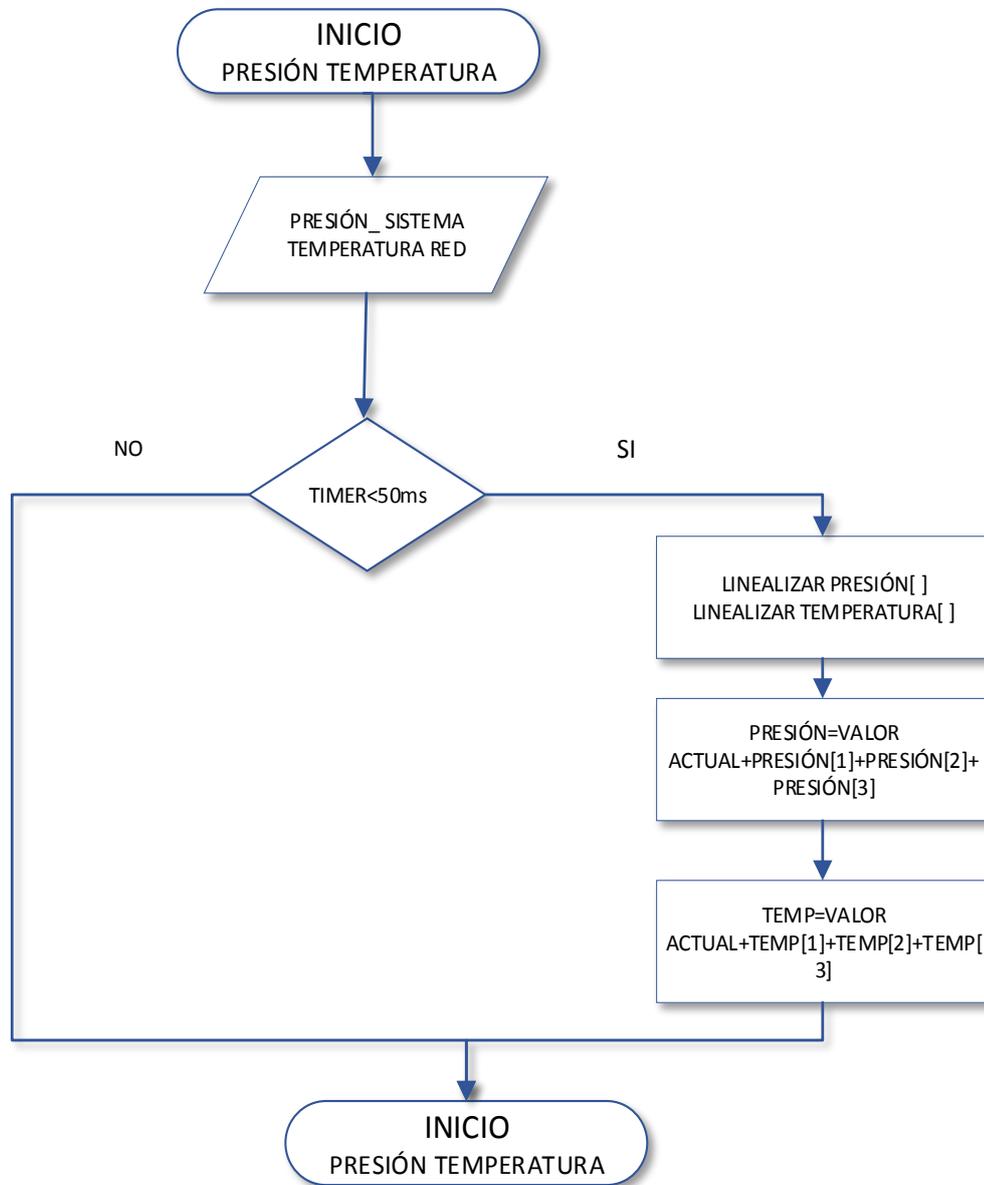
Todas las rutinas del proceso para controlar el sistema de presión, esta almacenado en el microcontrolador STM32F411(esclavo)



**Figura 22-2:** Algoritmo principal de control para el sistema

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.6.1 Linealidad de señales análogas

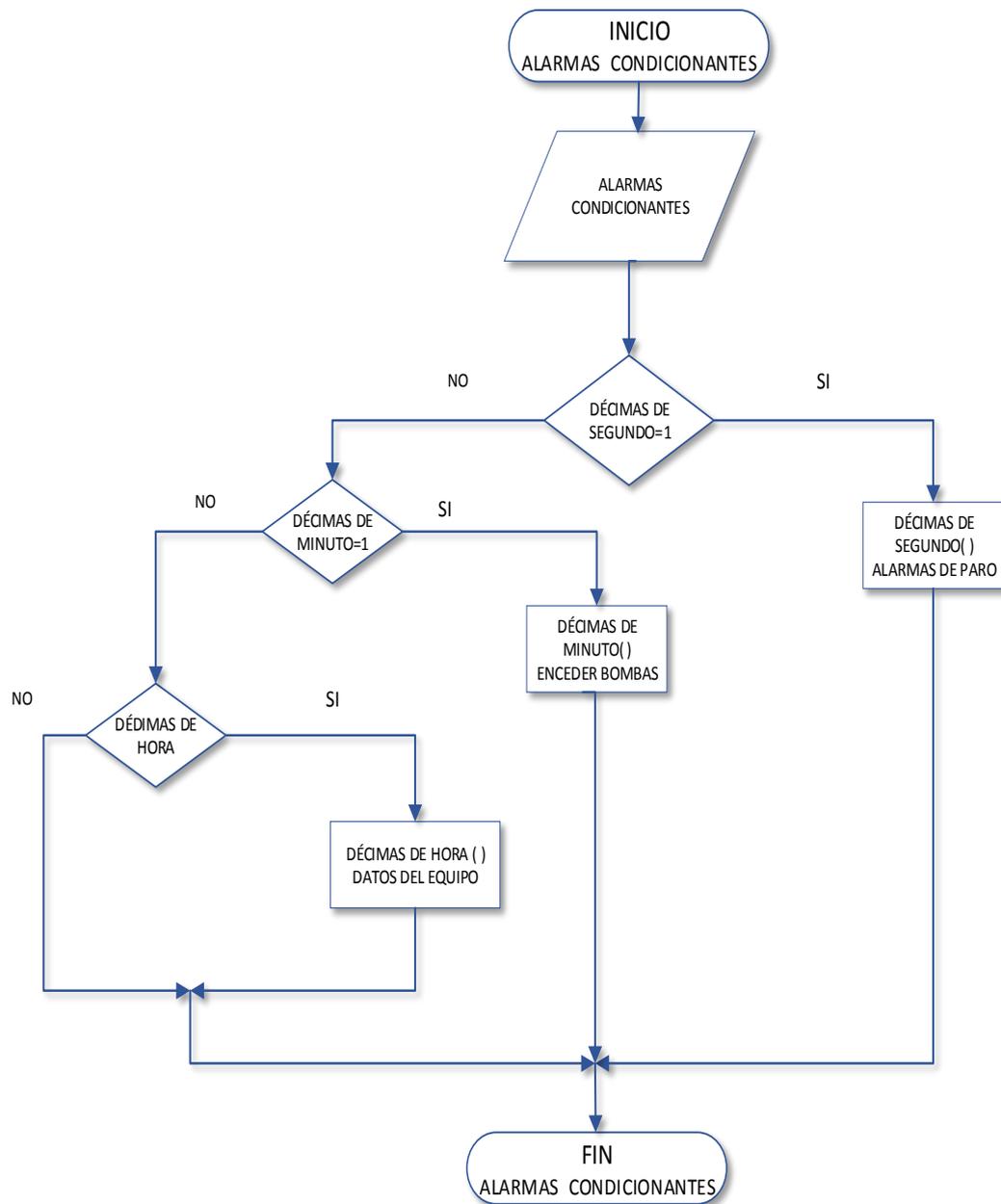


**Figura 23-2:** Algoritmo para control de variables de presión y temperatura.

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.6.2 Alarmas y condicionantes

En la figura 24-2 se hace relevancia al control de tiempos necesarios para cumplir los subprocesos, la longitud de tiempo de cada una de ellas depende de la prioridad asignada.



**Figura 24-2:** Algoritmo de tiempo para alarmas y condicionantes.

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.6.3 Controlador PID

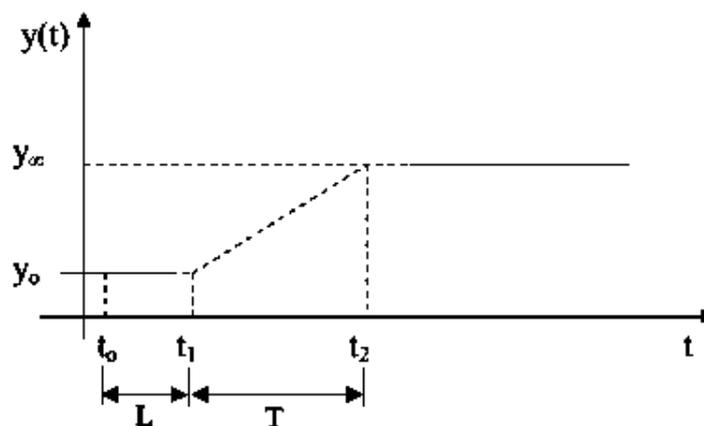
Para realizar el algoritmo que permita configurar el control PID, se consideró que el prototipo en desarrollo PLC+HMI, es un instrumento que será implementado en cualquier industria o residencia, independiente de la infraestructura; es decir que no se conoce el modelo matemático que gobierna al proceso, por esta razón se usó las reglas de sintonía basadas en mediciones hechas sobre la planta real.

Se eligió el método de sintonización de reacción de la curva, establecidas por Ziegler-Nichols el cual permitirá obtener mediante el algoritmo desarrollado los datos del proceso necesarios para implementar el sintonizador.

#### 2.6.3.1 Desarrollo del PID

Para obtener datos que ayuden a solventar el método aplicado, se desarrolló un gradiente, el cual permite elevar la presión en relación al tiempo, creando así una pendiente que ayuda alcanzar un punto de operación normal, el cual es registrado como el nuevo punto de trabajo.

En base a la Figura 25-2, se muestra la forma característica de la respuesta temporal y se podrá obtener valores mínimos y máximos de la pendiente, los cuales ayudan a obtener los parámetros como es la constante de tiempo (T) y el tiempo de retardo (L).



**Figura 25-2:** Forma de la curva característica temporal

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

**Ecuación 1-2:** Cálculo de la pendiente

$$k = \frac{y_{\infty} - y_0}{t_{\infty} - t_0}$$

Mediante la Ecuación 1-2, se encontró la longitud de la pendiente temporal, para utilizar los criterios de Ziegler - Nichols y emplear las fórmulas de la Tabla 1-1 es necesario encontrar las variables L y T en base a la Ecuación 3-2 y Ecuación 4-2

**Ecuación 2-2:** Cálculo tiempo de retardo (L)

$$L = t_1 - t_0$$

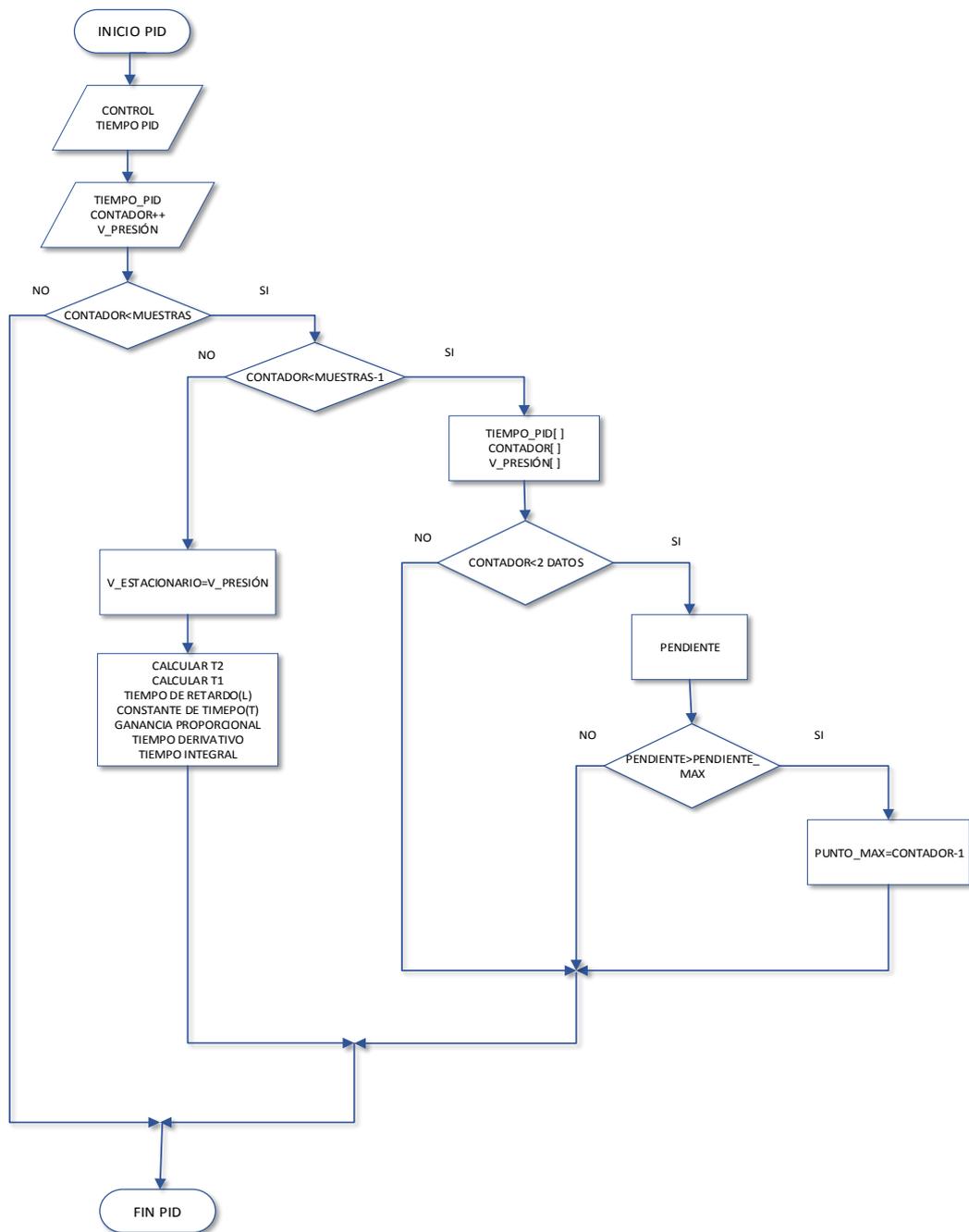
**Ecuación 3-2:** Cálculo constante de tiempo (T)

$$T = t_2 - t_1$$

Para adquirir los parámetros que permiten realizar el PID, se utilizó las fórmulas mostradas en la Tabla 1-1.

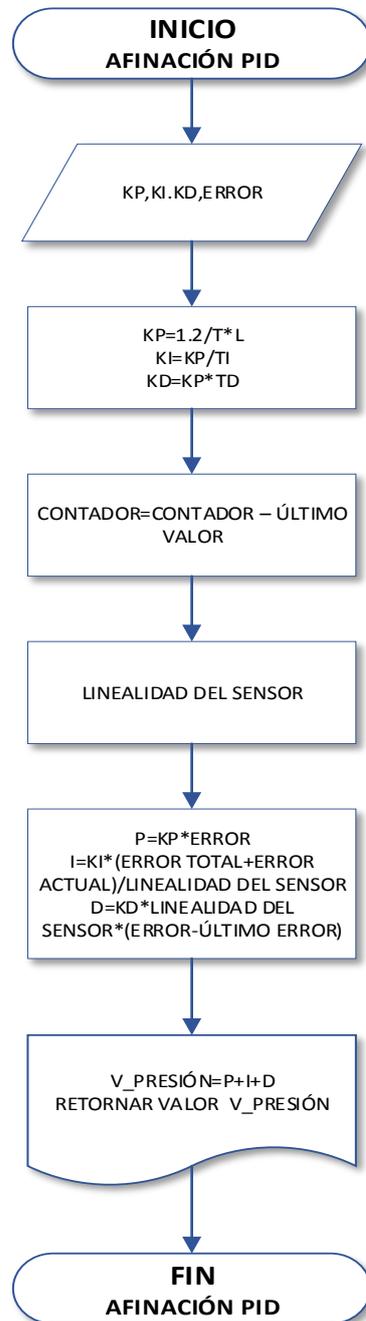
Por lo tanto el dispositivo realiza una auto sintonía, una vez alcanzado el valor para la respuesta transitoria se inicia con el cálculo de los datos  $K_p, T_i, T_d$ , que posteriormente por medio de la HMI y dependiendo el comportamiento del sistema puede ser editado y afinado.

A continuación, se detalla el algoritmo de control utilizado para el cálculo del sintonizador PID.



**Figura 26-2:** Algoritmo controlador PID

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

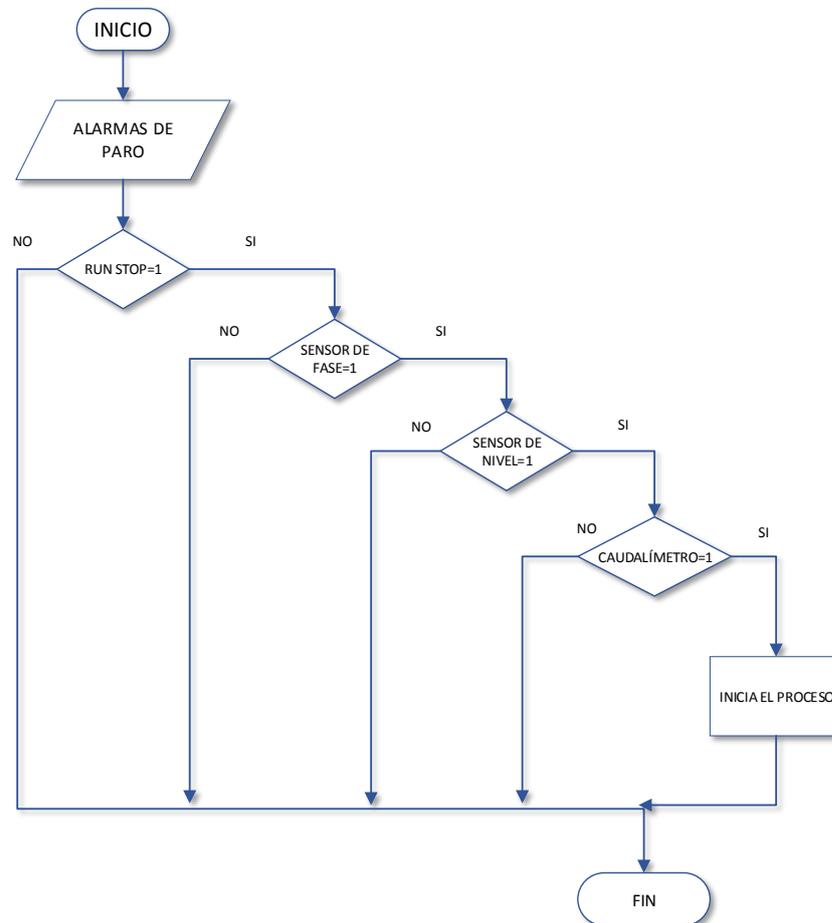


**Figura 27-2:** Algoritmo para afinar el PID

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

#### 2.6.4 Modo automático y manual

Dentro del programa, se estableció condicionantes sin las cuales el sistema no ingresa a las rutinas de funcionamiento, en la Figura 27.2, se observa el flujograma del procedimiento a seguir; estos parámetros son críticos; los cuales producirán alarmas de detención al sistema.



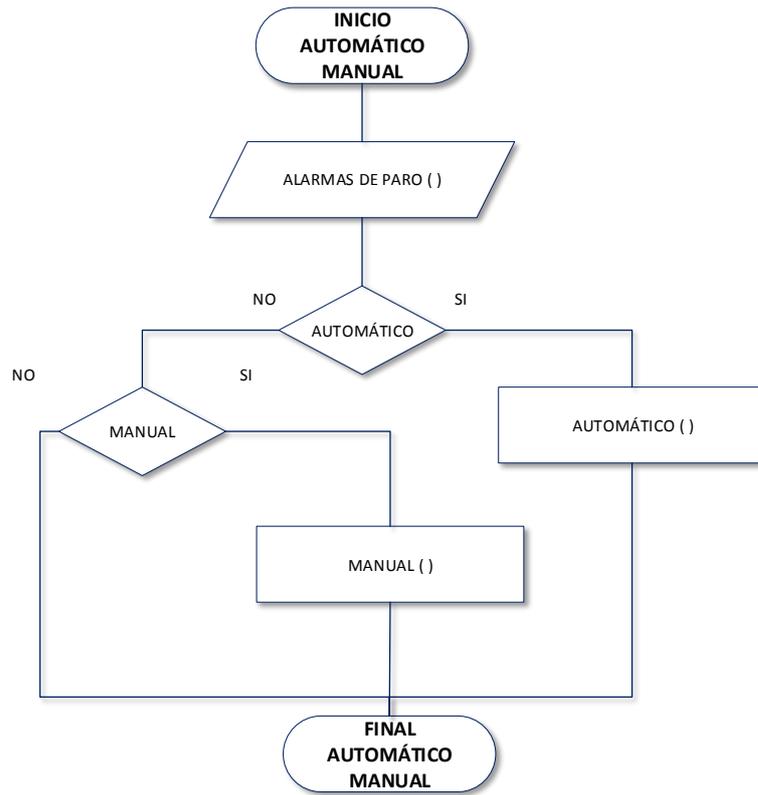
**Figura 28-2:** Algoritmo de las condicionantes del proceso automático-manual

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

- Modo automático

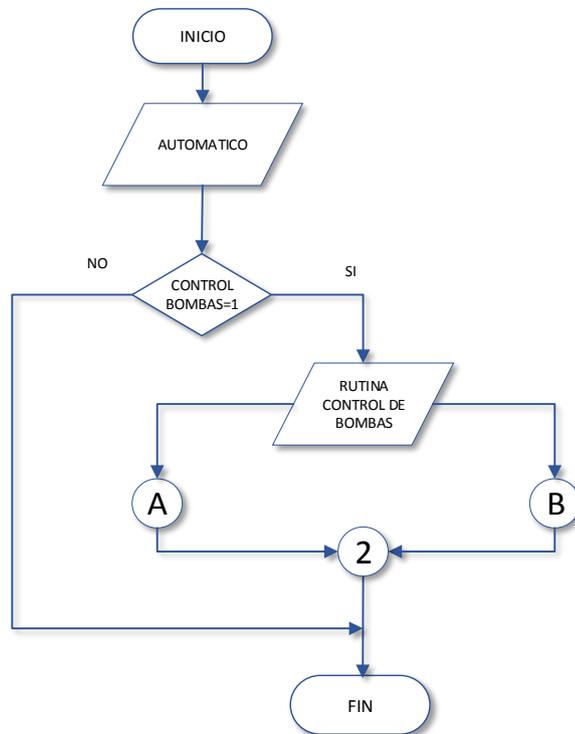
La rutina del proceso en modo automático, permite la alternancia de bombas durante un tiempo establecido a una presión determinada.

Si la bomba activa no llega a cumplir con la generación de agua pedida, entrará en funcionamiento aquella que estaba en estado inactivo; de esta forma se llega a cumplir con la demanda de flujo.



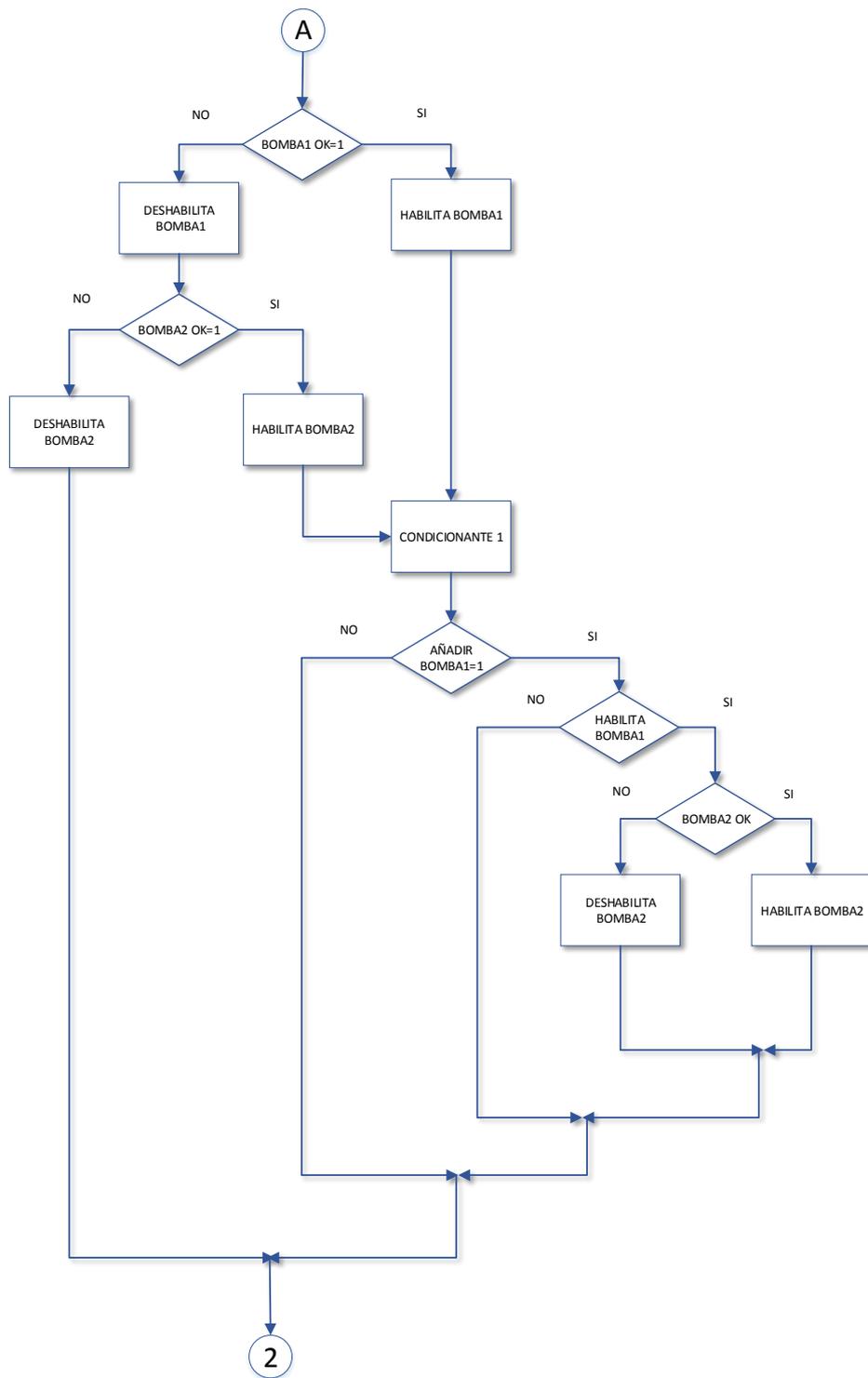
**Figura 29-2:** Algoritmo de selección automático-manual

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



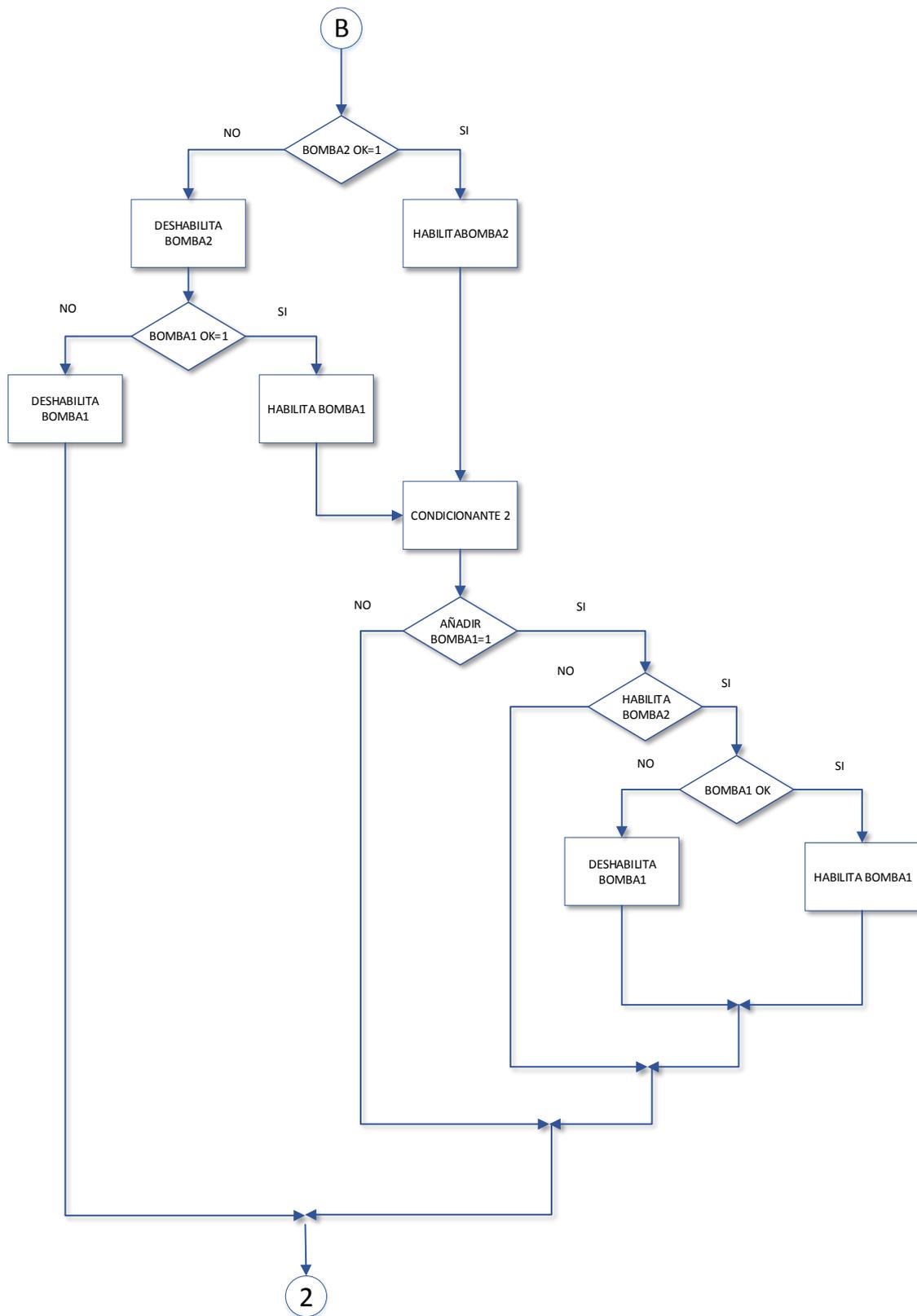
**Figura 30-2:** Algoritmo del modo automático

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 31-2:** Algoritmo para accionar la Bomba 1 como piloto

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

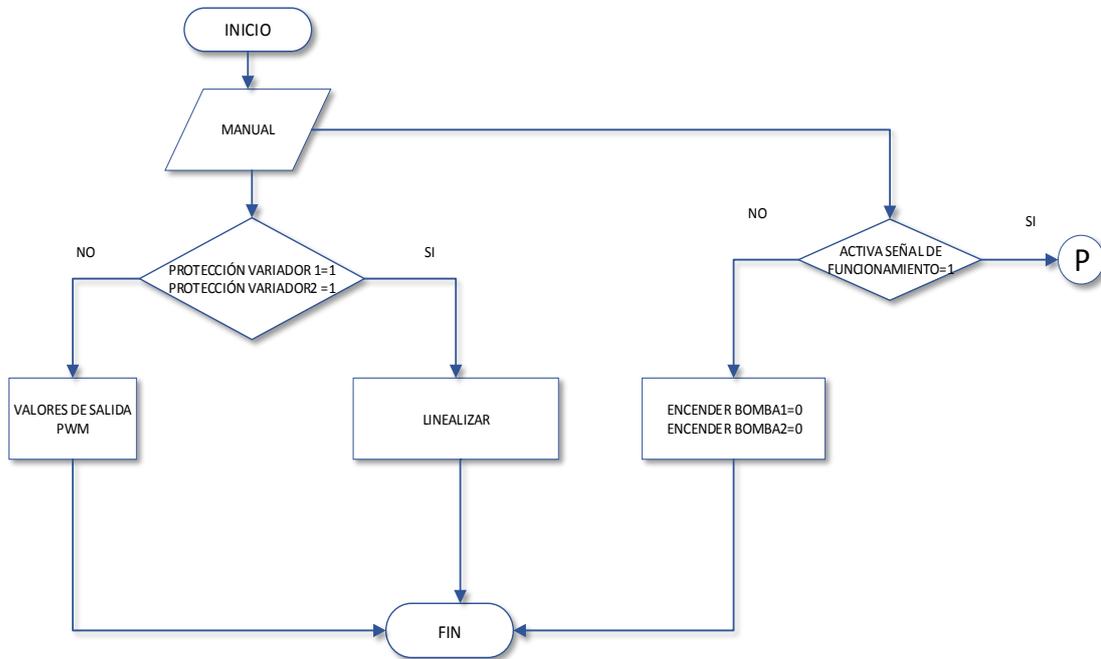


**Figura 32-2:** Algoritmo para accionar la Bomba 2 como piloto

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

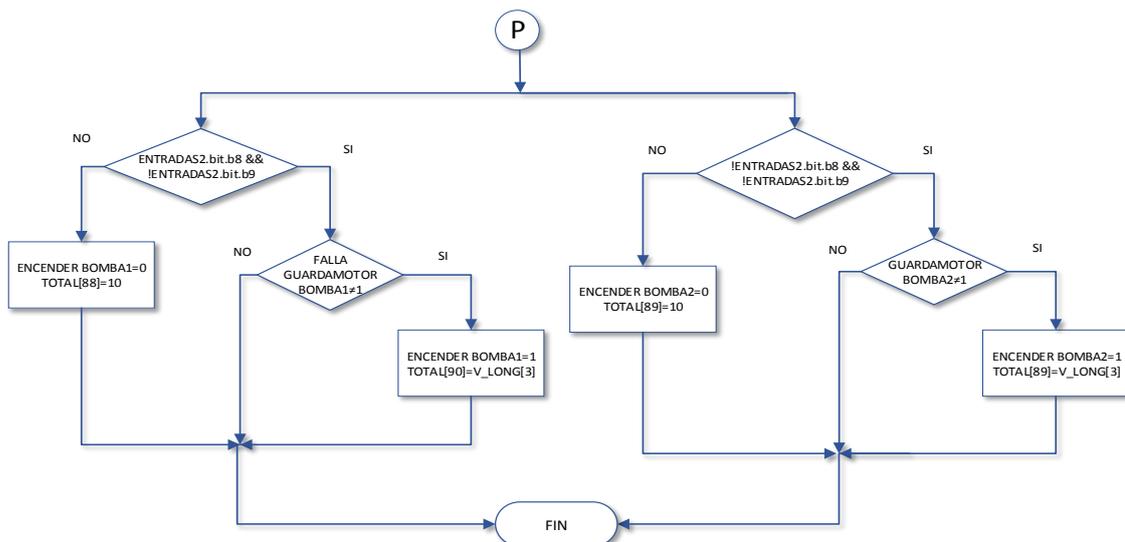
- Modo manual

Dentro del control del proceso se creó una etapa con la cual el sistema ingresará al modo manual; se consideró este estado como solución al mantenimiento que se desee realizar a los componentes del sistema o a su vez por alguna alarma de crítica que pueda ocurrir.



**Figura 33-2:** Esquema 1 del control manual

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 34-2:** Esquema 2 del control manual

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

## 2.7 Diseño del Hardware

Dentro de los aspectos del hardware se implementó una placa electrónica de circuito impreso en la cual se encuentran los elementos necesarios para el intercambio de información por medio de los dos microcontroladores

Se diseñó los circuitos que permiten controlar las señales de entrada y salida destinadas a los sistemas de presión.

Entre las características del dispositivo predominan sus entradas y salidas detalladas en la Tabla 5-2.

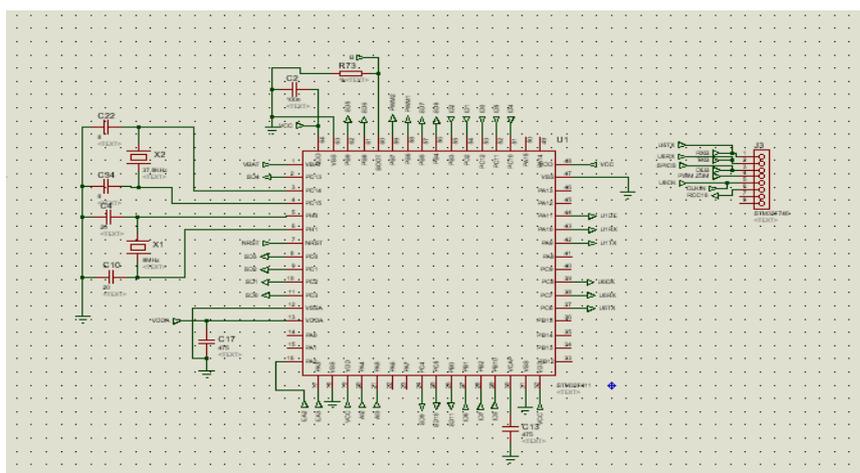
**Tabla 5-2:** Características del dispositivo PLC+HMI

DESCRIPCIÓN	VALOR
POTENCIA	24 VDC 750mA (CPU) 18W
ENTRADAS:	12 DIGITALES (24 VDC )
	4 ANÁLOGAS (12 BITS)
SALIDAS	12 DIGITALES (24 VDC) 6 relé, 6 transistor
	2 ANÁLOGAS (12 BITS)

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.7.1 CPU

El microcontrolador que efectúa las veces de esclavo del sistema es quien albergará la etapa para el proceso y donde se asignará las entradas y salidas de control, además los pines que permiten emitir y recibir datos de la comunicación.

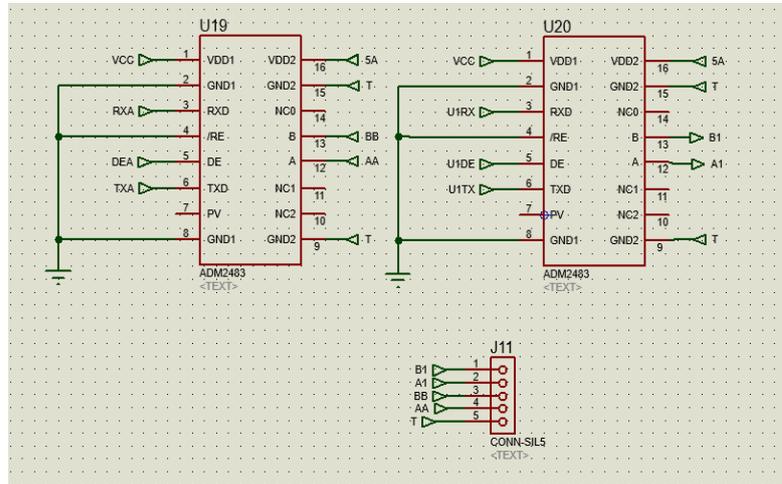


**Figura 35-2:** Diseño del CPU

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.7.2 Comunicación

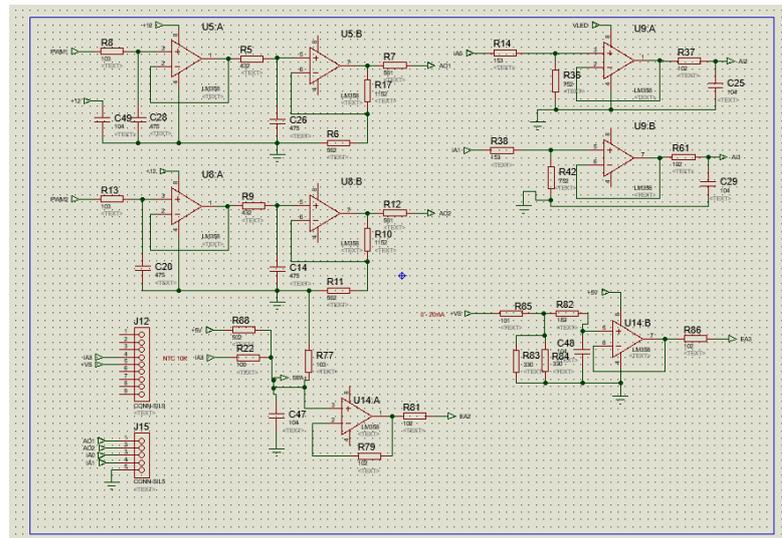
Las comunicaciones serán realizadas mediante el circuito integrado ADM2488. Es un elemento el cual permite transmitir y recibir datos al mismo, es decir que presenta características Half Duplex.



**Figura 36-2:** Asignación de comunicaciones

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

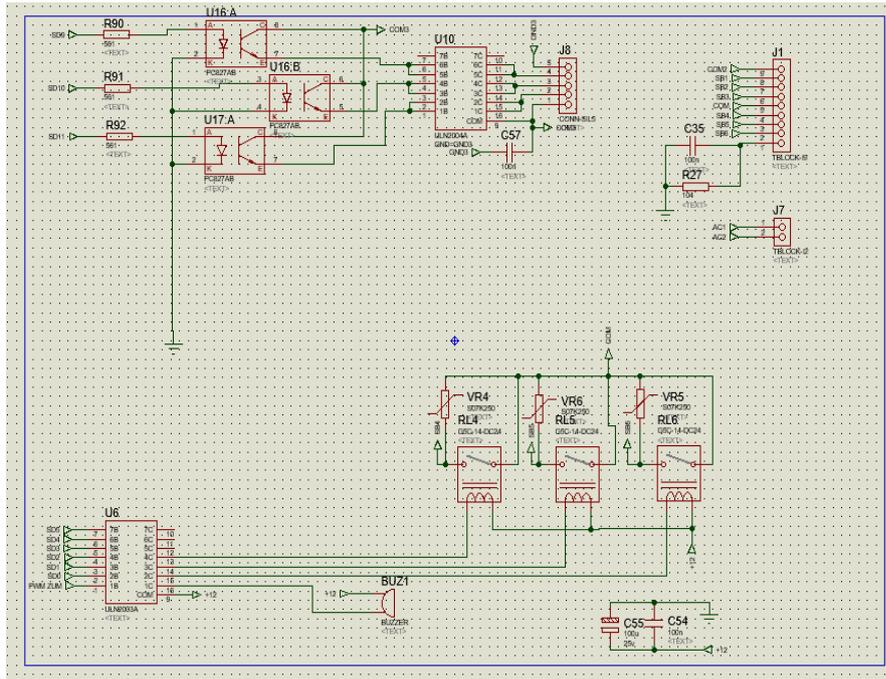
### 2.7.3 Señales analógicas



**Figura 37-2:** Diseño de Señales analógicas

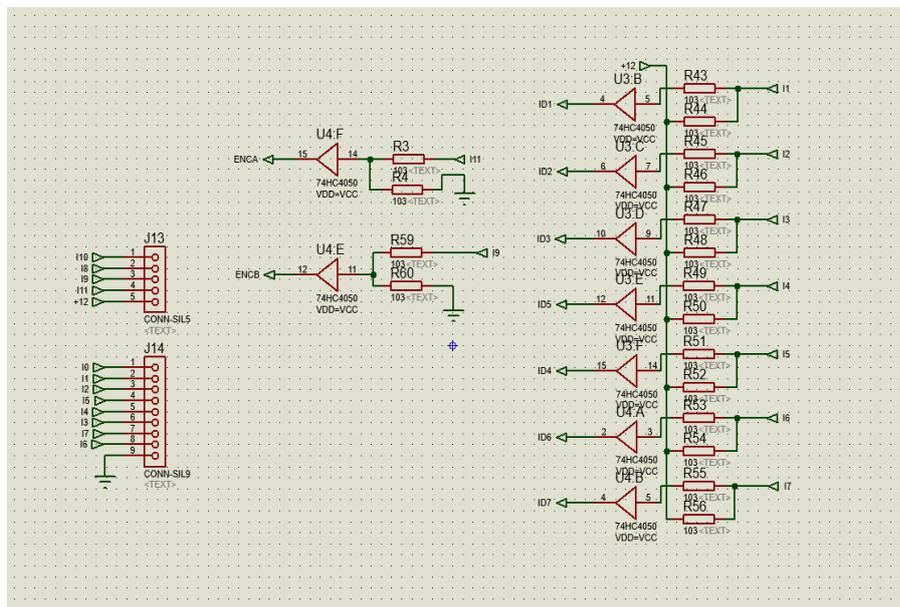
Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.7.4 Señales digitales



**Figura 38-2:** Diseño salidas digitales

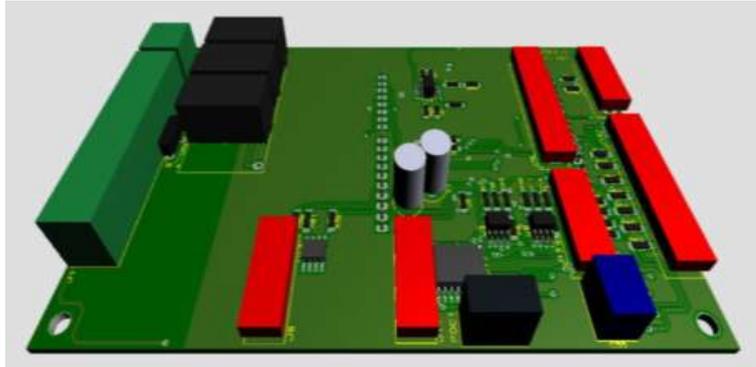
Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Figura 39-2:** Diseño de entradas digitales

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 2.7.5 Placa resultante



**Figura 40-2:** Visión en 3D de la placa de desarrollo (capa superior)

Fuente: ACSIMB,2017



**Figura 41-2:** Visión en 3D de la placa de desarrollo (capa inferior)

Fuente: ACSIMB,2017

### CAPÍTULO III

### 3 MARCO DE RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Análisis del sistema implementado

En el presente capítulo se indicará los resultados adquiridos posteriores a la implementación del sistema de comunicación tanto software como hardware y de las lecturas de la variable de control frente al sensor, los datos recabados fueron obtenidos mediante pruebas de campo.

##### 3.1.1 Variable de control (linealidad)

Para realizar la comprobación de la respuesta de la señal de presión, se colocó un transductor de 150 PSI; los datos recabados se visualizan en la Tabla 1-3; se consideró rangos de 4 mA para realizar la obtención de la información.

A medida que se aumenta el valor de la señal análoga para el control de la variable presión de igual forma incrementa las lecturas arrojadas por el sensor y visualizadas en el manómetro; dando una linealidad de la variable

**Tabla 1-3:** Respuesta de presión frente a la señal de corriente

<b>mA</b>	<b>PSI</b>
4 mA	0 PSI
8 mA	41 PSI
12 mA	59 PSI
16 mA	92 PSI
20 mA	149 PSI

Realizado por: ARIAS, Alex 2017



**Gráfico 1-3:** Respuesta de la señal de control

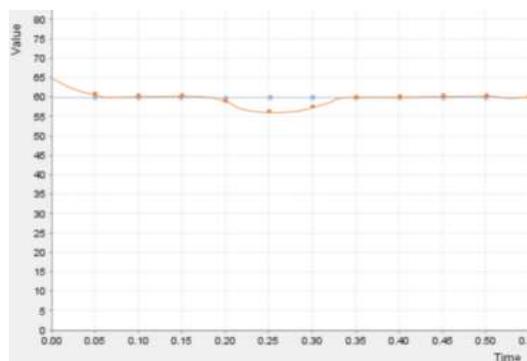
Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Por medio de los datos recabados, se demuestra una respuesta lineal de la señal de control, la variación de presión establece un error de  $\pm 2\%$  de diferencia en las lecturas; por lo cual existirá un buen comportamiento del sistema.

### 3.1.2 Respuesta del controlador PID

Para analizar los resultados que produce el controlador PID dentro del proceso, se estableció 60 PSI como valor con el cual el sistema funcionará; se produjo perturbaciones equivalentes al 5% para de esta forma alterar la estabilidad en niveles superiores e inferiores al valor fijado.

Mediante la herramienta STM Studio se logró visualizar las señales de la variable presión en un intervalo de tiempo; donde, la señal azul es aquella que el sistema debe seguir de forma constante para otorgar la presión deseada; la señal apreciada con color rojo es propia de la planta; claramente se evidencia las variaciones ocasionadas por los efectos externos al proceso y una estabilidad rápida al valor seteado.



**Gráfico 2-3:** Respuesta del controlador PID

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 3.1.3 Comunicación binaria serial

Al analizar dos modos de transmisión de datos (serie y paralelo); se optó por la comunicación en modo serial por necesitar pocos hilos para transmitir datos y existir mayores niveles de estandarización.

La falencia de este tipo de transferencia es la velocidad; sin embargo, con la utilización de microcontroladores STM32, se consiguió traspasar los datos a una velocidad de 2.5Mbytes; a pesar de procesar los datos a tan alta velocidad, el error es mínimo en un porcentaje de 1%.

### 3.1.4 Variación transmisión en base a la velocidad

Se efectuó cambios en el software de comunicación para determinar que se logró una transferencia de datos de alta confiabilidad entre ambos dispositivos, se minimizó el error del mensaje permitiendo entregar un solo dispositivo PLC+HMI.

Al realizar variaciones en la velocidad de transmisión, se generan mayores errores en el traspaso de datos.

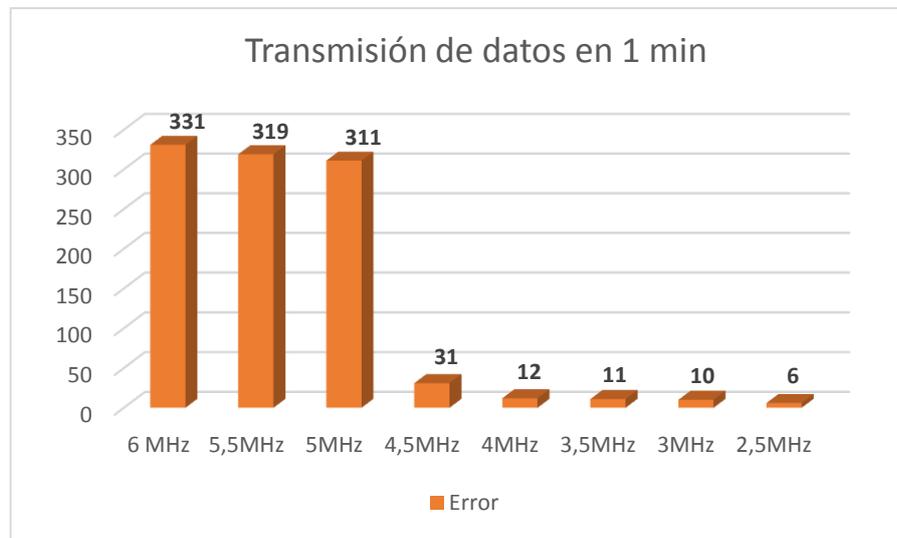
Para determinar que la velocidad implementada es la adecuada se realizó una tabla comparativa de los datos transmitidos en el lapso de un minuto y la cantidad de errores que se producen por medio de modificaciones en MHz.

**Tabla 2-3:** Variación de la velocidad de transmisión y errores generados

Velocidad	Información (datos)	Error (datos)
6 MHz	608	331
5,5MHz	608	319
5MHz	608	311
4,5MHz	608	31
4MHz	608	12
3,5MHz	608	11
3MHz	608	10
2.5MHz	608	6

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Los datos recolectados en la Tabla 2-3 se pueden visualizar de mejor manera en el Gráfico 1-3.



**Gráfico 3-3:** Transmisión de información y errores

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

El valor porcentual de la información incorrecta al modificar los valores de velocidad se muestra en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3:** Velocidad de transmisión y error porcentual

Velocidad	Error %
6 MHz	54,44
5,5MHz	52,46
5MHz	51,15
4,5MHz	5,09
4MHz	1,97
3,5MHz	1,8
3MHz	1,6
2.5MHz	0,98

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

La representación de los datos obtenidos en la Tabla 3-3 se observa en el Grafico 4-3. donde se evidencia claramente el nivel de error que acarrea elevar la velocidad de transmisión.



**Gráfico 4-3:** Error porcentual de datos

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

De 608 datos procesados se obtuvo 6 errores, dando un porcentaje menor al 1% de mensajes inválidos dentro del procesamiento de la información.

### 3.1.5 *Datos válidos durante una transmisión*

Para comprobar si la implementación del sistema de comunicación PLC+HMI en realidad realiza un trabajo confiable, se realizó pruebas de campo donde se adquirió muestras de los errores generados durante 30 minutos en intervalos de 2 minutos.

Con los datos validos se procede a emplear herramientas estadísticas, en esta ocasión a obtener un número de datos menor a 50 se lo hará mediante el test de Shapiro-Wilk, de esta forma determina si los datos obtenidos siguen una distribución normal y son válidos para el análisis.

**Tabla 4-3:** Datos transmitidos durante 30 minutos

Tiempo min	Datos transmitidos	Errores
2	1216	12
4	2432	24
6	3649	36
8	4864	49
10	6076	61
12	7296	72
14	8515	84
16	9727	96
18	10944	108
20	12160	120
22	13381	132
24	14592	143
26	15808	156
28	17022	169
30	18239	184

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Planteamiento de la hipótesis

- Ho: los datos inválidos siguen una distribución normal
- Ha: los datos inválidos siguen una distribución normal

Se consideró un nivel de significancia de 5%

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DATOS TRANSPORTADOS	,082	15	,200 <sup>*</sup>	,964	15	,754

**Figura 1-3:** Prueba para normalidad de datos mediante SPSS

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

Al considerar datos menores a 50, se procede a la implementación del estadístico de Shapiro-Wilk; mediante la Figura 1-3, se deduce que la probabilidad 0.754 es mayor al nivel de significancia 0.05, por lo tanto, los datos recabados siguen una distribución normal aprobando la hipótesis nula.

- Determinación del estadístico de prueba de la T de Student mediante SPSS

#### Descriptivos

			Estadístico	Error típ.
DATOS TRANSPORTADOS	Media		9728,07	1404,116
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	6716,54	
		Límite superior	12739,60	
	Media recortada al 5%		9728,13	
	Mediana		9727,00	
	Varianza		29573124,07	
	Desv. típ.		5438,118	
	Mínimo		1216	
	Máximo		18239	
	Rango		17023	
	Amplitud intercuartil		9728	
	Asimetría		,000	,580
	Curtosis		-1,201	1,121

**Figura 2-3:** Datos descriptivos mediante SPSS.

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

### 3.1.6 Planteo de la hipótesis

$H_0 > 200$ , los datos transmitidos inválidos son mayor a 200

$H_a < 200$ , los datos transmitidos inválidos son menor a 200

- Se trabajará con una confiabilidad del 95 % por tal motivo el nivel de significancia es de  $\alpha = 0.05$

Para obtener resultados mediante T Student, se necesitará de los valores obtenidos de media y desviación estándar recabados en la Figura 2-3.

### Ecuación 1-3: Fórmula de T de Student

$$t_{n-1} = \frac{X - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

**X:** Media

**S:** Desviación estándar

**N:** Tamaño de muestra



**Figura 3-3:** Representación de resultados mediante T Student (SAIE)

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

#### 3.1.7 Decisión

Se rechaza la hipótesis nula, es decir, que la información inválida no debe exceder 200 datos por lo tanto la velocidad de comunicación no debe ser mayor a 2.5MHz, ya que  $t_{prueba} < t_{tabla\ t\ students}$

Concluyendo que la precisión del sistema de comunicación al traspasar los datos no debe sobrepasar 200 datos erróneos en un lapso de 30 minutos, se afirma que el sistema implementado es estable a un nivel de significancia de 0.05.

### **3.2 Análisis y resultados obtenidos**

#### **¿El desarrollo de un sistema hardware/software de comunicación entre PLC-HMI permitirá encontrar un gran desempeño del algoritmo de control?**

Una vez implementado el sistema hardware/software de comunicación entre PLC+HMI, el traspaso de la información correcta entre ambos dispositivos ayuda a mejorar el desempeño del proceso mediante el envío y recepción de los datos en tiempo real.

La información visualizada a través del HMI, otorga facilidades al usuario u operador de conocer alarmas o cambios en el sistema eventuales; si los avisos no son en el tiempo oportuno, se tendría como resultado una falla total de la planta.

#### **¿Qué circuito de acondicionamiento permitirá la medición de la variable de control y manipulación?**

El acondicionamiento de la señal está diseñado para que se entre al microcontrolador valores de voltaje de 3.3 V.

Para controlar y manipular la variable principal del sistema que es la presión, se realizó un circuito el cual ayuda a operar las señales existentes. Mediante el circuito expuesto en la Figura 35-2, se establece un rango de 4-20 mA como señal para determinar la variable principal, si se coloca un sensor de 0 a 150 PSI, se asume que el valor de referencia 4mA equivalente al nivel más bajo del sensor y su valor máximo en la señal será 150 PSI.

Como está constituido el circuito otorga seguridad ante transientes que podrían dañar el funcionamiento del sistema, los filtros acoplados en el circuito impedirán un desperfecto del dispositivo.

#### **¿El presente trabajo facilitará obtener los parámetros del controlador sintonizado bajo un método clásico de modelo matemático?**

El controlador PID usado dio gran desenvolvimiento al sistema en comparación con el anterior.

Al desconocer el lugar donde será instalado el sistema de presión contante (función de transferencia) se añadió al proceso un controlador PID basado en el método de Ziegler-Nichols.

El controlador implementado dio mejor respuesta al sistema, el tiempo para realizar el cálculo de los parámetros y estabilizar al proceso se realiza en un lapso de 400 milisegundos, si el tiempo de SCAN es de 5 milisegundos, estamos obteniendo un nuevo procesamiento de datos

cada 20 vueltas del programa; siendo un tiempo suficiente para automatizar el sistema sin correr riesgos de sobrepresión.

**¿La factibilidad de uso de una pantalla de tipo TFT implementada sobre el controlador MMI-CPC02A permitirá el desarrollo eficiente de un sistema de control?**

La implementación de una pantalla de tipo TFT sobre el controlador MMI-CPC02A, permitió mejorar el funcionamiento del sistema.

La pantalla actúa como un HMI de esta forma se facilitó la supervisión del proceso obteniendo datos en tiempo real de las señales que intervienen dentro del sistema.

Otro de los beneficios que presenta esta implementación ubicar los daños en entradas y salidas del sistema; es por estos motivos que la pantalla ayuda a mejorar el control de los procesos de presión constante.

**¿Qué impacto producirá la implementación del control de presión constante?**

La implementación de un sistema de control para procesos de presión constante produce impactos favorables para el usuario; abastece de manera permanente con el líquido vital a pesar de las variaciones de presión eventuales producidas por la red, brinda ahorro energético al apagar el sistema si la demanda es mínima, evita daños en los componentes internos del sistema por el hecho de evitar golpes de ariete, protección al sistema de bombeo; es decir, brinda confort al usuario independiente de donde sea instalado.

## CONCLUSIONES

- El desarrollo del sistema de control para el proceso permitió controlar favorablemente el sistema de presión constante en un tiempo de 5ms.
- La exactitud del circuito que manipulará la señal de control de presión, emite una diferencia de lecturas equivalente al  $\pm 2\%$ , dando un comportamiento confiable de la variable.
- El diseño de los circuitos para el acondicionamiento de señales, permitió al amplificador operacional emitir valores de voltaje que ayudan al microcontrolador a interpretar las lecturas de las señales involucradas.
- El modelo matemático tipo PID implementado, brindó una estabilidad favorable al sistema a pesar de la existencia de perturbaciones existentes en el sistema.
- Las salidas de transistor poseen una vida útil mayor a las salidas de relé.
- El sistema de comunicación implementado para la transición de información, es estable pese a la velocidad con la cual se manipulan los datos.
- En base al Grafico 3.3, se determina que los errores producidos en el traspaso de datos son mínimos, bordean el 1%, dando como resultado un sistema de comunicación confiable.
- La cantidad de errores que aparecen en un sistema de comunicación es proporcional al aumento de la velocidad con la cual se transmiten los mensajes.
- El uso del DMA, ayuda a mejorar los tiempos de ejecución de sentencias, ya que el CPU puede realizar otro trabajo simultáneamente.
- La comunicación serial benéfica al sistema al no necesitar de una cantidad elevada de hilos al instante de transmitir información.
- El periférico utilizado (UART) para el procesamiento de datos de un microcontrolador a otro, puede realizar el traspaso de información de 7 a 9 bits.

- El manejo por interrupciones beneficia otorgando prioridad a los procesos más críticos del sistema.
- El código de redundancia cíclica posee como principal ventaja, la capacidad de encontrar mayor cantidad de errores que otros métodos.
- La implementación del PLC y una pantalla de tipo TFT adecuada, otorga un solo dispositivo robusto capaz de controlar de mejor manera el sistema en tiempo real.
- Los sistemas de presión constante están diseñados para brindar confort, seguridad y abastecimiento de agua de forma permanente sin importar variaciones en la red.
- Las bombas alternantes en un sistema de presión constante otorgan alargar la vida útil de las bombas utilizadas y que su desgaste sea el mismo.

## RECOMENDACIONES

- Conocer los conceptos básicos tanto del sistema de control como las características del proceso.
- Se debe considerar que, al aumentar la velocidad para el traspaso de datos, se produce un incremento proporcional en el error de información procesada.
- Para elegir la velocidad con la cual el microcontrolador va a realizar la transferencia de información, se debe considerar el grado de error que esta produce mediante pruebas en lapsos de tiempo cortos y prolongados.
- El código de control para el CRC debe ser el mínimo, de esta forma existe mayor seguridad en la información.
- Conocer las características de cada uno de los periféricos de comunicación existentes, así se elegirá el más adecuado a las necesidades de trabajo, considerando distancia, velocidad de trabajo, etc.
- Identificar correctamente las cualidades con la que cuenta el o los microcontroladores a usar, como su velocidad, distribución de pines, cantidad de temporizadores disponibles, trabajo por DMA.
- Se recomienda realizar hacer retardos en los temporizadores en base a las interrupciones, de esta manera se ajustará la prioridad de las sentencias de control.
- Al momento de implementar el dispositivo, estar seguros de los rangos de trabajo son los adecuados a los establecido en el manual de usuario.
- Se debe conocer las reglas para efectuar el diseño de un PCB, de esta forma se logrará un buen dimensionamiento.

## **GLOSARIO**

<b>A</b>	Amperios.
<b>ARM</b>	Architecture RISC Machine.
<b>ASCII</b>	Estándar Americano para intercambio de información.
<b>CPU</b>	Unidad Central de Procesamiento
<b>CRC</b>	Código de Redundancia Cíclica.
<b>DMA</b>	Acceso directo a memoria.
<b>DMA</b>	Acceso directo a memoria.
<b>GPIO</b>	Entrada/Salida de Propósito General.
<b>HMI</b>	Human Machine Interface.
<b>I2C</b>	Circuito inter-integrado.
<b>KP</b>	Ganancia proporcional.
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Display.
<b>LCR</b>	Verificación de redundancia longitudinal.
<b>PCB</b>	Placa de circuito impreso.
<b>PLC</b>	Controlador lógico programable.
<b>SPI</b>	Interfaz periférica serial.
<b>TD</b>	Tiempo derivativo.
<b>TFT</b>	Transistores de películas fina.
<b>TI</b>	Tiempo integral.
<b>UART</b>	Receptor transmisor asincrónico universal.
<b>USART</b>	Receptor transmisor sincrónico y asincrónico universal.
<b>V</b>	Voltios.
<b>VRC</b>	Verificación de redundancia vertical.
<b>µc</b>	Microcontrolador.

## BIBLIOGRAFIA

**ACSIMB.** *Control Bombas de Agua* [en línea] Ambato, (2016).

[Consulta: 24 septiemmbre 2017]. Disponible en:

<http://acsimb-tech.com/index.php/productos/productos-acsimb/item/121-control-bombas-de-agua>.

**ARMKEIL Microcontroller Tools.** *MDK Microcontroller Development Kit.* [En línea].

2016. [consulta: 19 septiembre 2017]. Disponible en:

<http://www2.keil.com/mdk5>

**BANCHIMOT, Daniel.** *Proyectos con Microcontroladores*, Buenos Aires-Argentina:

FoxAndina (2011), p 52.

**BARRIOS, Lissia & GALEANO, Iris.** *Interfaces Hombres -Máquina* [en línea]. Asunción-

Paraguay. [Consulta: 18 agosto 2017]. Disponible en:

<http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/HMI.pdf> (2014).

**MANCILLA, Alfonso; et al. Sapiens:.** *Diseño y construcción de algoritmos.* Barranquilla-Colombia: Universidad del Norte, 2014 pp. 3-4.

**MARTÍN, Juan & GARCÍA, María.** *Automatismos industriales.* Madrid-España: Editex,

2009, pp. 213-215.

**OGATA, Katshuiko.** *Ingeniería de control moderna.* 4ª ed. Prentice Hall, 2003. pp 683-685.

**PADERO, Martín.** *Montaje y mantenimiento de instalaciones frigoríficas industriales.* Madrid

España, 2014, p 133.

**SANCHIS, Roberto; et al. Sapiens: Automatización Industrial:** Publicacions de la Universitat

Jaume, 2010, p. 6.

**SERRANO, Armando.** *Introducción al Lenguaje C* [blog:] [Consulta: 08 agosto 2017]

Disponible en:

<http://blog.utp.edu.co/jnsanchez/files/2011/03/Introduccion-al-lenguaje-c.pdf>

**SOLBES, Raul.** *Automatismos industriales.* Valencia-España: Nau LLibres, 2013, pp. 139-140

*STM32Cube initialization code generator*. [En línea]. Francia París. 2016. [consulta: 29 septiembre 2017]. Disponible en:  
<http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>

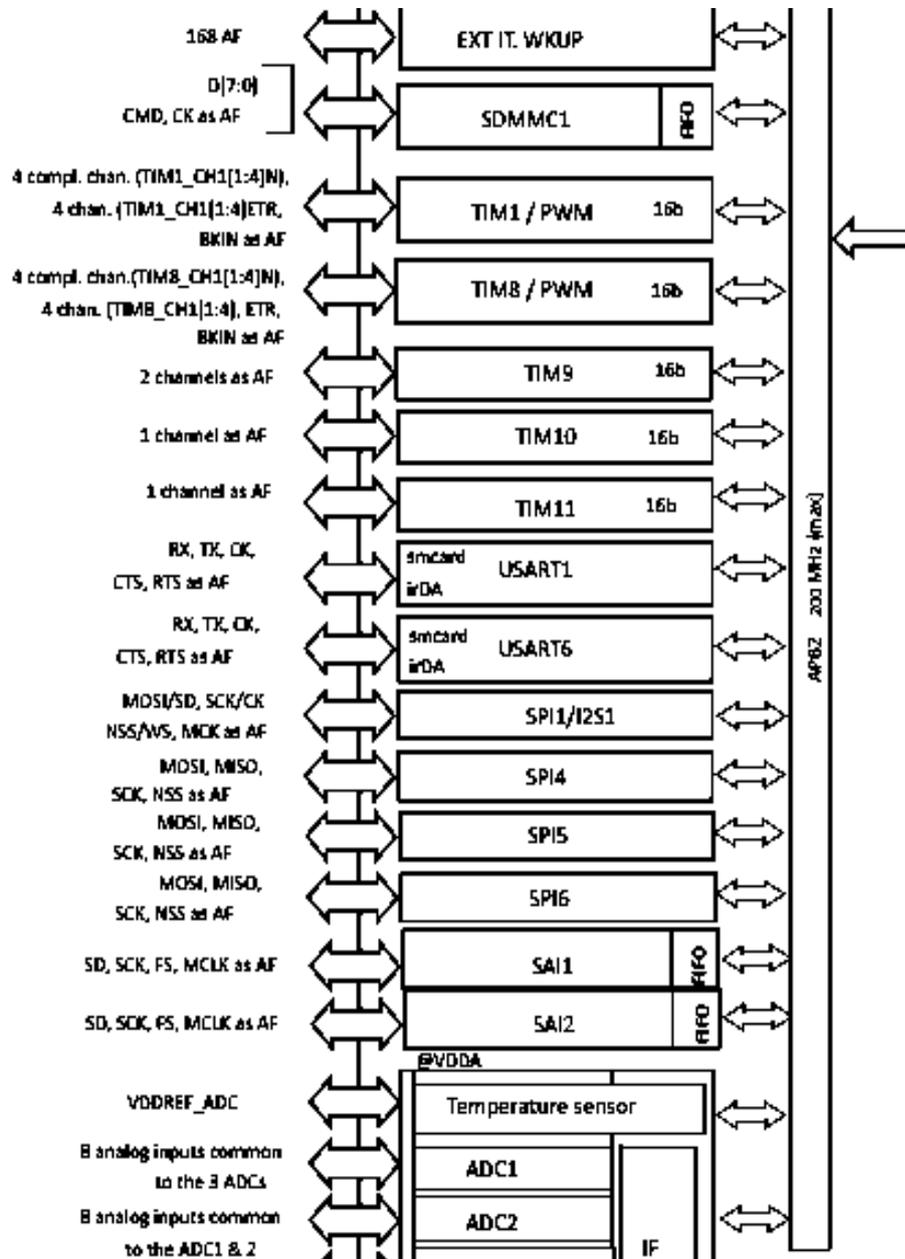
**TORRES-ORTEGA, H.** *Guía de diseño de PCB con Eagle*. Jalisco-México., 2014, pp. 3-4.

**STMICROELECTRONICS.** *STMicroelectronics Home*. [en línea] 2015. [Consulta: 20 de Agosto 2017]. Disponible en:  
[http://www.st.com/content/st\\_com/en.html](http://www.st.com/content/st_com/en.html)

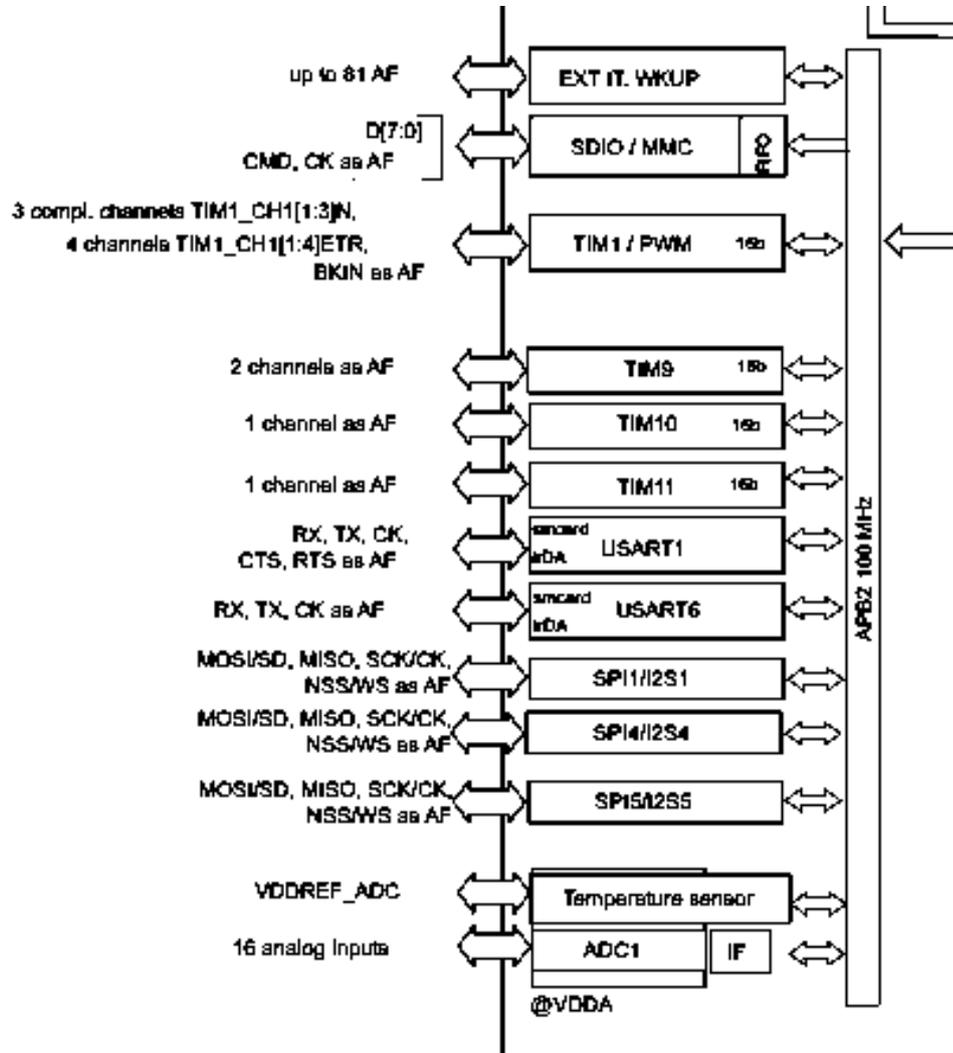
**VALDÉS Fernando & PALLÁS Ramón.** *Microcontroladores*. Cataluña: Marcomb Ediciones Técnicas, 2007, pp. 224-228.

# ANEXOS

ANEXO A: Datasheet microcontrolador STM32F746 (configuración de frecuencia)



**ANEXO B:** Datasheet microcontrolador STM32F411 (configuración de frecuencia)



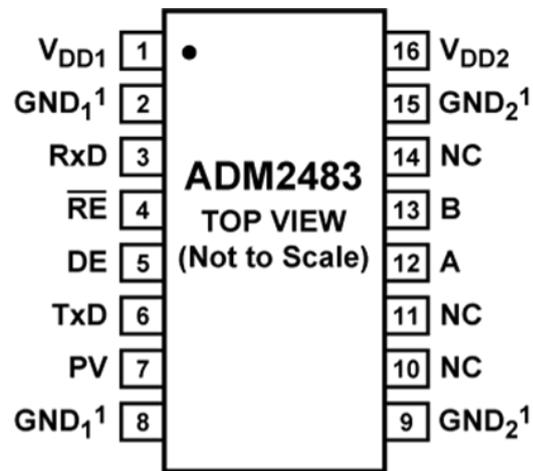
### ANEXO C: Datasheet microcontrolador STM32F46(características y periféricos)

Peripherals		STM32F745Vx	STM32F746Vx	STM32F745Zx	STM32F746Zx	STM32F745bx	STM32F746bx	STM32F745Bx	STM32F746Bx	STM32F745Mx	STM32F746Mx
Communication interfaces	SPI / I <sup>2</sup> S	4/3 (simplex) <sup>(2)</sup>				6/3 (simplex) <sup>(2)</sup>					
	PC	4									
	USART/UART	4/4									
	USB OTG FS	Yes									
	USB OTG HS	Yes									
	CAN	2									
	SAI	2									
	SPDIFRX	4 inputs									
SDMMC	Yes										
Camera interface	Yes										
LCD-TFT	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	
Chrom-ART Accelerator™ (DMA2D)	Yes										
GPIOs	82		114		140		168				
12-bit ADC	3										
Number of channels	16		24								
12-bit DAC	Yes										
Number of channels	2										
Maximum CPU frequency	216 MHz <sup>(3)</sup>										
Operating voltage	1.7 to 3.6 V <sup>(4)</sup>										
Operating temperatures	Ambient temperatures: -40 to +85 °C / -40 to +105 °C										
	Junction temperature: -40 to +125 °C										
Package	LQFP100 TFBGA100		WLCSP143 LQFP144		UFBGA176 LQFP176		LQFP208		TFBGA216		

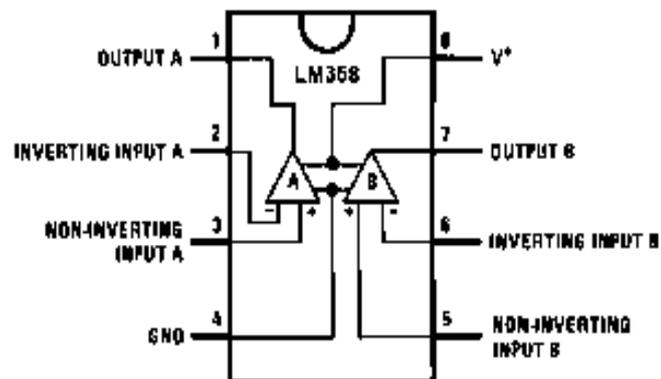
### ANEXO D: Datasheet microcontrolador STM32F411(características y periféricos)

Peripherals		STM32F411xC			STM32F411xE		
Flash memory in Kbytes		256			512		
SRAM in Kbytes	System	128					
Timers	General-purpose	7					
	Advanced-control	1					
Communication interfaces	SPI / I <sup>2</sup> S	5/5 (2 full duplex)					
	I <sup>2</sup> C	3					
	USART	3					
	SDIO	1					
	USB OTG FS	1					
GPIOs		36	50	81	36	50	81
12-bit ADC		1					
Number of channels		10	16		10	16	
Maximum CPU frequency		100 MHz					
Operating voltage		1.7 to 3.6 V					
Operating temperatures		Ambient temperatures: - 40 to +85 °C / - 40 to + 105 °C/ - 40 to + 125 °C					
		Junction temperature: - 40 to + 130 °C					
Package		WLCSP49 UFQFPN48	LQFP64	UFBGA100 LQFP100	WLCSP49 UFQFPN48	LQFP64	UFBGA100 LQFP100

**ANEXO C:** Datasheet del CI ADM2483



**ANEXO D:** Datasheet del CI LM328A



## **Anexo E: Manual de Usuario Prototipo PLC+HMI**

### **Descripción**

El módulo PLC+HMI, está diseñado para controlar automáticamente bombas de agua en sistemas hidráulicos con el objetivo de suministrar una presión constante en Hospitales, complejos turísticos, conjuntos habitacionales, hoteles, industrias (alimentos, textil, plásticos, etc.)

Este tipo de dispositivo ayudan al ahorro de energía, racionamiento de agua en zonas donde el suministro no es constante, protección a la estructura de la planta.

Gracias a los criterios previamente programados, el usuario u operador no necesita supervisar de manera permanente estos sistemas, la inclusión de alarmas de detención y avisos ayudan conocer los fallos eventuales.

### **Funcionamiento**

El Sistema de Control de Presión Constante tiene el alcance de controlar dos bombas de agua alternantes modulantes y la opción de conectar una bomba adicional la cual desempeña su trabajo a una velocidad fija.

Las bombas implementadas rotan en forma automática, aquella modulante activa, varia su velocidad para mantener la demanda del caudal y de esta manera conservar la presión deseada, en caso de ser necesario entran en funcionamiento las bombas adicionales a una velocidad fija; si existe fallas el sistema puede operar de manera manual.

Ayuda a que el arranque sea de modo suave de esta forma evita los golpes de ariete, daños en infraestructuras internas; incrementado así la vida útil del equipo y de cada uno de los dispositivos conectados.

## Especificaciones

**Tabla 1-E:** Especificación de las características del módulo PLC+HMI

DESCRIPCIÓN	VALOR
POTENCIA:	24 VDC 750mA (CPU) 18W
ENTRADAS:	12 DIGITAL (24 VDC PNP)
	4 ANALOG (12 BITS, 0-10V)
SALIDAS	12 DIGITAL (24 VDC NPN) 6 relay, 6 transistor
	2 ANALOG (12 BITS, 0-10V)
COMUNICACIÓN:	ESCLAVO MODBUS RTU

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

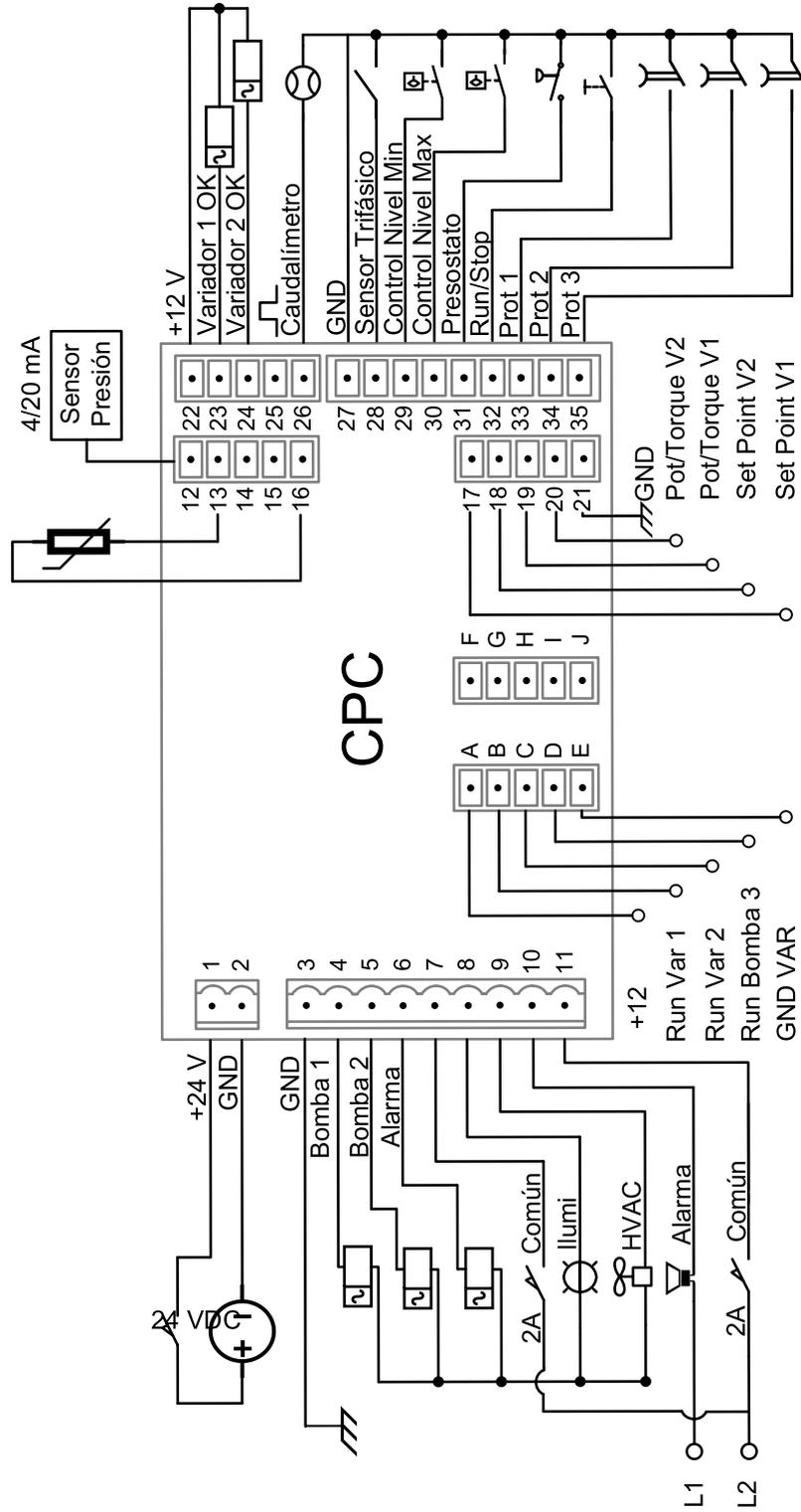
## Rangos eléctricos

**Tabla 2-E:** Detalle de los Rangos Eléctricos

DESCRIPCIÓN	VALOR
Voltaje	24 VDC
Disipación de energía	40 W máximo
Fusibles o disyuntores para la carga total	Máximo 3x2 A
Máxima carga total conectada	200 Ma

Realizado por: ARIAS, Alex 2017

# Plano de conexión

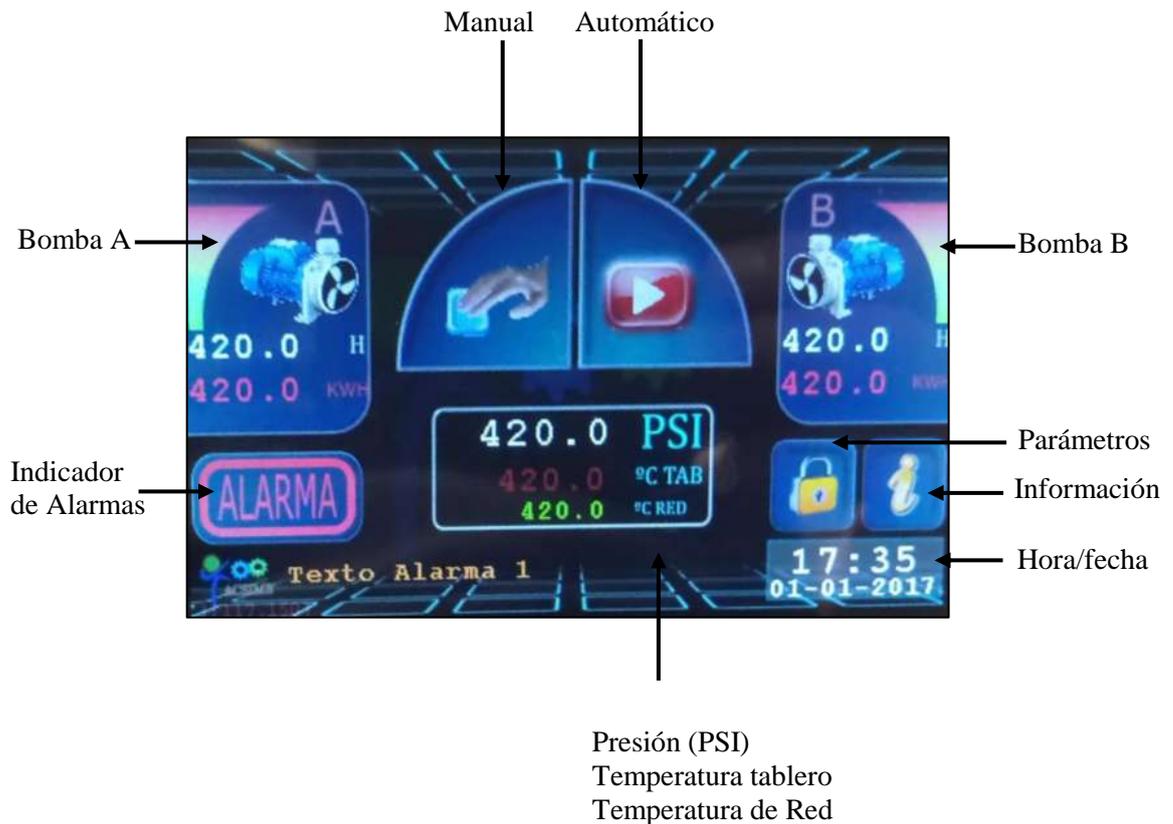


**Figura 1-E:** Plano de conexión del módulo**Tabla 3-E:** distribución de los terminales

<b>Term</b>	<b>Descripción</b>	<b>Rangos</b>
1	Alimentación de módulo de control (+24V)	+24 VDC
2	Alimentación de módulo de control (GND)	0V
3	Conexión a Tierra	0V
4	Salida de activación Bomba 1	220 VAC/10A
5	Salida de activación Bomba 2	220 VAC/10A
6	Salida de activación Bomba 3	220 VAC/10A
7	Común para Salidas de Bombas	220 VAC
8	Salida de Activación Iluminación	220 VAC
9	Salida de Activación Iluminación	220 VAC
10	Salida Conexión Alarma	220 VAC
11	Común para Salidas de Bombas	220 VAC
12	Entrada de sensor de presión	4 a 20mA
13	Entrada de NTC	10k $\Omega$
14	Sin conexión	
15	Sin conexión	
16	Salida GND para sensores	0V
17	Salida de 0 a 10 V, control del set point variador 1	0 a 10 VDC
18	Salida de 0 a 10 V, control del set point variador 2	0 a 10 VDC
19	Salida Potencia/Torque variador 1	0 a 10 VDC
20	Salida Potencia/Torque variador 2	0 a 10 VDC
21	Salida GND al común de los variadores	0 a 10 VDC
22	Señal de +12V	+12 VDC
23	Contacto del variador 1 indica que está OK	+12 VDC
24	Contacto del variador 2 indica que está OK	+12 VDC
25	Contador 2	+12 VDC
26	Contacto del Caudalímetro (contador 1)	+12 VDC
27	GND de la fuente para terminales	0V
28	Contacto NC del sensor trifásico	+12 VDC
29	Contacto NC del control de nivel mínimo	+12 VDC
30	Contacto NC del control de nivel máximo	+12 VDC
31	Contacto NC del Presostato	+12 VDC
32	Contacto Run/Stop	+12 VDC
33	Contacto NA de la protección1 (guardamotor)	+12 VDC
34	Contacto NA de la protección2 (guardamotor)	+12 VDC
35	Contacto NA de la protección3 (guardamotor)	+12 VDC
A	Señal de +24V	+12 VDC
B	Salida de control para poner en Run al variador1 (PNP)	+12 VDC
C	Salida de control para poner en Run al variador2 (PNP)	+12 VDC
D	Salida de control para poner en Run Bomba 3	+12 VDC

## Interfaz gráfica

La HMI permite al usuario visualizar y monitorear cada una de las variables necesarias para efectuar el control de los sistemas hidráulicos de presión constante.



**Figura 2-E:** Pantalla principal del proceso

Para iniciar con el control del sistema ingrese en el botón de seguridad de esta forma podrá configurar los parámetros y tener acceso total.

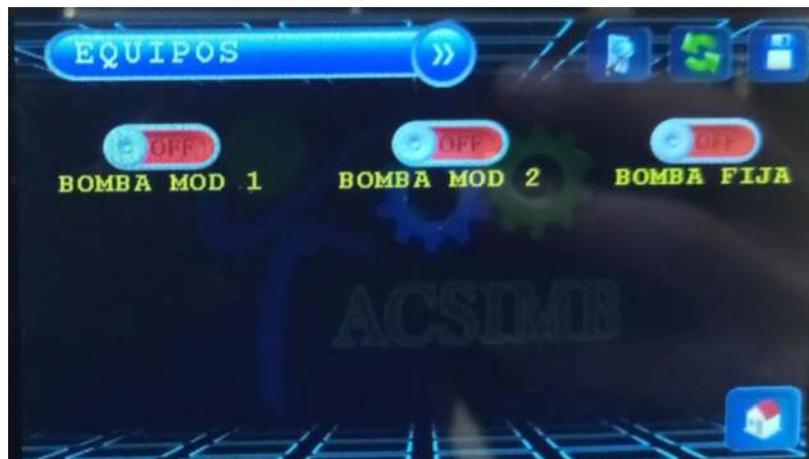
**USERNAME:** 1111

**CODE:** 111111

Por medio de los selectores elija las bombas implementadas en el sistema.

El dispositivo está en la capacidad de controlar las siguientes combinaciones de elementos

- Una bomba modulante.
- Una bomba modulante y una fija.
- Dos bombas modulantes
- Dos bombas modulantes y una fija.



**Figura 3-E:** Pantalla de Equipo

### Configuración de parámetros



**Figura 4-E:** Pantalla de Entradas 2



Figura 5-E: Pantalla en modo manual



Figura 6-E: Pantalla en modo automático



Figura 7-E: Pantalla de configuración de variadores



Figura 8-E: Pantalla de parámetros PID



Figura 9-E: Pantalla de tiempos



Figura 10-E: Pantalla de entradas y salidas digitales



Figura 11-E: Pantalla de temperaturas



Figura 12-E: Pantalla de presiones

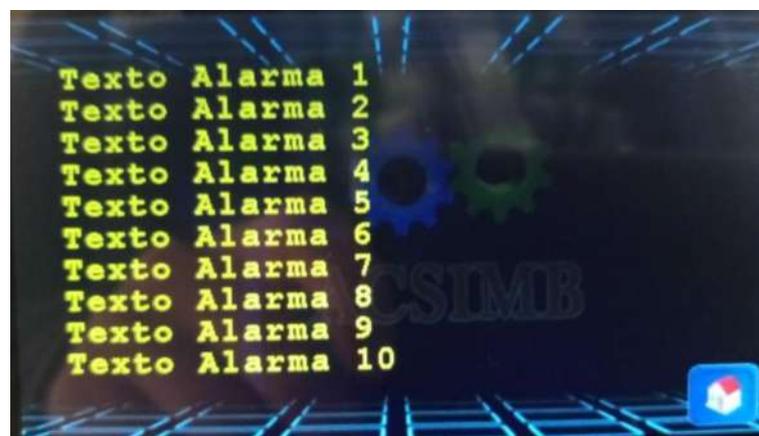
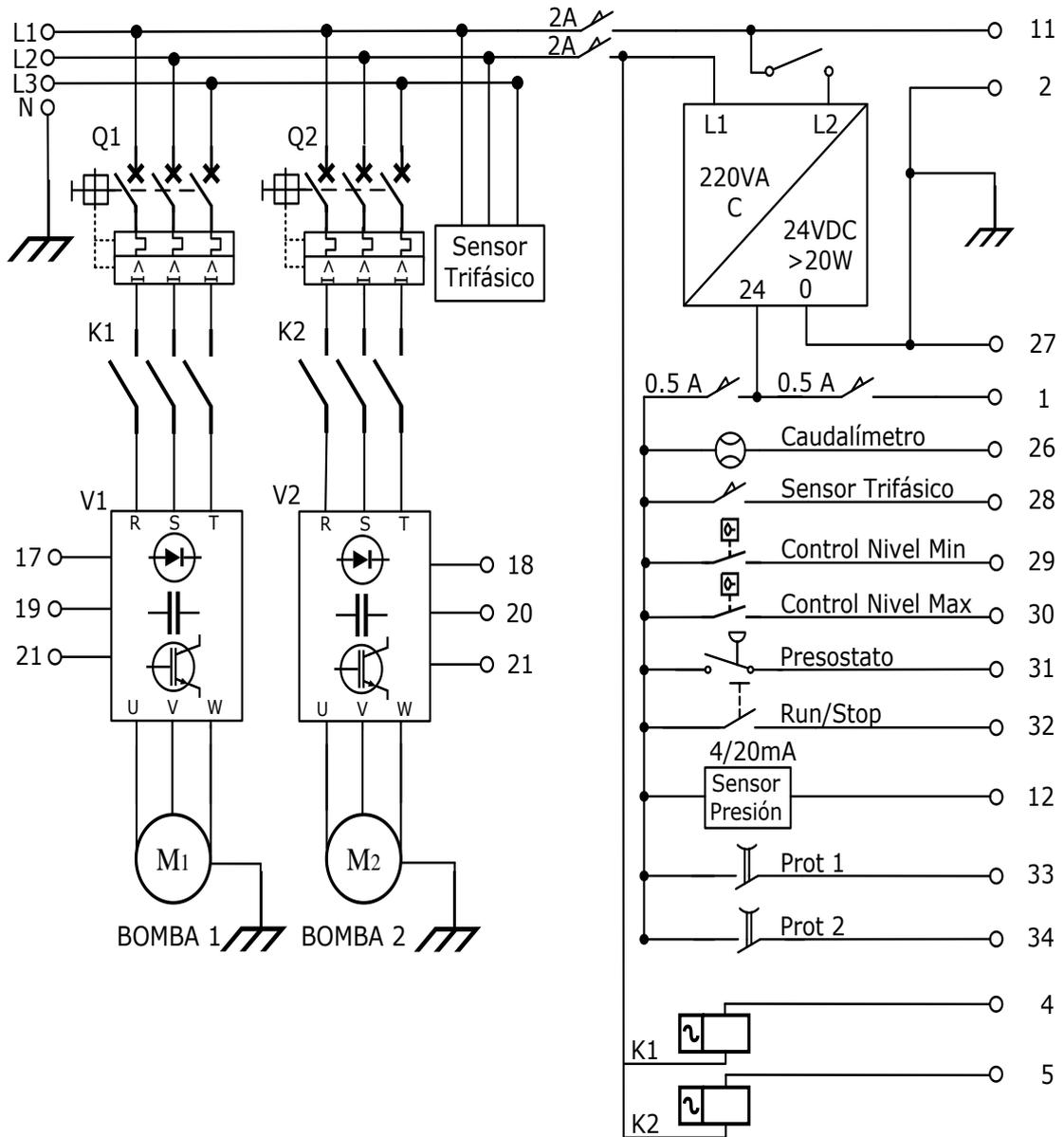


Figura 13-E: Pantalla de alarmas

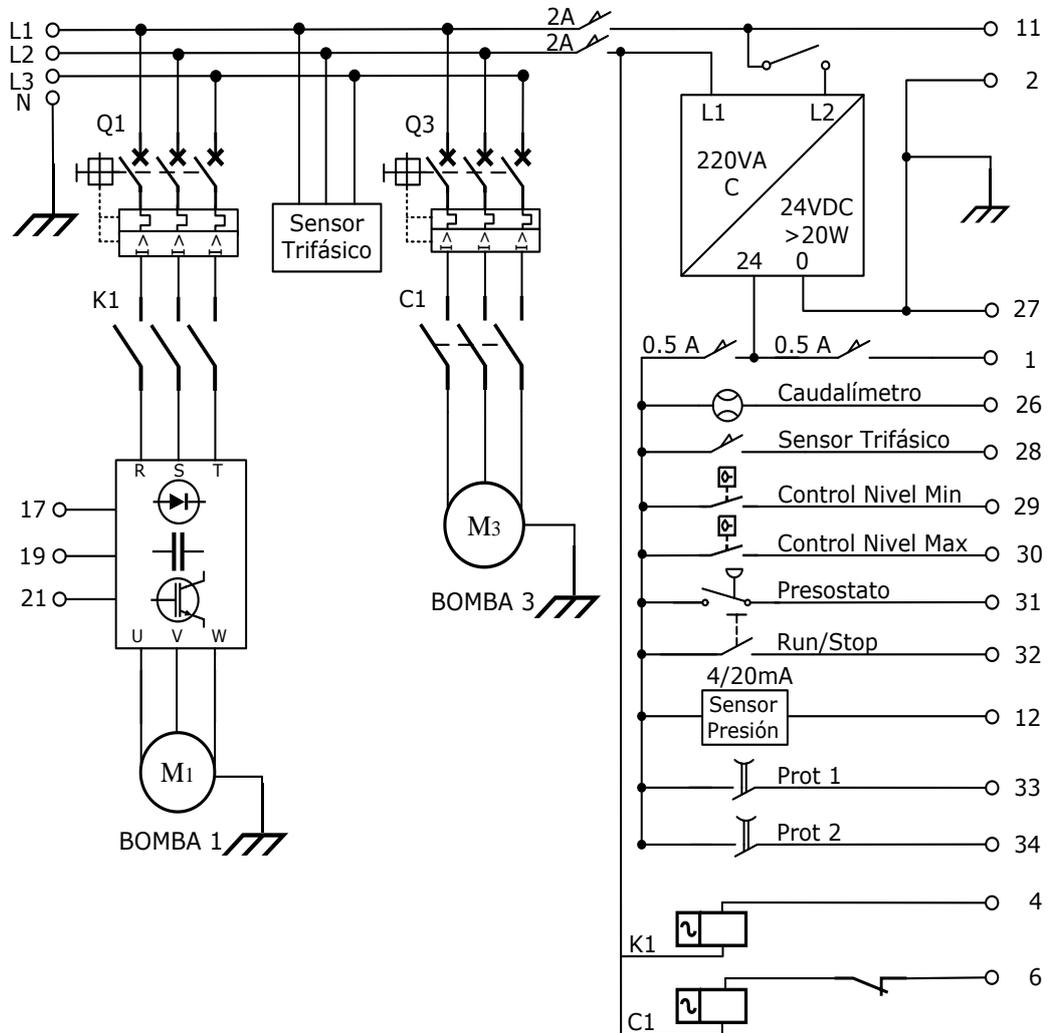
**Tabla 4-E:** Configuración de parámetros para el módulo

<b>Parámetro</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>PID</b>	TIEMPO DE CICLO	5 seg
	KP	10
	KI	80
	KD	10
<b>TIEMPOS</b>	STOP VARIADOR	30 seg
	QUITAR VARIADOR	60 seg
	PONER VARIADOR	5 seg
	MANT. BOMBAS	500 hrs
	CAMBIO BOMBAS	4-8 hrs
	SILENCIAR ALARMAS	2 hrs
<b>DIGITAL I/O</b>		
<b>TEMPERATURAS</b>	T VENTILADOR ON	30°C
	T SEGUR TABLERO	60°C
	T ACTIVA SENSOR2	30°C
	T SEGUR SENSOR2	30°C
<b>PRESIONES</b>	MÁXIMA	70-100
	V MIN B%	25%
	V MIN CARGA %	25 50%
	AUTOMÁTICO	90-100%
	HISTÉRESIS (+/- SET)	30 PSI
	GRADIENTE (PSI/MIN)	2-6 PSI/m

ANEXO: Diagrama de conexión de dos bombas alternantes



ANEXO: Diagrama de conexión de una bomba alternante y una fija



ANEXO: Diagrama de conexión de una bomba alternante

