



**unitec**<sup>®</sup>  
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES<sup>®</sup>

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE HONDURAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**CONTROL AUTOMÁTICO DE PRESIÓN DE AGUA FRÍA Y CALIENTE, ELCATEX**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**

**INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**PRESENTADO POR:**

**21611292 JOEL ANDRÉS GARCÍA ZELADA**

**ASESOR: ING. DARWIN REYES HERNÁNDEZ**

**CAMPUS SAN PEDRO SULA**

**ENERO 2019**

## DEDICATORIA

Primeramente, doy gracias a Dios por su infinita misericordia para conmigo ya que sin su gracia no habría podido culminar mis estudios satisfactoriamente. Estoy grandemente agradecido con Él por la fuerza y la sabiduría que me ha dado durante todo el tiempo de mi estudio. A El solamente sea toda la gloria.

A papa: Te agradezco tanto por tu ejemplo de perseverancia y diligencia. Gracias por siempre creer en mí y por empujarme a ser mejor. Gracias tanto a ti como a mama por encaminarme en el camino de la Vida. Eso no tiene precio. Como primer hijo graduado de la universidad, con mucho orgullo te dedico este logro a ti y a mama. Este logro es tanto de ustedes como mío.

A mama: Gracias por siempre estar allí cuando te he necesitado. Tus palabras muchas veces me dieron ánimo cuando las fuerzas me faltaron y me reconvinieron cuando lo necesité. Te agradezco tanto por tu sacrificio y tu entrega. Me has enseñado lo que amor incondicional significa porque lo has vivido. Tu sonrisa y tu actitud positiva siempre han sido y serán un rayo de luz en mi vida.

A mis abuelitos: Bito Carlos y Bita Mely, esto no sería posible sin su apoyo en tantas áreas de mi vida: emocional, económico, pero sobre todo espiritual. Que dicha tener a alguien tan cerca de mí que esté interesado por mi bien eterno. Sus lecciones, reprensiones y cariños quedan grabados en mi corazón.

## ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
2.1	ANTECEDENTES.....	3
2.2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	4
2.3	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	5
2.4	OBJETIVOS .....	5
2.4.1.	<i>OBJETIVO GENERAL</i> .....	5
2.4.2	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> .....	6
2.5	JUSTIFICACIÓN.....	6
III.	MARCO TEÓRICO .....	7
3.1	AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL.....	7
3.2	INDUSTRIA TEXTIL.....	8
3.2.1	<i>IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LA INDUSTRIA TEXTIL</i> .....	8
3.2.2	<i>AUTOMATIZACIÓN EN EL AMBITO TEXTIL</i> .....	9
3.2.3	<i>PROCESO DE TEÑIDO</i> .....	10
3.3	MECÁNICA DE FLUIDOS .....	11
3.3.1	<i>PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS</i> .....	11
3.3.1.1	Presión .....	11
3.3.1.2	Densidad .....	12
3.3.2	<i>PROPIEDADES DEL AGUA</i> .....	12

3.3.2.1	Dureza.....	13
3.3.2.2	pH.....	13
3.3.3	<i>HIDRODINÁMICA</i> .....	14
3.3.3.1	Ecuación de Bernoulli.....	14
3.3.4	<i>MÁQUINAS HIDRÁULICAS</i> .....	15
3.4	SENSORES Y ACTUADORES.....	16
3.5	VARIADOR DE FRECUENCIA.....	17
3.6	PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE).....	19
3.6.1	<i>VENTAJAS AL UTILIZAR UN PLC</i> .....	21
3.6.2	<i>COMPONENTES Y ACCESORIOS DE UN PLC</i> .....	21
3.6.3	<i>PROGRAMACIÓN DE UN PLC</i> .....	22
3.7	HMI (INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA).....	23
3.8	CONTROLADOR PID.....	25
3.8.1	<i>SISTEMA DE LAZO CERRADO</i> .....	27
3.8.2	<i>FUNCIONES DE UN CONTROLADOR PID</i> .....	28
3.8.3	<i>PARTES DE UN CONTROLADOR PID</i> .....	29
3.8.3.1	Acción Proporcional.....	29
3.8.3.2	Acción Integral.....	29
3.8.3.3	Acción Derivativa.....	30
3.8.4	<i>SINTONIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PID</i> .....	31
IV.	METODOLOGÍA.....	35

4.1	VARIABLES.....	35
4.1.1	<i>VARIABLES DEPENDIENTES</i> .....	35
4.1.2	<i>VARIABLES INDEPENDIENTES</i> .....	36
4.2	MÉTODO Y ENFOQUE.....	36
4.3	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	37
4.4	CRONOGRAMA.....	38
V.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	39
5.1	ANÁLISIS.....	39
5.2	RESULTADOS.....	42
5.2.1	<i>RESULTADOS DE DESARROLLO DE HMI</i> .....	42
5.2.1.1	Pantalla Principal.....	42
5.2.1.2	Pantalla Alarmas.....	43
5.2.1.3	Pantalla de Gráfica de Presión.....	44
5.2.1.4	Pantalla de Ajustes de PID.....	45
5.2.2	<i>PROGRAMACIÓN</i> .....	46
5.2.2.1	Main.....	46
5.2.2.2	Horómetro.....	48
5.2.2.3	PID.....	49
VI.	CONCLUSIONES.....	51
VII.	RECOMENDACIONES.....	52
VIII.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	55

IX.	ANEXOS.....	61
-----	-------------	----

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Participación de las Exportaciones de Textiles y Arnéses de Centroamérica, 2017.....	9
Ilustración 2. Densidad de algunos materiales comunes. ....	13
Ilustración 3. Elementos de una bomba centrífuga.....	16
Ilustración 4. Variador de Frecuencia marca WEG CFW700.....	18
Ilustración 5. Diferentes marcas de PLC.....	19
Ilustración 6. PLC AXC1050 de Phoenix Contact acoplado a módulos de I/O digital y un módulo de entrada analógica.....	20
Ilustración 7. Ejemplo de programa realizado en FUP (bloques de función).....	22
Ilustración 8. Ejemplo de una pantalla HMI.....	24
Ilustración 9. Visu+ 2.50, software de programación para HMI.....	25
Ilustración 10. Respuesta típica de un controlador PID. ....	26
Ilustración 11. Forma no interactiva del algoritmo de control PID.....	26
Ilustración 12. Forma interactiva del algoritmo de control PID.....	27
Ilustración 13. Ejemplo de un proceso de control de lazo cerrado. ....	27
Ilustración 14. Curva de respuesta en forma de S.....	32
Ilustración 15. Cronograma de actividades .....	38
Ilustración 16. Diagrama de Gant de las actividades. ....	38
Ilustración 17. Pantalla Principal "Main" .....	43
Ilustración 18. Pantalla de Historial de Alarmas.....	44
Ilustración 19. Pantalla de Gráfica de Presión.....	45

Ilustración 20. Pantalla de Ajustes de PID .....	46
Ilustración 21. Habilitación de bombas.....	47
Ilustración 22. Cambio de turnos de bombas en Main. ....	47
Ilustración 23. Deshabilitación de bombas y horómetros en Main. ....	48
Ilustración 24. Horómetro .....	48
Ilustración 25. Función PID .....	49

### ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de Bernoulli para un flujo estacionario incompresible y sin fricción a lo largo de una línea de corriente. ....	14
Ecuación 2. Acción de control proporcional.....	29
Ecuación 3. Acción de control proporcional.....	30
Ecuación 4. Acción de control derivativa.....	30
Ecuación 5. Ecuación de la recta .....	40
Ecuación 6. Pendiente de una recta .....	40

### INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols primer método.....	32
Tabla 2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols segundo método. ....	33
Tabla 3. Análisis de mejora en vida útil de bombas. ....	41



## GLOSARIO

1. Actuator: es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o actuar otro dispositivo mecánico.
2. Automatización: Alude a hacer que determinadas acciones se vuelvan automáticas (es decir, que se desarrollen por sí solas y sin la participación directa de un individuo).
3. Controlador PID: es un mecanismo de control simultáneo por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial.
4. Fluido: Es un líquido o un gas: una sustancia cuyas moléculas se mantienen unidas mediante una fuerza de cohesión o atracción débil.
5. Hidráulica: Es una rama de la física que se dedica al análisis del movimiento y del equilibrio de los fluidos.
6. Planta: En el ámbito industrial es el diseño de un edificio (o cada uno sus pisos), la parte inferior del pie o la fábrica donde se produce algún servicio o producto.
7. Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.
8. Sincronía: Se emplea con referencia a la coexistencia o combinación de sucesos en un mismo periodo temporal. La sincronía, por lo tanto, implica que ciertos hechos se desarrollan simultáneamente o de manera concordante.
9. Sistema: Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente.
10. Textil: Pertenece o relativo a los tejidos.
11. PID: Dispositivo responsable de corregir el error en una señal para alcanzar, restablecer o mantener las condiciones de regulación deseadas.

## I. INTRODUCCIÓN

El ser humano siempre ha buscado controlar su entorno para que le sirva de mejor manera. La Mecatrónica se basa precisamente eso, la solución a problemas que facilitarían un proceso o la vida en general. En la industria es muy aplicable esta rama de la ingeniería ya que siempre se busca la eficiencia y una mejor manera de realizar las cosas. La industria textil no es la excepción. El presente proyecto fue realizado a través de la empresa integradora R y D Industrial para la empresa Elcatex. Elcatex es una textilera que hace prendas de ropa para tiendas de venta al por menor tales como Walmart. Por esta razón, la empresa no enfoca tanto sus esfuerzos en la calidad de sus productos sino en la cantidad de estos. Para incrementar su eficiencia la empresa busca innovar y mejorar sus procesos. En este caso se busca mejorar el suministro de agua de varios puntos diferentes a la planta para diferentes procesos como tintorería y acabado.

Este proyecto consiste en realizar un sistema de control automático de presión de tres cuartos de bombas en la planta de Elcatex. Estos tres sistemas de bombas están compuestos por tres bombas centrifugas cada uno. Cada sistema alimenta la planta con agua de diferentes características. Un sistema alimenta la planta con agua fría, el otro con agua caliente y un tercero solamente agua dura, sin tratar. Estas características son indiferentes para el proceso de control ya que lo único que se busca es regular la presión. Cada bomba centrifuga esta acoplada a un motor proporcional al tamaño de las bombas.

Anteriormente, el control de los sistemas se realizaba única y exclusivamente mediante variadores. La implementación de este proyecto incluye la adición de un sensor de presión, un Controlador Lógico Programable (PLC) con sus módulos de salidas y entradas digitales y análogas y una HMI con su control para incrementar

el nivel de control en cada cuarto de bombas. Todos estos componentes en conjunto representan una gran mejora en el manejo y ejecución de cada uno de los tres sistemas. Todo esto con el fin proveer un mayor monitoreo y con el fin de incrementar la eficiencia del sistema, la vida útil de las bombas y el control sobre el sistema. No solamente esto sino también se reducen los gastos energéticos incurridos por el sistema.

El análisis y control de la magnitud física se realiza mediante un proceso PID. Las unidades de control PID "son unidades que permiten la implementación de bucles de control del tipo proporcional, integral y derivativo" (Moreno García, 1999, p. 373). De esta manera se mantenía un sistema estable y muy bien balanceado. A través del PID se controla la velocidad del motor dependiendo de la presión de lectura del sensor y de esta forma regular la presión en la tubería del sistema.

## **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1 ANTECEDENTES**

Elcatex, es una fábrica textil con una amplia gama de productos que ofrece al mercado tanto local como internacional. En esta fábrica ubicada en la ciudad de Choloma, se trabaja en la fabricación de tela de punto, piezas cortadas y programas de paquete completo.

Muchos procesos realizados dentro de esta fábrica necesitan como recurso indispensable el agua. Los dos procesos que más requieren agua en una planta textil son el teñido de las telas y el acabado de estas por lo que alrededor de la fábrica de aproximadamente 500,000 pies cuadrados se pueden visualizar cinco torres de agua que contienen el agua que se utiliza en estos procesos.

Para cada uno de estos tanques de agua se cuenta con un sistema separado de bombas que suministran el agua a la planta. Cada cuarto de bombas cuenta con tres bombas que impulsaban el agua a la planta por medio de tuberías. Para el presente proyecto se trabajó únicamente en tres de estos cuartos de bombas los cuales suministran agua con diferentes características dependiendo del proceso: uno de agua caliente, otro de agua fría y otro de agua dura sin tratar.

De estos tres cuartos solamente dos funcionan con bombas centrifugas. El otro cuarto cuenta con tres bombas horizontales de doble succión. Cada una de estas bombas son operadas por motores eléctricos de gran capacidad que a su vez son controlados por un variador WEG CFW700. El sistema cuenta con sensores de presión sin embargo estos no están funcionando correctamente.

## **2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Como se ha mencionado antes, el suministro de agua a una planta textil es de vital importancia debido a los procesos que se llevan a cabo con este recurso. El problema más grande al que la fábrica Elcatex se enfrentaba era la falta de control que se tenía sobre el suministro de agua a la planta. Específicamente no se tenía un control debido sobre la presión del agua. El control de la presión en estos procesos es de gran importancia ya que la producción se ve afectaba negativamente al haber baja presión en las tuberías produciendo así pérdidas en la tela.

Bajo condiciones normales solamente una bomba estaría funcionando. Sin embargo, era necesario que el operario estuviera pendiente de un manómetro que estaba monitoreaba la presión en la tubería. Si la presión en la tubería caía el operador era el responsable de manualmente prender la siguiente bomba disponible para compensar la caída de presión. Si esto no era suficiente se debía de prender la siguiente bomba manualmente, obviamente siempre a través del variador. Tampoco se cuenta con un sistema que realice la rotación de turnos de operación de las bombas automáticamente, sino que todo se hace manualmente.

Debido a que las bombas están directamente debajo de las torres de agua y fuera del edificio de fábrica en sí, se gasta mucho tiempo para verificar el estado de las bombas y se debe de tener mucha comunicación del personal dentro de la planta con el personal fuera de ella para monitorear la presión. Esto realiza para los tres cuartos de bombas por separado.

Además, no se cuenta con un sistema de control de los motores y bombas que incluyera alarmas de mantenimientos ni alarmas de fallas en bombas o sensores haciendo el trabajo del operador un poco más difícil.

## **2.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

Para poder encontrar la solución al problema presentado anteriormente se realizó un levantamiento de proyecto de parte de R y D Industrial proceso en el cual surgieron las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuál será el valor de presión óptimo de trabajo para el PID de cada uno de los tres diferentes sistemas de bombas?
2. ¿De qué manera se puede mejorar el rendimiento y vida útil del sistema de bombas?
3. ¿Cómo se adaptará el personal de Elcatex al cambio de un sistema semiautomático a un sistema totalmente automático?

## **2.4 OBJETIVOS**

En toda investigación, los objetivos son de mucha importancia ya que mantienen en enfoque de la investigación en la dirección correcta. "Una vez que se entiende por completo el antecedente del problema como originalmente se planteó, se estará listo para replantearlo en forma de enunciado de objetivos más coherentes" (Norton, 2009). Por esta razón es importante conocer bien el problema para plantear los objetivos correctos. A continuación, se definen los objetivos del presente proyecto.

### **2.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sistema de control de los cuartos de bombas que garantice un monitoreo efectivo de las variables tanto del equipo como del proceso.

### **2.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el valor de presión óptimo de trabajo para el PID para cada uno de los tres diferentes sistemas de bombas.
- Determinar la forma en que se pueda mejorar el rendimiento y vida útil del sistema de bombas
- Examinar la adaptación del personal de Elcatex al cambio de un sistema semiautomático a un sistema totalmente automático

### **2.5 JUSTIFICACIÓN**

La industria textil es una de las industrias en el país con mayor impacto económico. Una pausa de unas horas e incluso de algunos minutos puede traducirse en cientos de miles sino millones de lempiras en pérdidas y es por esta razón que se toma mucho cuidado en mantener una producción constante con los requerimientos establecidos. Es allí donde surge la necesidad de actualizar las fábricas a procesos más automatizados para reducir el error y mantener una producción constante.

Un déficit de agua o incluso una variación demasiado grande en la presión del agua al suministrar el agua a los procesos muchas veces causa muchos inconvenientes. Entre algunos de estos podemos mencionar la reducción de calidad en el producto, tiempo perdido en producción, tiempo gastado en arreglar algún fallo en una bomba y por último cabe mencionar la gran pérdida monetaria.

La implementación de un sistema de control por medio de sensores interpretados por un proceso PID y monitoreado por medio de una HMI ya no es un lujo innecesario sino una necesidad demandante. El monitoreo de las bombas y la regulación de la presión en la tubería se hace de una tarea extremadamente fácil.

### **III. MARCO TEÓRICO**

Para entender a totalidad el proyecto presente es necesario primero asentar las bases teóricas que faciliten la comprensión de este. Sin una comprensión básica de los conceptos utilizados en el proyecto será difícil entender su alcance. Es por esta razón que a continuación se exponen los temas y conceptos clave que llevarán al lector a una comprensión más amplia del proyecto.

#### **3.1 AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

En los últimos años ha crecido la necesidad de un mayor control, supervisión y procesamiento de datos sobre los procesos industriales con el fin de reducir costos, aumentar la eficiencia y calidad. A la misma vez, los trabajos que poseen un nivel elevado de riesgo o dificultad son manejados de una manera mejor y más segura, así resguardando la vida de los trabajadores.

Medina & Guadayol (2010) define la automatización industrial como “la transferencia parcial o total de las funciones de coordinación ejecutadas por un operario en un proceso productivo a un equipo cableado o equipo electrónico programable” (p. 9). Para esta tendencia de la industria interesa no solamente un sistema de control, sino que también implica la instrumentación industrial. Esta rama de la ingeniería abarca temas como sensores, actuadores, supervisión, transmisión y recolección de datos y software de supervisión en tiempo real para un mejor control sobre algún proceso industrial.

Esta tendencia ha sido común en el último siglo debido a las muchas ventajas que ofrece. La eficiencia y control que se obtienen al automatizar tienen un alto impacto económico en la industria. La industria textil no es la excepción.



### **3.2 INDUSTRIA TEXTIL**

La industria textil comprende todo producto relacionado con tela, ya sea hilos, fibras, telas en si o la confección de ropa. Esta industria ha estado presente desde hace miles de años debido a que la vestimenta es una necesidad primordial, también llamada de primer orden.

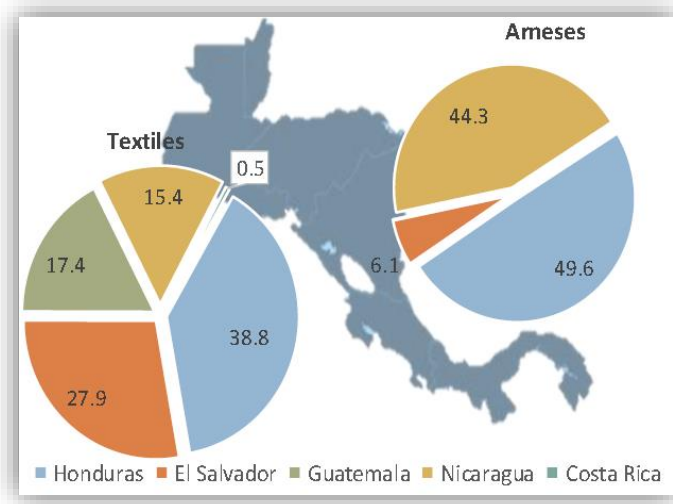
Existen muchas empresas en países altamente industrializados que tienen sus plantas de producción en países menos desarrollados debido a las ventajas que esto ofrece. Entre algunas ventajas se puede mencionar un menor impuesto sobre su producción y salarios menores a los que tendrían que pagar en un país altamente desarrollado. El área de Choloma, Cortes, se ha visto beneficiado por el establecimiento de parques industriales que en gran parte son relacionados con la industria textil. "Obviamente, el mercado laboral local ha sido transformado de manera radical en un doble sentido: por el desplazamiento de ocupaciones agrícolas por parte de las industriales y por la atracción de mano de obra migrante proveniente de otras zonas del país" (Pérez Sáinz, 1998).

#### **3.2.1 IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

Por esta razón muchas empresas extranjeras han visto oportunidad en asentar sus plantas de producción en Honduras debido a los beneficios que se ofrecen para tales empresas. Esto a su vez ayuda en gran manera al país generando empleos e ingresos al país en forma de impuestos.

Según el Banco Central de Honduras (2018) la industria textil y las maquilas representan un gran ingreso de capital al país. Solamente en el 2017 las maquilas generaron un total de L150, 583.00 millones. Además, para el 2017 la industria textil ha abierto 132,198 puestos de trabajo para los hondureños.

Es notorio también resaltar que, en Centro América, Honduras lidera la industria textil y las exportaciones relacionadas con la industria con el 38.8% de exportaciones textiles de la producción Centroamericana. (Vea la Ilustración 1).



**Ilustración 1. Participación de las Exportaciones de Textiles y Arneses de Centroamérica, 2017.**

Fuente: Informe de Bienes para Transformación y Actividades Conexas Anual 2017.

### **3.2.2 AUTOMATIZACIÓN EN EL AMBITO TEXTIL**

Gracias a los avances de la tecnología, la industria textil, como muchas otras, ha visto grandes en sus procesos. Es decir, en muchos casos los procesos son los mismos sin embargo muchos de ellos han sido automatizados, por lo menos en parte. Esta industria empezó a ver avances en la automatización de sus procesos desde la primera revolución industrial.

Dicho momento histórico es fundamental en el desarrollo de la automatización industrial pues en ella hacen aparición diferentes mecanismos de control, se desarrolla el motor de vapor y la industria textil automatizó muchos de sus procesos con el uso de equipos como el telar de Jacquard, que basado en tarjetas perforadas permitía a una persona inexperta tejer complejos diseños. (Rey S, 2009, p. 2)

Poco a poco se ha ido avanzando en la automatización de los procesos a tal punto que la intervención humana es mínima. Los procesos ahora pueden ser controlados mediante sistemas SCADA desde ubicaciones remotas. Los errores en los tejidos se han reducido a un mínimo y los desperdicios se han reducido gracias a la automatización. Siempre se necesita de personal preparado para la supervisión y control. También hay áreas en las que el operador es más apropiado para el trabajo que la máquina. Sin embargo, la automatización ha sido un factor importante en el mejoramiento de la industria textil.

### **3.2.3 PROCESO DE TEÑIDO**

Uno de los procesos más comunes en el proceso de hacer telas es el teñido. Este proceso se realiza ya sea con agua fría o agua caliente dependiendo de la tela, aunque el más común es el último. Sin embargo, existen formas recientes que permiten hacer este proceso sin agua. Salas Colotta (2003) afirma: "Los teñidos utilizados son de dos tipos: teñido con colorantes directos con fijador que se impregna en la tela y con colorantes reactivos" (p. 2). El primero es un teñido simple mientras que el teñido con colorantes reactivos, como su nombre lo implica, hacen una reacción con la tela bajo condiciones especiales.

Se requiere de gran cantidad de agua para llevar a cabo este proceso de teñido. Por lo mismo, el desperdicio de agua es bastante grande. "La generación de agua residuales una instalación de teñido para la coloración reactiva y directa se encuentra en el orden de 15 a 20 galones por libra" (Garcés Giraldo, Hernández Ángel, Peñuela Mesa, Rodríguez Restrepo, & Salazar Palacio, 2005)

### **3.3 MECÁNICA DE FLUIDOS**

La mecánica de fluidos es el estudio de los fluidos en movimiento y las fuerzas relacionadas con los fluidos. Esta rama de la ciencia estudia los fluidos en sus dos condiciones, dinámica y estática.

Es preciso definir entonces, definir un fluido. Según González Santander Martínez & Castellano Estornell (2014) “un fluido es una sustancia (considerada como un medio continuo) que carece de forma propia, por lo que adopta la forma del recipiente que lo contiene” (p. 2). Los fluidos incluyen dos estados de la materia, los líquidos como los gases. Un líquido es un fluido altamente incompresible con un volumen definido, sin embargo, no posee una forma fija. Por el contrario, en el estado gaseoso el fluido adopta la forma y volumen del contenedor en donde se encuentra constreñido. Para fines de este proyecto únicamente nos centraremos en los líquidos.

#### **3.3.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS**

Todos los fluidos tienen propiedades o características que los describen. Al saber las propiedades de un fluido es posible determinar en gran manera el comportamiento de este. Existen dos tipos de propiedades de los fluidos: primarias y secundarias. Las propiedades primarias, también llamadas propiedades termodinámicas, incluyen la presión, densidad, temperatura, volumen, calor específico, entre otros. Las propiedades secundarias incluyen la compresibilidad, la difusividad, la conductividad térmica entre otras.

##### *3.3.1.1 Presión*

“La presión es la fuerza por unidad de área que se ejerce sobre una superficie, y se mide en unidades de newtons por metro cuadrado ( $N/m^2$ ), una unidad conocida como pascal (Pa)” (Kirkpatrick & Francis, 2012, p. 141). Esta propiedad física de los

fluidos está relacionada con la profundidad. Mientras más grande sea la profundidad, mayor será la presión. En este proyecto la presión es de la más alta importancia debido a que es la magnitud física que se debe monitorear para un mejor desempeño del proceso de teñido.

La presión es un elemento que en muchos casos interesa monitorear. En ciertos casos es mala tanto una alta presión como una presión baja por lo que se necesita que el control sobre ella sea riguroso. Un mal manejo de la presión puede llevar a los sistemas que depende de ella a fallar debido a sobre presiones que causen deformaciones, quebraduras y hasta explosiones. Una presión demasiado baja también puede ser perjudicial porque las maquinas requieren una presión mínima para trabajar y si esta no tiene el nivel adecuado la vida útil de la maquinaria se ve afectada.

#### *3.3.1.2 Densidad*

La densidad de un material o un fluido es la misma independientemente del volumen del fluido. Esta propiedad física se define como la cantidad de masa por unidad de volumen. Se expresa en kilogramos por metro cubico ( $\text{kg/m}^3$ ). En la Ilustración 2 se pueden apreciar las diferentes densidades para materiales y fluidos distintos.

### **3.3.2 PROPIEDADES DEL AGUA**

El fluido importante en la realización de este proyecto es el agua debido al proceso que se realizan con ella. A continuación, se detallan algunas propiedades del agua que se deben abordar.

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Aire*	0.0013
Hielo	0.92
Agua	1.00
Magnesio	1.75
Aluminio	2.70
Hierro	7.86
Cobre	8.93
Plata	10.5
Plomo	11.3
Mercurio	13.6
Uranio	18.7
Oro	19.3
Osmio	22.5

\*A 0°C y 1 atm.

### **Ilustración 2. Densidad de algunos materiales comunes.**

Fuente: Física Una Mirada al Mundo Edición Abreviada (1a ed.)

#### *3.3.2.1 Dureza*

La dureza del agua es una propiedad del agua que indica la concentración de sales disueltas en el agua. Se le llama agua dura a aquella que tiene una alta concentración de sales especialmente de magnesio y calcio. Por otra parte, se le llama agua suave a las aguas que tienen una concentración menor a 0.5 partes por mil de sal disuelta. (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C., 2017) Esta agua también se le llama agua tratada ya que ha pasado por un proceso en el cual se baja la concentración de sales para que no se hagan incrustaciones en las tuberías. En la planta textil de Elcatex toda el agua que se usa para los procesos de teñido es procesada previamente para reducir la concentración de las sales en el agua para que el proceso se realice sin efectos negativos.

#### *3.3.2.2 pH*

El pH también es una propiedad importante del agua. Esta es la medida de acidez o alcalinidad del agua. La escala de medición de pH va de 0 a 14. Se dice que una solución es ácida cuando su pH es menor a 7 y es alcalina cuando su pH es mayor

a 7. El agua debería de ser neutra, es decir, con un pH de 7. (Kirkpatrick & Francis, 2012)

### 3.3.3 HIDRODINÁMICA

La hidrodinámica es el estudio de los fluidos en movimiento. Es de mucha importancia conocer el comportamiento del fluido cuando este está en movimiento. Para el estudio de fluidos en la hidrodinámica se considera que la densidad del fluido no varía con el cambio de presión, no se considera una pérdida de energía por viscosidad y se supone que el flujo de los fluidos es estable. Tanto la hidrodinámica como la hidrostática son de vital importancia ya que de ellas se derivan avances tecnológicos en las áreas como la hidráulica que es de tanta importancia en la distribución y el suministro de agua. Cuando la viscosidad de un fluido se considera despreciable se dice que el fluido es ideal.

#### 3.3.3.1 Ecuación de Bernoulli

La relación entre la presión de un flujo y su energía es de mucha importancia en la mecánica de fluidos. Esta necesidad se suple con la elaboración de la ecuación de Bernoulli por Daniel Bernoulli y Leonhard Euler en los años 1700s. "El estudio del flujo sin fricción a través de un tubo de corriente infinitesimal [...] proporciona una relación muy utilizada entre la presión, la velocidad y la altura, que se denomina ecuación de Bernoulli" (Mott, 2015, p. 177). Es preciso notar que esta ecuación es válida para los flujos en los cuales la fricción no es un factor determinante. La ecuación de Bernoulli se muestra a continuación:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + gz_2 = cte$$

**Ecuación 1. Ecuación de Bernoulli para un flujo estacionario incompresible y sin fricción a lo largo de una línea de corriente.**

Fuente: (Mott, 2015)

Esta ecuación toma en cuenta la energía de presión, la energía cinética y la energía potencial y esto es lo que la hace tan importante. Con esta ecuación es muy importante notar la relación que la presión y la velocidad del fluido tienen en la tubería.

### **3.3.4 MÁQUINAS HIDRÁULICAS**

Una máquina hidráulica transfiere la energía mecánica generada por lo general de un motor eléctrico al fluido, generando así presión. En la mayoría de los casos se utilizan para transferir o comprimir de alguna manera los fluidos. En el caso de nuestro proyecto se utilizan para transportar el agua de un punto de la planta a otro. Dentro de las máquinas hidráulicas encontramos las turbomáquinas.

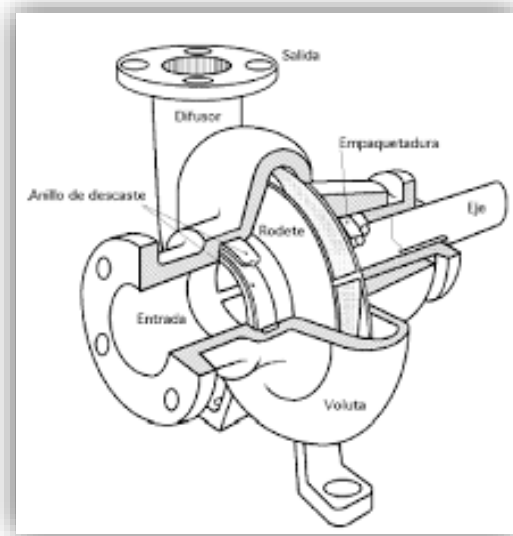
Sánchez Domínguez (2013) afirma:

Las turbomáquinas o máquinas rotodinámicas son aquellas en las que varía el momento cinético del fluido a su paso por el interior de la máquina. Como en cualquier otra máquina hidráulica, se produce un intercambio de energía entre la máquina y el fluido. El fundamento de una turbomáquina no es más que una rueda con alabes llamada rotor o rodete que puede girar alrededor de un eje cuando pasa un fluido por su interior. (p. 41)

Una bomba de agua es considerada una turbomáquina consumidora de energía mecánica debido a que aumenta la energía del fluido aplicando una energía mecánica exterior al rodete. La bomba centrífuga es una de las máquinas hidráulicas más conocidas debido a su funcionalidad y amplio campo de uso. Sus elementos principales son: el rodete, la voluta, el eje, la entrada, la salida, la brida de aspiración, la brida de aspiración, la empaquetadura y el anillo de desgaste. En la Ilustración 3 se pueden observar los elementos básicos de una bomba centrífuga.

Para el suministro del agua a la planta, Elcatex cuenta con varios sistemas de dichas bombas centrífugas para transportar el fluido de los tanques de agua que se encuentran fuera de la planta al interior de la planta donde se realizan los procesos correspondientes.





**Ilustración 3. Elementos de una bomba centrífuga.**

Fuente: Sistemas y Máquinas Fluido Mecánicas, Universidad de Cantabria

### **3.4SENSORES Y ACTUADORES**

Un elemento indispensable en el control de un sistema es el sensor. “Un sensor es un transductor que se utiliza para medir una variable física de interés. Algunos de los sensores y transductores utilizados con más frecuencia son calibradores de tensión (utilizados para medir la termopares (temperaturas), los velocímetros (velocidad)” (Escalona, 2007, p. 7). Como se verá más adelante, en un sistema de lazo cerrado la retroalimentación es de mucha importancia. Es allí donde se ve la vital importancia de los sensores. Estos son los encargados de leer la variable física y traducirla a una señal eléctrica entendible por el PLC.

Para este proyecto los sensores de presión son de mayor importancia debido a que la presión es la variable que interesa monitorear. El sensor utilizado para este proyecto mide presión en un rango de 0 a 100 psi.

En todo proceso los actuadores también son parte importante ya que son los responsables de generar un cambio y una acción en el sistema en base a las señales generadas por los sensores y las decisiones tomadas por el controlador principal. El actuador principal utilizado para este proyecto es el motor de inducción con una capacidad de 50 hp y una velocidad máxima de 1770 rpm. A estas máquinas eléctricas también se les conoce por el nombre de motor asíncrono.

Fraile Mora (2008) afirma:

“En esta situación el campo giratorio del estator induce f.e.m.s. en el devanado del rotor y al estar este en cortocircuito (jaula de ardilla) o cerrado por medio de un reóstato de arranque (rotor devanado o con anillos) aparecen corrientes en el rotor que, al reaccionar con el campo giratorio del estator, mueven la máquina a una velocidad  $n$  muy cercana y por debajo de la de sincronismo  $n_1$ .” (p. 169)

### **3.5 VARIADOR DE FRECUENCIA**

Para poder controlar la presión del fluido en la tubería es preciso controlar la velocidad con que las bombas impulsan el fluido por el sistema. Al conectar los motores eléctricos a la red eléctrica estos trabajan a 60 Hz ya que esta es la frecuencia normal de operación en Honduras. Sin embargo, al operar a esta frecuencia la velocidad será máxima y constante. Esto presenta un problema para tener un debido control sobre la presión. Anteriormente la reducción de velocidad se hacía por medio de juegos de engranajes o bandas similares a la de los autos, pero esto presentaba deficiencias de eficiencia y altos costos de mantenimiento. Ahora el control de velocidad de motores se ha hecho mucho más sencillo y eficiente gracias a los variadores de frecuencia (Ver Ilustración 4).

El variador de frecuencia es el dispositivo de regulación ubicado entre la alimentación de energía y el motor de inducción. Para que el variador sea el adecuado para la aplicación, la frecuencia se debe ajustar para que la velocidad en la salida sea la adecuada. (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 368)



**Ilustración 4. Variador de Frecuencia marca WEG CFW700.**

Fuente: página oficial de WEG

El variador de frecuencia es un importante componente en la reducción del impacto de consume energético ya que permite utilizar un motor solamente a los voltajes que se necesita sin desperdiciar energía. Estudios han demostrado que el ahorro energético oscila entre el 20 y el 70% de ahorro. Un variador también ayuda en incrementar la vida útil del motor y en el caso de este proyecto, también la vida útil de la bomba.

Como se ha mencionado anteriormente, este proyecto no incluía la instalación de los variadores. Estos ya estaban instalados en campo, uno para cada bomba (nueve en total). Sin embargo, estos variadores estaban sin utilizar. Este proyecto implementó el control sobre los variadores que a su vez controlaban la velocidad de los motores que movían las bombas para mantener la presión de agua al nivel establecido previamente.

### 3.6 PLC (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE)

Un controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo programable utilizado más comúnmente en la industria que son los encargados de regular secuencias de acciones y controlar tiempos de ejecución. Se podría decir que el PLC es el cerebro que controla todas las tareas que se deben realizar. En este dispositivo se interpretan las señales leídas por los sensores. Estas señales se conectan a las entradas del PLC. En base a esas señales se toma una decisión y se realiza (o se deja de realizar) una acción sobre uno o más actuadores. Para poder enviar la señal de accionamiento a los actuadores, estos se deben conectar a las salidas del PLC. Por lo general los PLC se deben acompañar de módulos de entradas y salidas, tanto digitales como análogas.

Algunas de las marcas de PLC más reconocidas en el mercado son: Siemens, Allan Bradley, Phoenix Contact, Omron y Mitsubishi. Algunos modelos de PLC se muestran en la Ilustración 5.



**Ilustración 5. Diferentes marcas de PLC.**

Fuente: página oficial de eWON

Daneri (2008) afirma:

Un PLC permite controlar un proceso o realizar una secuencia de acciones de manera automática a partir de un programa definido por el usuario. Esto lo realiza ejecutando en forma cíclica una secuencia de instrucciones que, a partir de la información que llega a sus entradas desde los sensores, deciden cuándo conmutar sus salidas, donde se encuentran conectados los actuadores. En este capítulo se describirán las partes que componen un PLC y sus principales características. Por otra parte, se analizará la forma cómo un PLC ejecuta la lógica escrita por el usuario y las rutinas de verificación internas. (p. 89)

Para este proyecto se trabajó solamente con los PLCs de Phoenix Contact, específicamente con el AXC 1050 (Ver Ilustración 6). Este PLC no cuenta con módulos de entradas y salidas, ni una interfaz gráfica. Sin embargo, es un PLC de manejo sencillo y flexible. También es un autómata compacto, rápido y robusto. Es posible conectarle un máximo de 63 módulos de entrada/salida capaces de ser alineados directamente. Puede controlar hasta 16 equipos mediante PROFINET. Incluye 2 interfaces Ethernet y tiene un margen de temperatura de operación de -25°C a 60°C.



**Ilustración 6. PLC AXC1050 de Phoenix Contact acoplado a módulos de I/O digital y un módulo de entrada analógica.**

Fuente: página oficial de Phoenix Contact

### **3.6.1 VENTAJAS AL UTILIZAR UN PLC**

Los PLC han sido clave en reducir el riesgo para operarios en las tareas que tienen un nivel de riesgo elevado. Estos también han contribuido en reducir de manera significativa los costos de mantenimiento y recursos desperdiciados a la misma vez que se incrementa la velocidad de producción y se reduce la cantidad de errores en los procesos. El PLC también es clave en incrementar la eficiencia del proceso que controla. Gracias a dicha eficiencia, la vida útil de la maquinaria que controla se incrementa, se reduce el desperdicio de materia prima y eleva la calidad de la manufactura terminada.

### **3.6.2 COMPONENTES Y ACCESORIOS DE UN PLC**

Un PLC sirve como el cerebro de un proceso, pero para que un cerebro pueda ser funcional, se requieren de muchas otras partes relacionadas que permiten realizar un control adecuado. Dependiendo del tipo y marca, estos componentes o accesorios están incluidos o no dentro del mismo PLC.

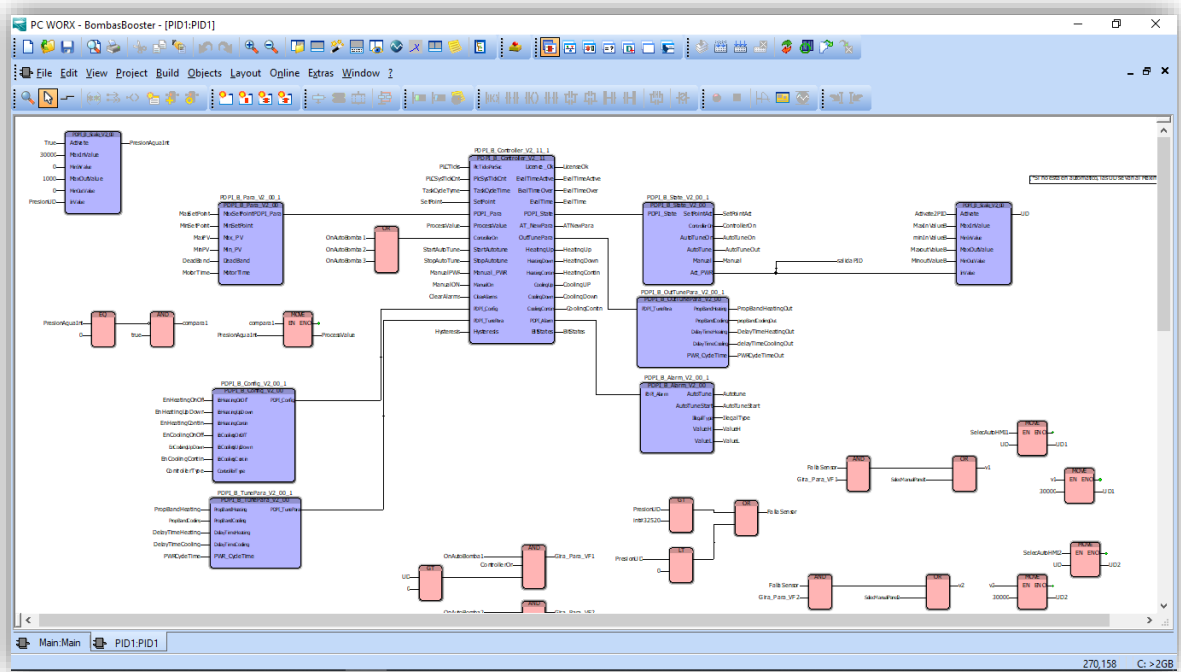
Primero, todo PLC necesita una fuente de alimentación. Algunos traen una fuente de alimentación interna, mientras que otros deben ser alimentados por una fuente externa, por lo general de 24VDC. Obviamente el PLC debe de incluir un CPU para realizar todo el procesamiento de datos.

Otros componentes que son indispensables son los módulos de entradas y salidas ya sea análogos y digitales. Estos son los responsables de recibir y enviar toda señal. Estos módulos pueden variar mucho en tamaño y diseño dependiendo de la aplicación y el proceso. No en todos los casos se requiere de una salida análoga, por ejemplo, por lo que en esos casos no se incluiría el módulo de salida análoga. Para este proyecto se usaron módulos de entradas y salidas tanto digitales como análogas.

Todo PLC también debe tener algún tipo de puerto de comunicación para poder conectarse con otros controladores, pantallas HMI o simplemente con una computadora para cargar el programa. Para cargar el programa, algunos PLC también traen la opción de insertar una tarjeta SD. Algunos PLC también traen incluida una pantalla HMI para la visualización de datos.

### 3.6.3 PROGRAMACIÓN DE UN PLC

“En la actualidad existen diferentes lenguajes de programación que permiten a los programadores de PLC (Programmable Logic Controller) expresar y ejecutar la lógica que resuelve una problemática o desarrolle un cálculo matemático correspondiente a una planta o proceso industrial” (Páez-Logreira, Zamora-Musa, & Bohórquez-Pérez, 2015).



**Ilustración 7. Ejemplo de programa realizado en FUP (bloques de función).**

Fuente: Propia

Entre algunos de los lenguajes más comunes para la programación de los PLC se puede mencionar lenguajes como KOP (escalera o ladder), AWL (lista de instrucciones), CFC (cuadro continuo de funciones), FUP (bloques de función) y SCL (texto estructurado). Los lenguajes más comunes son LADDER, FUP y SCL. En muchos software de programación se pueden combinar estos lenguajes para crear un mismo programa ya que algunos presentan ventajas sobre otros en ciertas circunstancias. Para este proyecto la mayoría de la programación se realizó en FUP por la facilidad de uso y por la disponibilidad de librerías útiles para el desarrollo del programa. En la Ilustración 7 puede apreciarse un ejemplo claro de un programa realizado en bloques de función desarrollado en el programa PC WORX. Este programa fue utilizado para realizar la programación de este proyecto.

### **3.7 HMI (INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA)**

Todo sistema necesita algún medio de comunicación entre la máquina y el operario. Es por esta razón, la interfaz entre el hombre y la máquina que se desea monitorear o controlar ha venido a ser muy importante en los sistemas de control. A esa interfaz comúnmente se le conoce por el nombre de HMI (Human Machine Interface). "Comprende los sinópticos de control y los sistemas de presentación gráfica. La función de un Panel Sinóptico es la de representar, de forma simplificada, el sistema bajo control" (Rodríguez Penin, 2007, p. 35). En la Ilustración 8 podemos ver Es a través de la HMI que el operario puede interactuar con el sistema. La HMI es considerada una herramienta importante en la supervisión y mando de muchos sistemas. Aparte de esto, con ella la HMI se puede leer e interpretar el estado de la máquina. Esta información muchas veces se obtiene de los mismos sensores del sistema y de otros componentes como variadores. En muchas ocasiones la HMI es confundida con el SCADA, sin embargo, el SCADA simplemente es una combinación de muchos HMI. El SCADA es mucho más complejo y por lo general se opera fuera



del sitio donde está el equipo. La HMI muchas veces es únicamente para monitoreo local, especialmente para que los operarios tomen decisiones en sitio y que allí mismo puedan ver el estado del equipo.

Álvarez, Baquero, & Gómez (2015) afirman:

Los sistemas de interfaz entre el usuario y el equipo basados en paneles de control llenos de indicadores de control, interruptores e instrumentos de medición están siendo reemplazados por sistemas digitales que implementan el panel en la pantalla de una computadora o pantalla táctil. (p. 87)

Como se puede apreciar en la Ilustración 8, en una pantalla HMI se puede también graficar y así poder interpretar los datos en un periodo de tiempo. Esto también es de mucho uso para poder informar de fallas en el sistema. Las interfaces cada vez son más amigables y fáciles de comprender, quitándole complejidad a la operación de la maquinaria y proveyendo un mayor nivel de monitoreo al mismo tiempo.

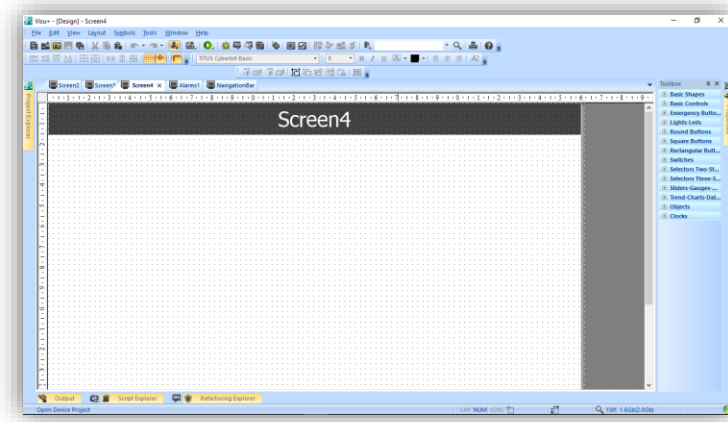


**Ilustración 8. Ejemplo de una pantalla HMI.**

Fuente: página oficial de Siemens

Existen muchos software de programación para el diseño y la creación de estas interfaces. Todos ofrecen las mismas opciones básicas y la mayoría permite tomar y arrastrar componentes en el área de trabajo para diseñar de una forma más libre. En estas pantallas se puede colocar textos, campos de texto, luces, switches, imágenes, botones, gráficas y tablas. También se puede variar las propiedades de estos componentes (como color, fuente, tamaño, etc.) como en cualquier software

de diseño. Entre algunos software para diseño de HMI se puede mencionar SIMATIC WinCC (TiaPortal) de Siemens, CODESYS Y Visu+ de Phoenix Contact. Este último fue el software utilizado en el desarrollo del proyecto.



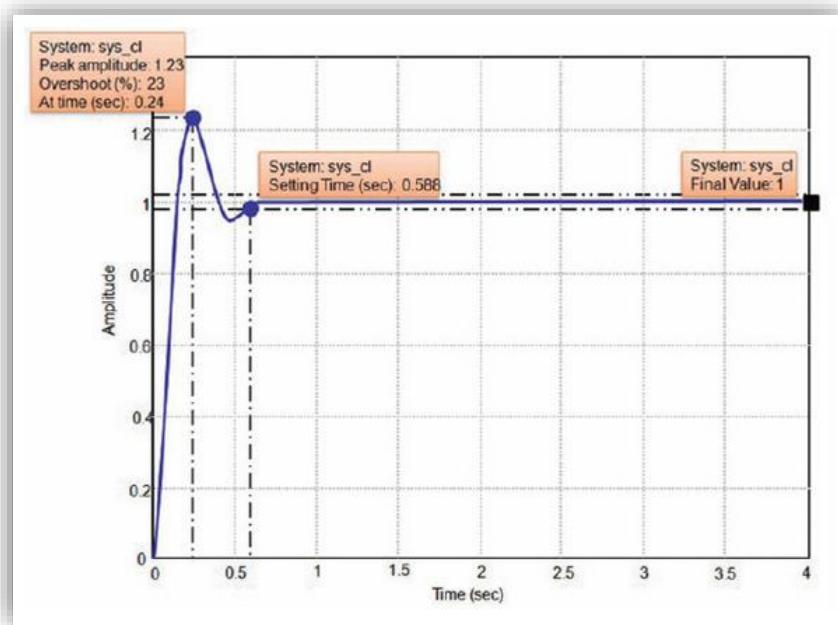
**Ilustración 9. Visu+ 2.50, software de programación para HMI.**

Fuente: Propia

### **3.8 CONTROLADOR PID**

En un proceso, “el controlador es el dispositivo responsable de elaborar la señal correctora que constantemente es enviada al elemento final de control del proceso, con el fin último de alcanzar, restablecer o mantener las condiciones de regulación deseadas” (Roca Cusido, 2014, p. 136). Existen muchos tipos de controladores, todos con diferentes características que suplen diferentes necesidades. Algunos de ellos son: proporcional (P), integral (I), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral-derivativo (PID). Para fines de este proyecto se utilizó el controlador PID.

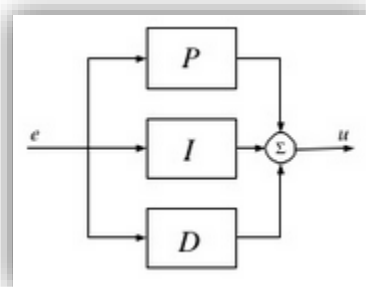
Según Muñoz Hernández, Muñoz Hernández, & Rivera Barrero (2014) el control PID “es el tipo de controlador más utilizado en la industria (más de 95% de ella lo utiliza)” (p. 39). En la Ilustración 10 se puede observar el comportamiento típico de un sistema controlado por un algoritmo de control PID.



**Ilustración 10. Respuesta típica de un controlador PID.**

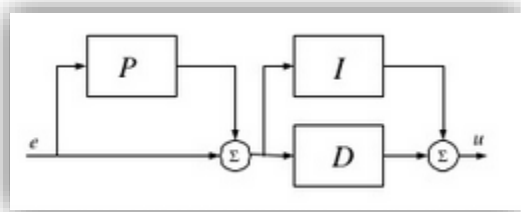
Fuente: (Muñoz Hernández et al., 2014)

Este controlador es comúnmente utilizado como regulador de alguna señal. Estos generalmente se dividen en dos grupos: los PID interactivos y los PID no interactivos. Por lo general la forma no interactiva es más fácil e intuitiva ya que se suman las tres acciones de control. En las Ilustraciones 11 y 12 muestran los dos tipos de controladores PID.



**Ilustración 11. Forma no interactiva del algoritmo de control PID.**

Fuente: (Améstegui Moreno, 2001)



**Ilustración 12. Forma interactiva del algoritmo de control PID.**

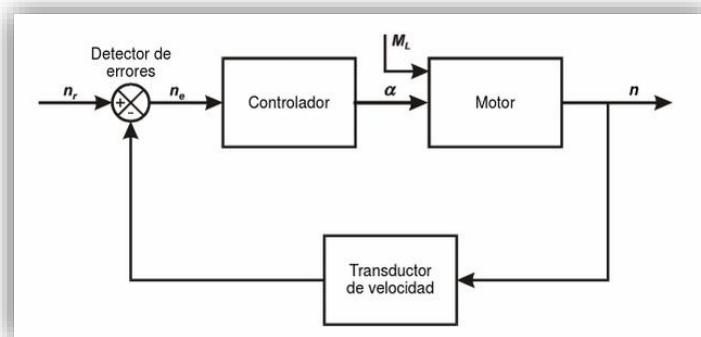
Fuente: (Améstegui Moreno, 2001)

### 3.8.1 SISTEMA DE LAZO CERRADO

Para entender los controladores PID es necesario primero entender que es un sistema de lazo cerrado.

Para obtener un control más preciso, la señal controlada  $y(t)$  debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del proceso una señal de control proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida, con el objeto de corregir el error o desviación. A los procesos con uno o más lazos de realimentación de este tipo se les llama procesos de lazo cerrado. (Navarro, 2012, p. 9)

Los procesos de lazo cerrado también son llamados procesos retroalimentados. Esta retroalimentación que también es una entrada de datos es de vital importancia ya que es la forma en que el sistema reconoce el error en la salida. Al saber el error en la salida se puede proceder a hacer el cambio para ajustar la salida al valor deseado. En la Ilustración 13 se puede observar un diagrama de bloques de un proceso de control retroalimentado.



**Ilustración 13. Ejemplo de un proceso de control de lazo cerrado.**

Fuente: (Navarro, 2012)

Los controladores PID son en esencia sistemas de lazo cerrado. Su característica de retroalimentación es la que le permite corregir los errores en el sistema al que se aplica.

### **3.8.2 FUNCIONES DE UN CONTROLADOR PID**

La función principal de un controlador PID es controlar la desviación que existe entre un valor medido y un valor deseado. Para que un PID funcione correctamente en un sistema también se necesita un sensor que haga la medición, un actuador y un controlador que accione el actuador.

Según (Ogata, 2010), los controladores PID son de mucha utilidad en cualquier lugar donde se necesite controlar un proceso debido a que no es necesario partir de un modelo matemático ya que muchas veces este es imposible de emplear. Es importante mencionar que el control proporcionado por un controlador PID no es exacto ni muchas veces óptimo, sin embargo, en la mayoría de los casos el control que provee es suficiente para las necesidades que presenta el proceso.

El control PID es muy utilizado en la industria por lo robusto del mismo. La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, ya que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria. En algunos casos el proceso es demasiado complejo para ser regulado por un PID.

Para este proyecto se utilizaron librerías del algoritmo de control PID para corregir la deficiencia de presión que se presentaba en la tubería al momento de aplicar una carga al sistema de alimentación de agua. Los operadores definen una presión a la que el sistema debe trabajar y el sistema debe ser capaz de mantener la presión en la tubería a la presión establecida aun cuando la demanda de agua en el sistema se eleve. Es aquí donde el controlador PID juega un papel importante ya que se

encarga de medir la diferencia entre el valor de presión medido por el sensor y el valor establecido y el mismo controlador realiza el cambio indicando que se deben accionar los variadores a cierta frecuencia para mover las bombas a una capacidad específica.

### **3.8.3 PARTES DE UN CONTROLADOR PID**

El controlador PID está compuesto por tres partes o acciones básicas: la parte proporcional, la parte integral y la parte derivativa.

#### *3.8.3.1 Acción Proporcional*

“El modo proporcional o control proporcional es aquella en que el elemento final de control efectúa, con referencia a una posición inicial correspondiente a una señal de error nula, un movimiento o carrera proporcional a la magnitud de la desviación” (Roca Cusido, 2014, p. 137). La acción proporcional es la encargada de ajustar la amplitud de la señal de error a los valores adecuados. Esta es el producto de la señal de error y una constante proporcional que intenta llevar el error al mínimo. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente.

$$u(t) = K_p * e(t)$$

#### **Ecuación 2. Acción de control proporcional.**

Fuente: (Roca Cusido, 2014)

En la Ecuación 2 se puede observar la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$ .

#### *3.8.3.2 Acción Integral*

El controlador integral hace que el elemento final de control se mueva a una velocidad que es proporcional a la señal de error. “Cuando se usa control integral,

la precisión aumenta cualitativamente: se eliminan los errores que hubiera, y se hacen finitos los errores infinitos" (Pagola, 2009, p. 125). Esta acción controla y disminuye el error producido por perturbaciones externas que no puede ser controlado por la acción proporcional. En la Ecuación 3 se puede observar la manera en que se expresa matemáticamente la acción integral.

$$I_{sal} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

**Ecuación 3. Acción de control proporcional.**

Fuente: (Pagola, 2009)

**3.8.3.3 Acción Derivativa**

"La acción derivativa proporciona una sobre corrección inicial cuando ocurre una desviación, por tanto, el elemento final de control se mueve en forma adelantada al principio como si la desviación de la variable hubiese sido de un salto. El efecto de la derivativa es adelantar la acción del elemento final de control" (Ávalos Arzate, Montúfar Navarro, & Ortiz Hernández, 2010, p. 50) Esta acción responde a la Ecuación 4 donde  $T_d$  es el tiempo derivativo.

$$\Delta y = GT_d \frac{de}{dt}$$

**Ecuación 4. Acción de control derivativa.**

Fuente: (Pagola, 2009)

Navarro (2012) afirma: "El efecto de la función de control derivativo sobre un proceso de control es la amortiguación de la respuesta transitoria del sistema, pero no corrige el error en estado" (p. 176).

### 3.8.4 SINTONIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PID

Para poder diseñar un controlador que realice cierta función de una forma correcta es necesario elegir los parámetros correctos. Por lo general, esto se realiza convirtiendo la planta que será controlada en un modelo matemático. Cuando la planta es demasiado complicada al punto que no es posible realizar un modelo matemático, se opta por un método analítico par el diseño del controlador. "El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador" (Ogata, 2010, p. 568).

Sin esta sintonización, los valores que el PID entregue serán erróneos por lo que la sincronización y ajuste es de mucha importancia. Cabe mencionar que esta sincronía no es nada sencillo. Es más, Ávalos Arzate et al. (2010) afirma:

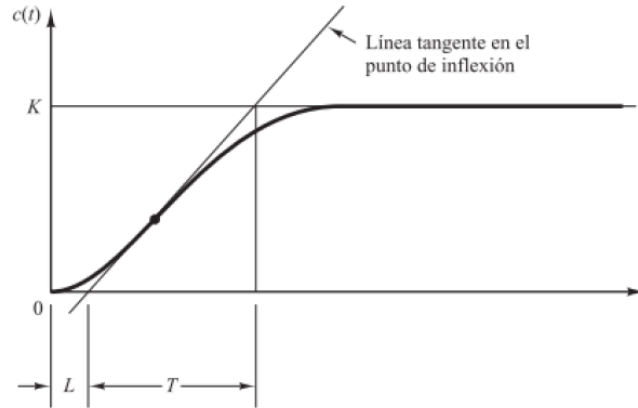
Al aplicar los controladores industriales, la mayor dificultad consiste en fijar los valores adecuados de la ganancia (la inversa de la banda proporcional), la integral (llamada también reajuste automático o reset) y la derivativa (anticipatoria o rate) para obtener la combinación óptima de un controlador PID" (p. 75).

Dos Ingenieros de Control, John G. Ziegler y Nathaniel B. Nichols, propusieron reglas para la sincronización de PID llamado el método Ziegler-Nichols el cual es muy común hasta el día de hoy. Estas reglas también han servido como la base para otros métodos de sincronización. La regla de Ziegler-Nichols es una regla de ajuste de PID que intenta generar buenos valores para los tres parámetros de ganancia de PID: la ganancia de la trayectoria del controlador ( $K_p$ ), la constante de tiempo del integrador del controlador ( $T_i$ ) y la constante de tiempo derivada del controlador ( $T_d$ ). Las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols se dividen en dos métodos.

"En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental. Si la planta no contiene integradores ni polos



dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener la forma de S'' (Ogata, 2010). (Ver Ilustración 14)



**Ilustración 14. Curva de respuesta en forma de S.**

Fuente: (Ogata, 2010)

Para la obtención de una buena sincronización, en este método se sugirieron los valores de la Tabla 1 para el controlador.

**Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols primer método.**

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: (Ogata, 2010)

Utilizando estos valores, a sintonización de Ziegler-Nichols por el primer método resulta en la siguiente expresión:

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

$$G_e(s) = 1.2 \frac{T}{L} \left( 1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right)$$

$$G_e(s) = 0.6T \frac{\left( s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}$$

Fuente: (Ogata, 2010)

De esta expresión se puede apreciar que el controlador posee un polo en el origen y un cero doble en  $s = -1/L$ .

Según Ogata (2010):

El segundo método consta de hacer  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ . Usando solo la acción de control proporcional, se incrementa  $K_p$  desde 0 hasta un valor crítico  $K_{cr}$ , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar  $K_p$ , entonces este método no se puede aplicar). Así, la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo  $P_{cr}$  correspondiente se determinan experimentalmente.

**Tabla 2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols segundo método.**

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	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: (Ogata, 2010)

Los valores sugeridos para los parámetros se pueden ver en la Tabla 2.

El resultado del segundo método se puede a continuación:

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

$$G_e(s) = 0.6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right)$$

$$G_e(s) = 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}}\right)^2}{s}$$

Fuente: (Ogata, 2010)

Este resultado nos indica que el controlador PID también tiene un polo en el origen. Sin embargo, tiene un cero doble en  $s = -4/P_{cr}$ .

## **IV. METODOLOGÍA**

La investigación es crucial al momento de realizar un proyecto. Es aquí donde la metodología juega un papel importante ya que precisa la forma y diseño que se le dio a la investigación. "Podemos definir la metodología como la descripción, el análisis y la valoración crítica de los métodos de investigación" (Asti Vera, 2015, p. 12). Esta nos ayuda a enfocarnos en las cosas que son importantes en la investigación y resolución del problema. La metodología incluye elementos como la hipótesis, variables dependientes e independientes, método, enfoque, las maneras de recolección de datos y el cronograma. A continuación, se exponen estos puntos.

### **4.1 VARIABLES**

En toda investigación las variables de estudio son de mucho interés ya que estas son las que afectan el resultado de nuestro proyecto. No solamente influyen estas sobre el proyecto, sino que en muchos casos también se quiere controlar una o varias de estas variables. Entender cuáles son las variables importantes para el proyecto es vital para poder realizar una investigación enfocada. Las variables se clasifican en dos grupos: dependientes e independientes. "La variable que el investigador desea explicar se considera como la variable dependiente. La variable que explique el cambio de la variable dependiente es referida como la variable independiente" (Namakforoosh, 2005).

#### **4.1.1 VARIABLES DEPENDIENTES**

Para este proyecto surgen dos variables dependientes específicas las cuales son las que se interesa controlar, se trata de la presión y la frecuencia. La presión es la variable más importante en este proyecto por lo que su monitoreo es de suma importancia. Si bien es cierto que la presión dependerá de la frecuencia que se

suministre a los variadores (que a su vez controlan el motor de cada bomba), la frecuencia también del estado del sistema y de la presión misma en ciertos casos, por lo que también se incluye con las variables dependientes.

#### **4.1.2 VARIABLES INDEPENDIENTES**

Las variables independientes de este proyecto son mucho más amplias que las dependientes, sin embargo, son vitales para el desarrollo del proyecto. Primero, la demanda en planta es una variable importante de estudio ya que muchas cosas en el sistema dependen de la carga o demanda que se requiera en un preciso momento. Durante el desarrollo del proyecto surgió otra variable independiente que no estaba contemplada desde el inicio, se trata del suministro de agua. De este depende todo el sistema ya que sin el correcto suministro de agua el sistema es inútil.

#### **4.2 MÉTODO Y ENFOQUE**

El método no es más que el camino lógico que se sigue para llegar a una meta u obtener algo. De esta manera se trabaja con un orden lógico que lleva a conclusiones precisas, ya sea confirmando o no la hipótesis. Para el presente proyecto se eligió trabajar con el método científico por la flexibilidad y confiabilidad de este. Al seguir los pasos de dicho método fue posible llegar a las conclusiones de este proyecto.

El enfoque también es importante ya que nos da la visión clara y concisa de exactamente a que queremos llegar y como lo haremos. Este estará determinado por dos características: el enfoque cualitativo y el enfoque cuantitativo.

Por un lado, tenemos el enfoque cualitativo el cual está basado en datos no relacionados con ninguna medición que involucre números. Este enfoque solamente se basa en el uso de descripciones y observaciones. Las conversaciones

con los operarios del sistema y los administradores de este fueron claves para el desarrollo del proyecto y es un claro ejemplo de un método no numérico de obtención de datos e información.

Por otro lado, tenemos el enfoque cuantitativo que es el enfoque con el que más estamos familiarizados. Ese si utiliza la recolección y análisis de datos de una forma numérica y cuantificable.

### **4.3 FUENTES DE INFORMACIÓN**

La búsqueda de información en toda investigación en muchas ocasiones define la calidad de la investigación. Esta búsqueda de información debe realizarse de las fuentes correctas para poder realizar una investigación precisa y de la mejor calidad. Para realizar esto fue necesario recopilar información de múltiples fuentes. Estas fuentes se clasifican en primarias y secundarias. Las primarias son el resultado de un trabajo intelectual, nuevo y original, mientras que las secundarias se utilizan para organizar de una mejor manera las ideas e información por medio de un análisis más profundo. A continuación, se detallan las fuentes de información utilizadas, tanto primarias como secundarias.

Fuentes primarias:

- Libros físicos relacionados con el tema

- Libros electrónicos recopilados del CRAI

- Revistas científicas electrónicas recopiladas de ProQuest

Fuentes secundarias:

- Manuales técnicos

- Tesis de referencia

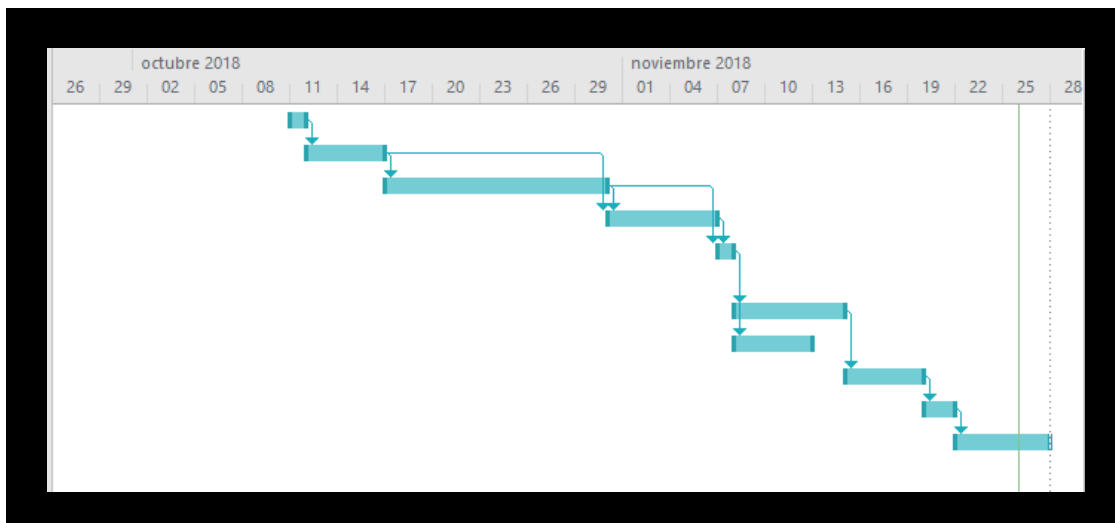
## 4.4 CRONOGRAMA

Para mantener un orden en el proyecto se propuso un cronograma para el desarrollo de este (Ver Ilustración 15). Este cronograma sufrió cambios leves debido a los imprevistos que surgieron durante el proyecto. En la Ilustración 16 puede apreciarse el diagrama de Gant de las actividades clave.

	Nombre de tarea	Durac	Comienzo	Fin	Predecesoras
1	Levantamiento del proyecto	1 día	jue 11-10-18	jue 11-10-18	
2	Organización del proyecto	3 días	vie 12-10-18	mar 16-10-18	1
3	Programacion PLC	2 sem.	mié 17-10-18	mar 30-10-18	2
4	Diseño HMI	1 sem	mié 31-10-18	mar 06-11-18	2,3
5	Montaje de PLC, modulos I/O, pantalla HMI	1 día	mié 07-11-18	mié 07-11-18	3,4
6	Cableado	5 días	jue 08-11-18	mié 14-11-18	5
7	Montaje de sensores	3 días	jue 08-11-18	lun 12-11-18	5
8	Marcaje	3 días	jue 15-11-18	lun 19-11-18	6
9	Configuracion PLC y HMI	2 días	mar 20-11-18	mié 21-11-18	8
10	Pruebas y ajustes	4 días	jue 22-11-18	mar 27-11-18	9

**Ilustración 15. Cronograma de actividades**

Fuente: Propia



**Ilustración 16. Diagrama de Gant de las actividades.**

Fuente: Propia

## **V. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **5.1 ANÁLISIS**

#### **5.1.1 LINEALIZACIÓN DEL SENSOR**

La única variable que se mide con un sensor en este proyecto es la presión. Por lo mismo es necesario trabajar con cierta precisión para que el sistema esté funcionando como debe. Para este fin se utilizó un sensor de presión para uso industrial. Este sensor da una señal de salida de 4 a 20 mA. Esto es muy útil ya que es menos susceptible a los ruidos e interferencias en el sistema. Sin embargo, esta corriente debe ser interpretada y traducida por el PLC para que pueda ser utilizada en el programa para la toma de decisiones. Para esto, el PLC AXC1050 de Phoenix Contact utiliza lo que se denomina unidades digitales. En este PLC en específico, las unidades digitales van desde 0 hasta 30,000 unidades.

Es así como el PLC traduce la señal eléctrica (corriente del sensor) en unidades digitales con las cuales se puede trabajar más fácilmente en el programa. La forma en la que el PLC realiza esto es mediante la linealización de la señal de entrada. Para realizar esta linealización se vio necesario realizar ciertos cálculos matemáticos para determinar qué valor de corriente corresponde con qué valor de presión expresado en psi.

Para realizar el cálculo se necesita saber tres factores. Primero la señal de entrada la cual se ha mencionado que es de 4 a 20 mA. Asimismo, es importante saber que las unidades digitales en el PLC van desde 0 hasta 30,000 unidades digitales. Por último, es importante conocer el rango de medición del sensor que en este caso es de 0 a 100 psi.

La linealización no es más que el proceso de encontrar la aproximación lineal a una función en un punto dado. Para la linealización de este proyecto se utilizó la



ecuación de la recta. La Ecuación 5 muestra la ecuación general de la recta. Esta se utiliza cuando se conocen dos puntos en la recta. La pendiente de la recta se expresa con la letra  $m$ . La coordenada en el eje  $y$  de la intersección en  $y$  se expresa con la letra  $b$ . Para realizar la linealización de tomo el eje  $y$  como la lectura de la presión por el sensor y el eje  $x$  como las unidades digitales.

$$(y - y_0) = m(x - x_0) + b$$

#### **Ecuación 5. Ecuación de la recta**

La pendiente de la recta se calcula utilizando la Ecuación 6.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

#### **Ecuación 6. Pendiente de una recta**

Sabiendo los rangos de unidades digitales y presión con los que se trabajaría se procedió a calcular la pendiente de la recta utilizando la Ecuación 6.

$$m = \frac{100 - 0}{30,000 - 0}$$

$$m = \frac{1}{300} = 0.0033$$

Luego de haber calculado la pendiente de la recta se procedió a derivar una expresión para convertir las unidades digitales en psi. Es importante mencionar que tanto las unidades digitales como el rango de psi del sensor empiezan en 0 UD y 0 psi respectivamente. Utilizando la Ecuación 6 se llegó a una expresión para la linealización del sistema.

$$(y - 0) = \frac{1}{300}(x - 0)$$

$$y = \frac{1}{300}x$$

Con el cálculo anterior nuestra linealización de señal quedó establecida, con esto podemos obtener la lectura de presión exacta, sabiendo que "y" es la lectura de presión y "x" la cantidad de unidades digitales interpretadas por el PLC.

### 5.1.2 TURNOS EN USO DE BOMBAS

Las bombas son una parte esencial de este sistema de suministro de agua y por lo mismo es importante mantenerlas en optimas condiciones para rendir el mayor tiempo posible. Para este fin se analizó la manera en la que esto se podía realizar. La idea propuesta se centra en realizar cambios de turnos con las bombas disponibles en cada cuarto. Como se ha mencionado anteriormente, cada cuarto cuenta con tres bombas. En la Tabla 3 se puede muestra gráficamente el análisis.

**Tabla 3. Análisis de mejora en vida útil de bombas.**

Funcionalidad \ Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Anteriormente												
Con Turnos												

Usando la Tabla 3 fácilmente se puede ver que en un espacio de 12 días la misma bomba se utilizaría únicamente 4 días en vez de los 12 días. A continuación, se muestra el análisis numérico realizado.

$$\frac{\text{Días en uso despues de la mejora}}{\text{Días en uso sin mejora}} = \frac{4 \text{ días}}{12 \text{ días}} = \frac{1}{3} = 33.3\%$$

$$100\% - 33.3\% = 66.7\%$$

Por lo tanto, el uso de las bombas se redujo en un 66.7% comparándolo a lo que anteriormente se realizaba.

## **5.2 RESULTADOS**

A continuación, se detallará el resultado del trabajo en este proyecto el cual se consistió en dos partes: el desarrollo de la HMI y el desarrollo del programa. También se expondrá el resultado de las pruebas realizadas.

### **5.2.1 RESULTADOS DE DESARROLLO DE HMI**

Como se ha mencionado anteriormente, la HMI se desarrolló en el programa Visu+ versión 2.50. Se diseñó una interfaz para los tres cuartos de bombas. Es decir, se utilizó el mismo programa y pantallas para los tres casos, por lo que no se hará mención del lugar en donde estaban instalados. El diseño de la interfaz se divide en cuatro partes principales. A continuación, se detalla el diseño y la aplicación de cada pantalla.

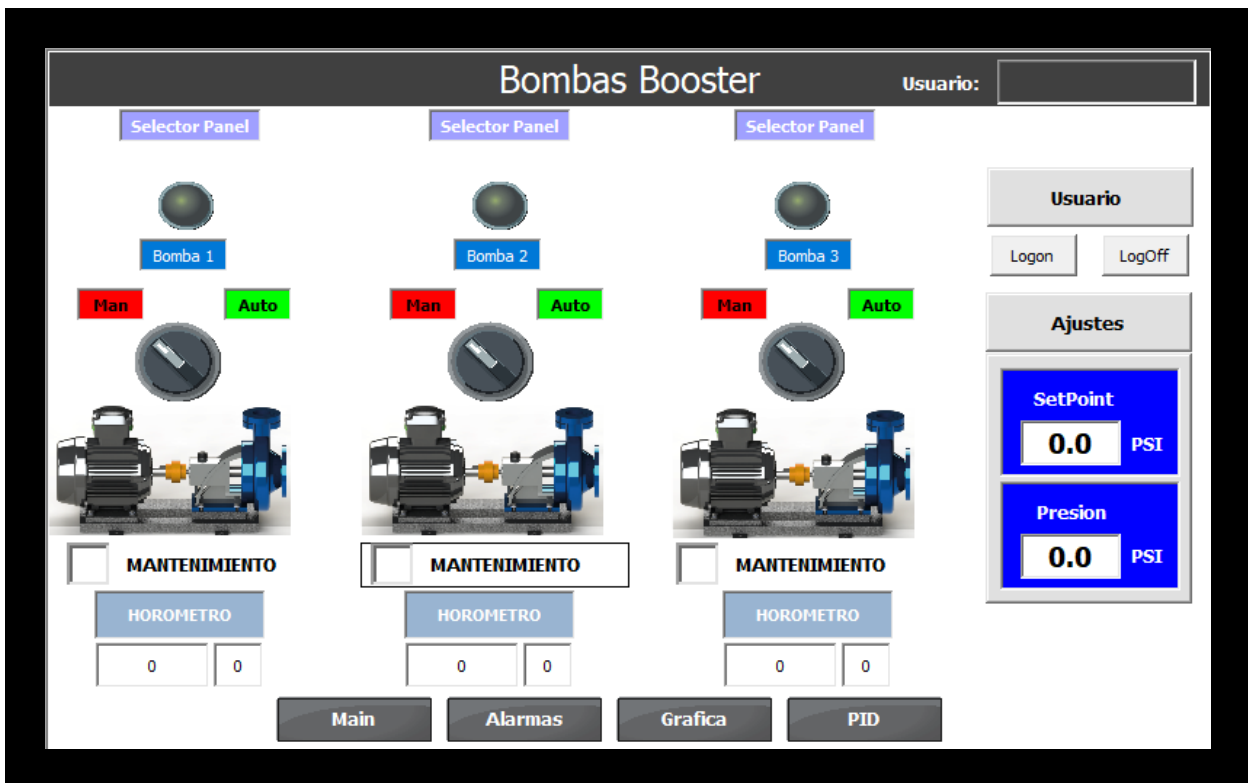
#### *5.2.1.1 Pantalla Principal*

La pantalla principal, "Main", es la pantalla donde sucede gran parte de la acción. (Ver Ilustración 17) La mayor parte del monitoreo del sistema se realiza desde esta parte.

En esta pantalla se pueden visualizar los tres motores de las bombas así como su estado (al cambiar de color). El sistema ya contaba con selectores físicos instalados en una fase anterior del proyecto. A estos únicamente se les agregaron contactos por estribo para poder utilizarlos para esta aplicación. El estado de estos selectores se indica bajo el título "Selector Panel" por medio de una luz y su estado (manual/automático). Por motivos de seguridad también se agregó un selector en la pantalla el cual permite cambiar el sistema entre automático a manual.

Esta pantalla es importante porque aquí se ajusta la presión deseada y se visualiza la presión actual en el sistema. También se puede visualizar las horas que el motor

ha estado trabajando desde que el proyecto se echó a andar. Tiene además la opción de deshabilitar las bombas por mantenimiento. Desde aquí también es posible iniciar sesión al sistema, tanto como operador o como administrador. Por último, también se pueden visualizar si hay fallas en los motores o sensor de presión, aunque cabe mencionar que solamente es un indicador visual y no indica cuál es el error.

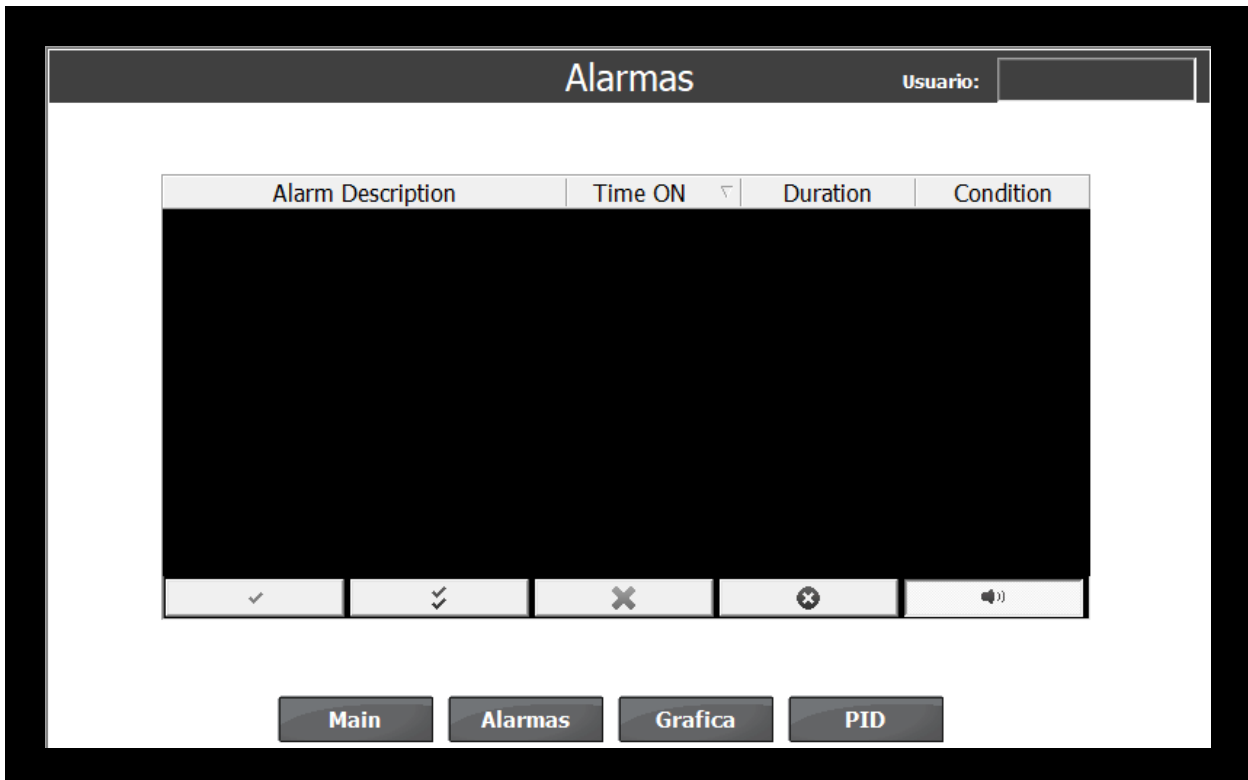


**Ilustración 17. Pantalla Principal "Main"**

Fuente: Propia

### 5.2.1.2 Pantalla Alarmas

La pantalla de alarmas es simplemente una tabla con el historial de fallas ocurridas en el sistema según se puede apreciar en la Ilustración 18.

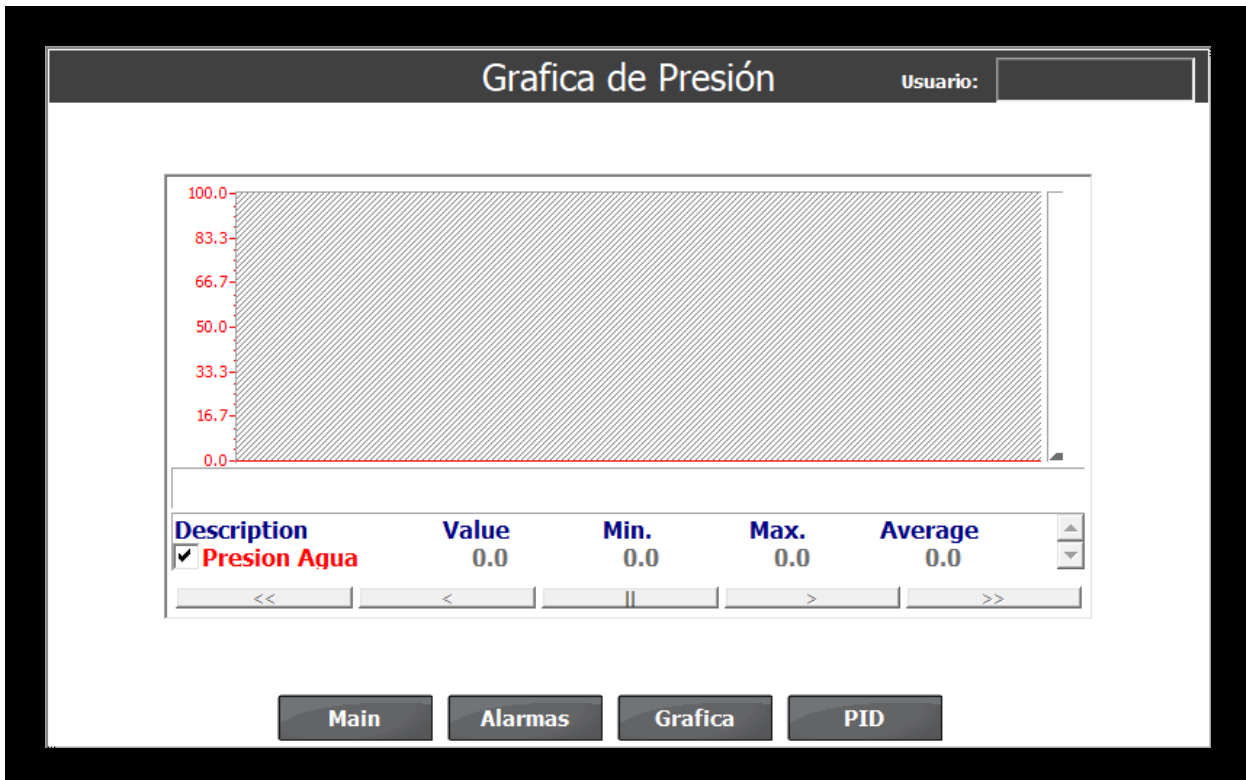


**Ilustración 18. Pantalla de Historial de Alarmas**

Fuente: Propia

### 5.2.1.3 *Pantalla de Gráfica de Presión*

Esta pantalla detalla la presión del agua durante cierto tiempo en forma de gráfica. Además de representar la presión en una gráfica de línea, esta pantalla provee el valor actual de presión así como el valor mínimo, máximo y promediado que se haya alcanzado mientras esta pantalla estuviera seleccionada. Cabe mencionar que esta pantalla no guarda datos. Es decir, mientras esta pantalla no está seleccionada estos datos no se guardan en memoria. Solamente cuando esta pantalla está seleccionada es que la gráfica se forma y los datos antes mencionados son calculados. (Ver Ilustración 19)

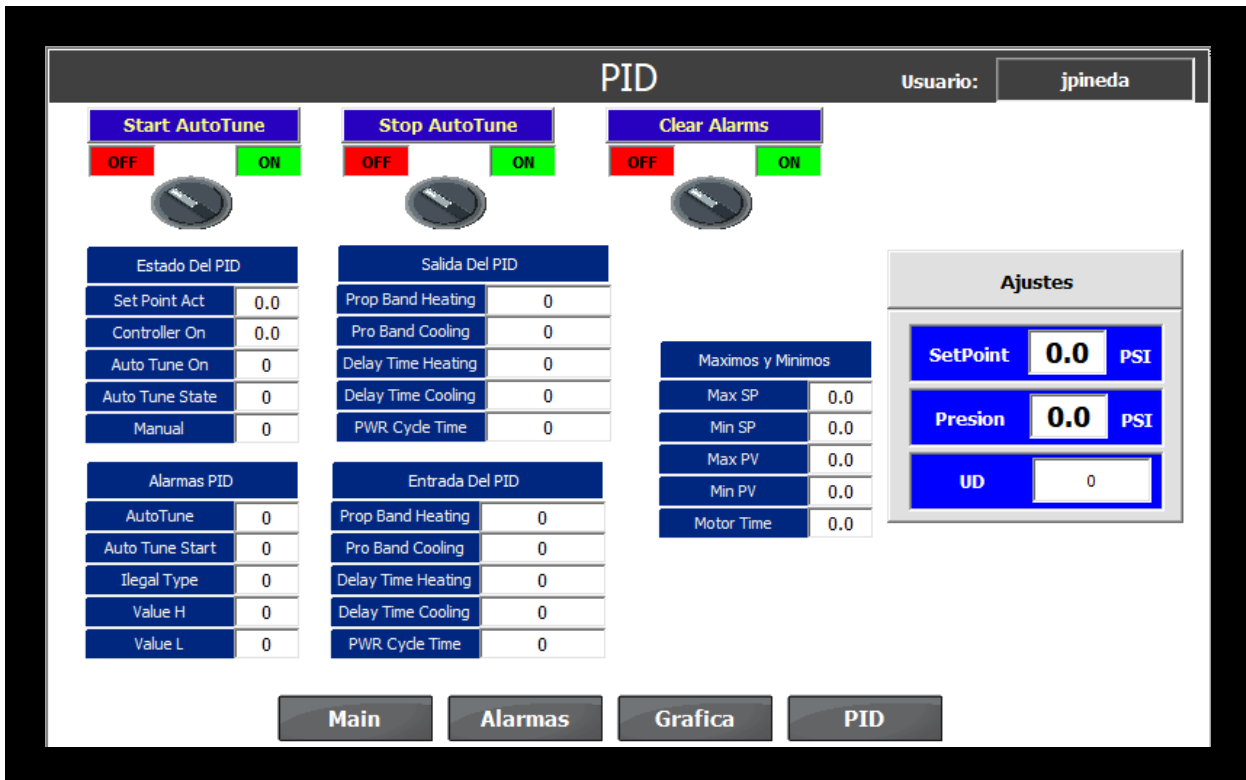


**Ilustración 19. Pantalla de Gráfica de Presión**

Fuente: Propia

#### 5.2.1.4 Pantalla de Ajustes de PID

Es aquí donde el administrador puede hacer cambios al PID en sí. Cabe mencionar que solamente el administrador puede acceder a esta parte de la HMI. Ningún operario puede manipular estos datos sin consentimiento del administrador. Para esto debe iniciar sesión en la Pantalla “Main” con el usuario y contraseña asignada al administrador. Aquí también se visualiza el estado del PID y sus datos como las unidades digitales (UD) por ejemplo. Desde aquí también es posible hacer el AutoTune del PID. (Ver Ilustración 20)



**Ilustración 20. Pantalla de Ajustes de PID**

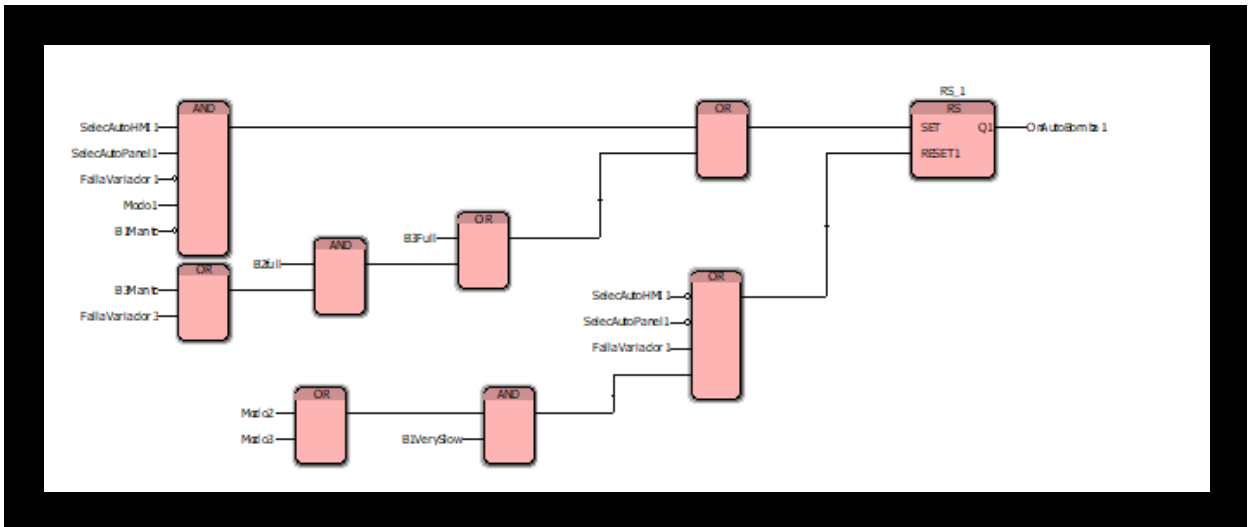
Fuente: Propia

## 5.2.2 PROGRAMACIÓN

A continuación, se mostrará el producto final de la programación realizada para este proyecto. Solamente se programaron tres diferentes archivos para realizar el proceso completo. Cabe mencionar que se utilizó la misma programación para los tres cuartos de bombas.

### 5.2.2.1 Main

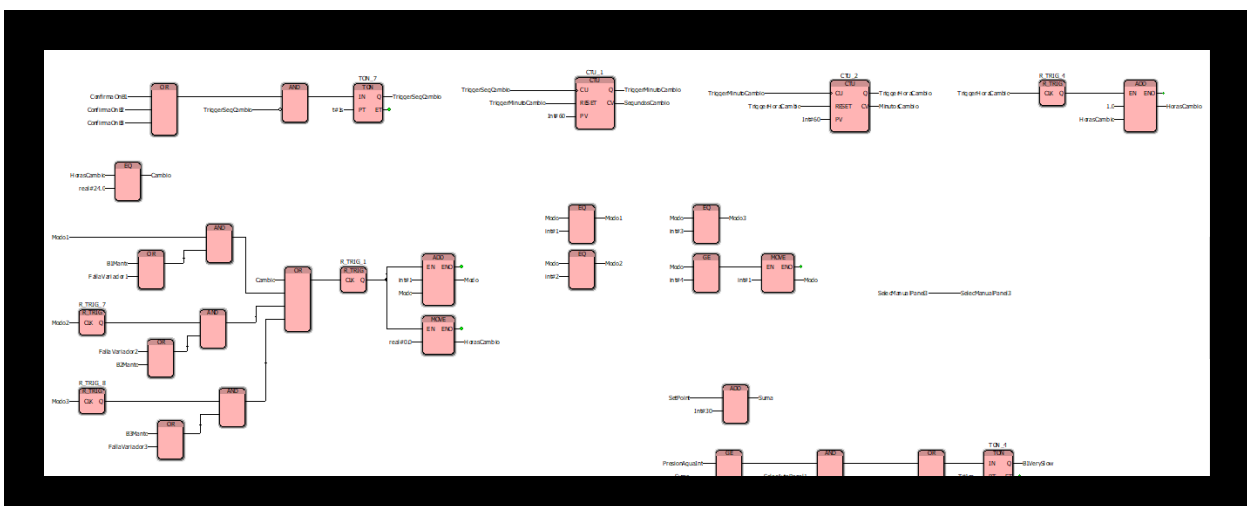
En este archivo principal se colocó la lógica permite la habilitación de bombas. Es decir, no encender las bombas en si sino únicamente habilitarlas para activacion posterior por parte del PID. Esto se hizo para las tres bombas. En la Ilustración 21 se puede apreciar la lógica para una sola bomba.



**Ilustración 21. Habilitación de bombas.**

Fuente: Propia

En esta parte del programa también se realizó la lógica de los cambios de turno de las bombas. Se programó de tal manera que siempre esta una bomba activa (bomba maestra) y si la carga en la planta es muy grande o la presión en el sistema se reduce, se agregan las demás bombas según sea necesario. (Ver Ilustración 22)

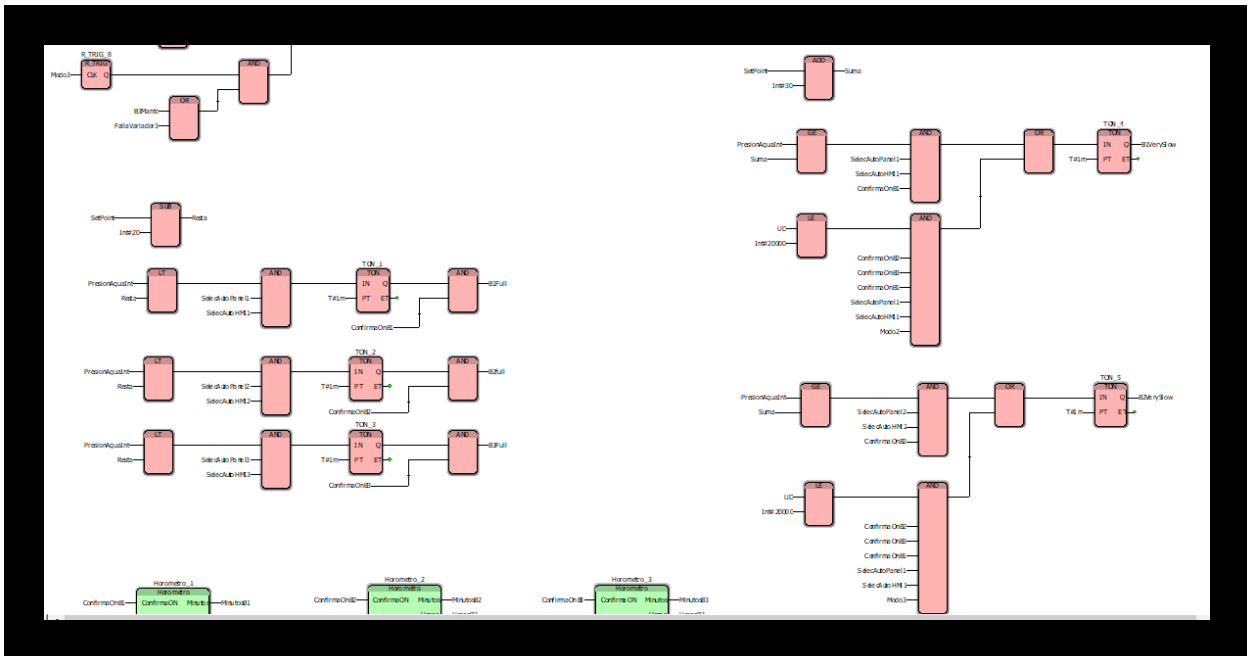


**Ilustración 22. Cambio de turnos de bombas en Main.**

Fuente: Propia



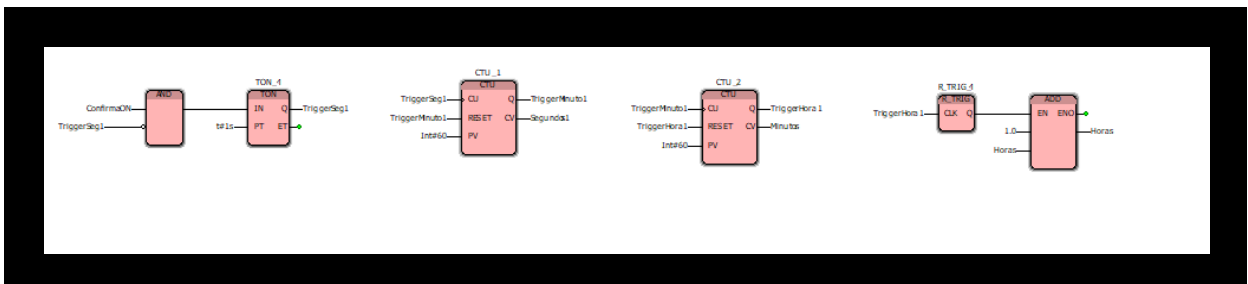
Finalmente, esta parte del programa también está encargada de deshabilitar las bombas cuando ya no son necesarias. Aquí también se instanciaron los horómetros de cada bomba y se manejaban las actividades de sus selectores. (Ver Ilustración 23).



**Ilustración 23. Deshabilitación de bombas y horómetros en Main.**

Fuente: Propia

### 5.2.2.2 Horómetro



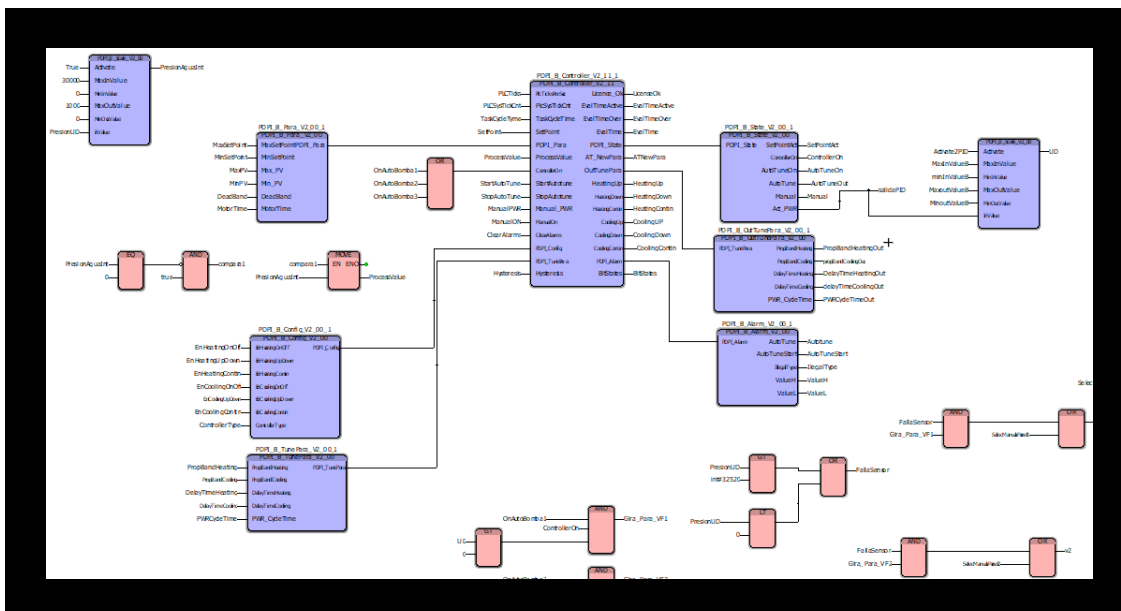
**Ilustración 24. Horómetro**

Fuente: Propia

La función de horómetro es relativamente sencilla. Esta simplemente cuenta el tiempo que una bomba está encendida. Este dato se despliega en la pantalla HMI y ayuda a programar los tiempos de mantenimiento. (Ver Ilustración 24)

### 5.2.2.3 PID

En esta función se utiliza una librería que realiza el control PID. Es aquí donde realmente se controla la velocidad de los motores al indicarle la frecuencia a la que el variador debe trabajar. Esta frecuencia se ajusta por medio de las unidades digitales que el PID genera. (Ver Ilustración 25) Aquí también se lee la presión del sistema y se toma las decisiones necesarias para mantenerla en el punto que se ha indicado en la pantalla HMI.



**Ilustración 25. Función PID**

Fuente: Propia

Es así como este programa mantiene un sistema balanceado y eficiente. Por una parte, la programación con la librería del controlador PID fue clave para mantener la presión en el sistema constante. Por el otro lado, también se realizaron los cambios de turno de las bombas para incrementar la vida útil de las bombas y la eficiencia en general del sistema.

## VI. CONCLUSIONES

Para finalizar la presente investigación es necesario dejar plasmadas las conclusiones obtenidas a través del desarrollo e investigación del proyecto. "Con este paso se cierra el ciclo que empezó cuando el investigador se hizo la pregunta primaria" (Tena Suck & Turnbull Plaza, 2001, p. 66).

A continuación, las tres conclusiones obtenidas para dar por concluida la investigación.

- En los tres cuartos de bombas se determinó que la presión óptima de trabajo era de 25 psi con un  $\pm 5\%$  margen de error. El controlador PID utilizado es capaz de mantener dicha presión estable. Cuando la presión baja por cualquier motivo el PID es rápido en responder para compensar en la caída de presión.
- Debido a que se programaron turnos de 24 horas para la operación de las bombas, el tiempo de uso se redujo en un 66.7% ya que las bombas no están encendidas todo el tiempo. Esto incrementa el rendimiento y la vida útil de las bombas.
- El personal de la planta de Elcatex se adaptó muy fácilmente al sistema automático ya que han tenido experiencias previas con sistemas similares. Asimismo, expresaron lo intuitivo de las pantallas y el manejo fácil del sistema.

## VII. RECOMENDACIONES

### Hacia la empresa

El desarrollo del proyecto fue realizaba bajo el nombre de la empresa R y D Industrial, para ser implementado en Elcatex, por lo que se plantean recomendaciones relacionadas con cada una de ellas.

1. A la empresa Elcatex, se le recomienda mejorar el suministro de agua de todos los cuartos de bombas ya que, si los tanques recolectores de agua no están lo suficientemente llenos, el sistema tiende a quedarse sin agua rápidamente. En ocasiones esto no permite al sistema trabajar a su máxima capacidad.
2. Primero que nada, muchas gracias a la empresa R y D Industrial por permitirme realizar la practica con su equipo de trabajo. Ha sido una experiencia de mucho valor. Como sugerencia, yo recomiendo que se organice de una mejor manera la forma en la que los proyectos son manejados por los diferentes Ingenieros de Proyectos. Es decir, sugiero la implementación de un sistema/historial que indique el estado del proyecto tal como: quien está asignado al proyecto (vendedor e ingeniero), fecha de inicio, fecha de finalización, estado presente del proyecto y otros datos importantes concernientes al proyecto. También se podría implementar en dicho historial un reporte de las actividades diarias realizadas en el proyecto todo esto con el fin de aprovechar mejor el tiempo y los recursos disponibles.
3. A la empresa R y D Industrial también se le recomienda capacitar con regularidad a su personal de proyectos para poder estar prestar un mejor servicio a los clientes aplicando las mejores prácticas y tecnologías disponibles en el mercado.

## **Hacia la universidad**

Los conocimientos desarrollados a través de los años cursados en la universidad fueron muy valiosos durante el desarrollo de este proyecto. Sin embargo, hay algunos temas en los que se sintió cierta deficiencia los cuales si se integraran más en el salón de clases pudieran ser de mucho enriquecimiento para futuras generaciones de estudiantes de la carrera. A continuación, expongo algunos temas y puntos que creo importantes mencionar.

1. SCADA y HMI: El uso de sistemas SCADA y sistemas de monitoreo con HMI en la industria está cada vez en mayor demanda en la industria. Actualmente en la universidad no se imparte ningún curso que introduzca a los alumnos de Ingeniería en Mecatrónica al diseño, programación y uso general de esta herramienta tan ampliamente utilizada. La impartición de este tema seria de mucha utilidad.
2. Sensórica: Es muy cierto que existe una grandísima variedad de sensores y que es imposible conocerlos todos ni mucho menos todas las aplicaciones. Sin embargo, si es necesario asentar una mejor base de sensórica. Cosas básicas como conocer aplicaciones reales de sensores, para que sirven ciertos sensores y donde se pueden aplicar, así como las ventajas y desventajas de cada uno serian de gran beneficio.
3. Redes Industriales: Aunque en este proyecto no se vio necesario utilizar protocolos de comunicación, si he notado que son utilizados en la gran mayoría de los proyectos. Lastimosamente, las bases de redes industriales y protocolos de comunicación impartidas en la universidad son muy pobres para lo que la industria requiere.

4. Experiencia: Se recomienda que más clases sean enfocadas en “aprender haciendo” ya que esta es la forma en la que mejor se puede aprender.

## VIII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Álvarez, C. M. B., Baquero, J. E. M., & Gómez, C. T. (2015). Sistema Scada de Variables FísicoQuímicas en un Separador de Mezclas. *INGE CUC*, 11(1), 85–98.

Améstegui Moreno, M. (2001). Apuntes de Control PID. Universidad Mayor de San Andres.

Asti Vera, A. (2015). *Metodología de la investigación*. Sevilla, SPAIN: Athenaica Ediciones Universitarias. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=4870170>

Ávalos Arzate, G., Montúfar Navarro, M. A., & Ortiz Hernández, F. E. (2010). *Teoría de control, ajuste de controladores industriales*. México, D.F., MEXICO: Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3187638>

BCH, B. C. de H. (2018). Informe de Bienes para Transformación y Actividades Conexas Anual 2017. BCH. Recuperado de [http://www.bch.hn/download/maquila/informe\\_bienest2017.pdf](http://www.bch.hn/download/maquila/informe_bienest2017.pdf)

Daneri, P. A. (2008). *PLC: automatización y control industrial*. Buenos Aires, ARGENTINA: Editorial Hispano Americana HASA. Recuperado de



<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3183744>

Escalona, I. (2007). *Transductores y sensores en la automatización industrial*. Buenos Aires, ARGENTINA: El Cid Editor. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3173569>

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C. (2017). Propiedades del agua. Recuperado el 17 de noviembre de 2018, de <https://agua.org.mx/propiedades-derl-agua/>

Fraile Mora, J. (2008). *Máquinas eléctricas* (6a ed.). Madrid, SPAIN: McGraw-Hill España. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3195345>

Garcés Giraldo, L. F., Hernández Ángel, M. L., Peñuela Mesa, G. A., Rodríguez Restrepo, A., & Salazar Palacio, J. A. (2005). Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de... *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1). Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/695/69520103/>

González Santander Martínez, J. L., & Castellano Estornell, G. (2014). *Fundamentos de mecánica de fluidos*. Alicante, SPAIN: ECU. Recuperado de

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3224903>

Kirkpatrick, L. D., & Francis, G. E. (2012). *Física Una Mirada al Mundo Edición Abreviada* (1a ed.). México: Cengage Learning Editores. Recuperado de [https://bibliotecavirtual.cengage.com/books/377-fisica?library\\_id=277](https://bibliotecavirtual.cengage.com/books/377-fisica?library_id=277)

Medina, J. L., & Guadayol, J. M. (2010). *La automatización en la industria química*. Barcelona, SPAIN: Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3429967>

Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño* (3a ed.). Sunny Isles Beach, UNITED STATES: McGraw-Hill España. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=4586428>

Moreno García, E. (1999). *Automatización de procesos industriales*. Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València.

Mott, R. L. (2015). *Mecánica de Fluidos* (7a ed.). México: Pearson Educación. Recuperado de <https://www.biblionline.pearson.com/Pages/BookDetail.aspx?b=1720>

Muñoz Hernández, J. A., Muñoz Hernández, L. A., & Rivera Barrero, C. A. (2014).

*Control automático I: estrategias de control clásico*. Ibagué, COLOMBIA: Sello Editorial Universidad del Tolima. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=4909273>

Namakforoosh, M. N. (2005). *Metodología de la Investigación* (2a ed.). México: Editorial Limusa.

Navarro, J. A. (2012). *Sistemas de medida y regulación*. Barcelona, SPAIN: Cano Pina. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3226907>

Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5a ed.). Madrid, SPAIN: Pearson Educación. Recuperado de <https://www.biblionline.pearson.com/Pages/BookDetail.aspx?b=909>

Páez-Logreira, H. D., Zamora-Musa, R., & Bohórquez-Pérez, J. (2015). Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder y Lenguaje de Control

Estructurado (SCL) en MATLAB/Programming logic controllers (PLC) using ladder and structured control language (SCL) in MATLAB/Programação de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder e Linguagem de Controle Estructurado (SCL) em MATLAB. *Revista Facultad de Ingenieria; Tunja, 24(39)*, 109–119.

Pagola, L. L. (2009). *Regulación automática*. Madrid, SPAIN: Universidad Pontificia Comillas. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3196406>

Pérez Sáinz, J. P. (1998). La nueva industrialización y el trabajo: Reflexiones desde Centroamérica. *Nueva Sociedad; Caracas, 158*, 160–172.

Rey S, W. O. (2009). Automatización industrial, evolución y retos en una economía globalizada. *Revista Inventum; Bogota, 4(6)*, 6–9. <http://dx.doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.4.6.2009.6-9>

Roca Cusido, A. (2014). *Control automático de procesos industriales: con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC*. Madrid, SPAIN: Ediciones Díaz de Santos. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3226592>

Rodríguez Penin, A. (2007). *Sistemas SCADA* (2a ed.). Barcelona, SPAIN: Marcombo.

Recuperado de

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3175459>

Salas Colotta, G. (2003). TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 5(2), 64–71.

Sánchez Domínguez, U. (2013). *Máquinas hidráulicas*. Alicante, SPAIN: ECU.

Recuperado de

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3213837>

Tena Suck, A., & Turnbull Plaza, B. (2001). *Manual de Investigación Experimental: elaboración de tesis*. México, D.F., MEXICO: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.

Recuperado de

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bvunitecvirtualsp/detail.action?docID=3220960>

## IX. ANEXOS

### Anexo 1. Cuarto de bombas agua caliente



Fuente: Propia

## Anexo 2. Cuartos de bombas de agua fría y suave



Fuente: Propia



Fuente: Propia



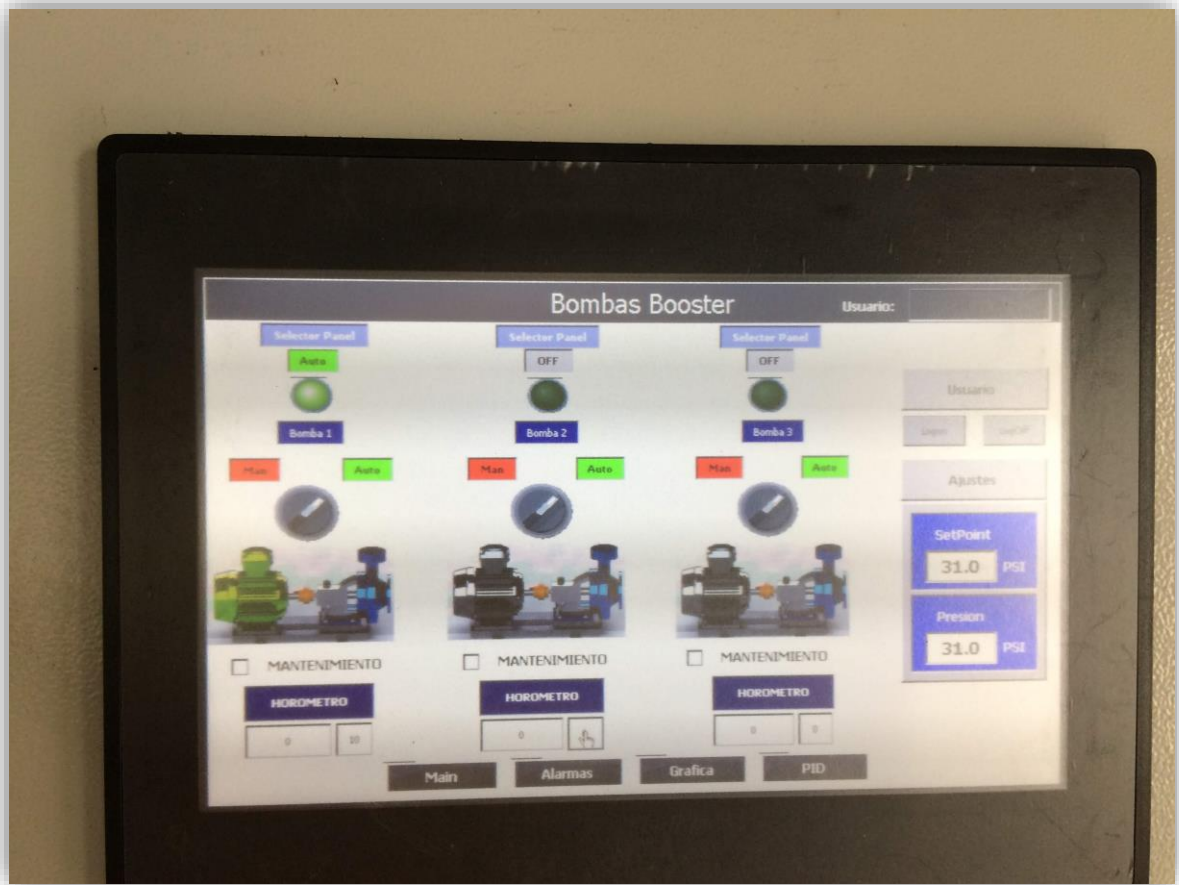
### Anexo 3. Gabinete de control con variadores, fusibles, breakers, PLC y módulos



Fuente: Propia



#### Anexo 4. Pantalla HMI instalada



Fuente: Propia

## Anexo 5. Sensor de presión instalado en tubería



Fuente: Propia