

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y**  
**FORMALES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**ELECTRÓNICA**



**“SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE  
RELAVES PARA SU REUTILIZACIÓN, HACIENDO USO  
DE PROTOCOLO DEVICENET Y SUPERVISIÓN  
SCADA”**

**Tesis Presentado por el Bachiller:**

**HURACCAHUA LLAMOCCA, WALTER MIGUEL**

**Para optar por el título profesional de:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**AREQUIPA-PERÚ**

**2016**

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y  
FORMALES  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVES  
PARA SU REUTILIZACIÓN, HACIENDO USO DE  
PROTOCOLO DEVICENET Y SUPERVISIÓN SCADA

AUTOR:

HURACCAHUA LLAMOCCA WALTER MIGUEL

MIEMBROS DEL JURADO:

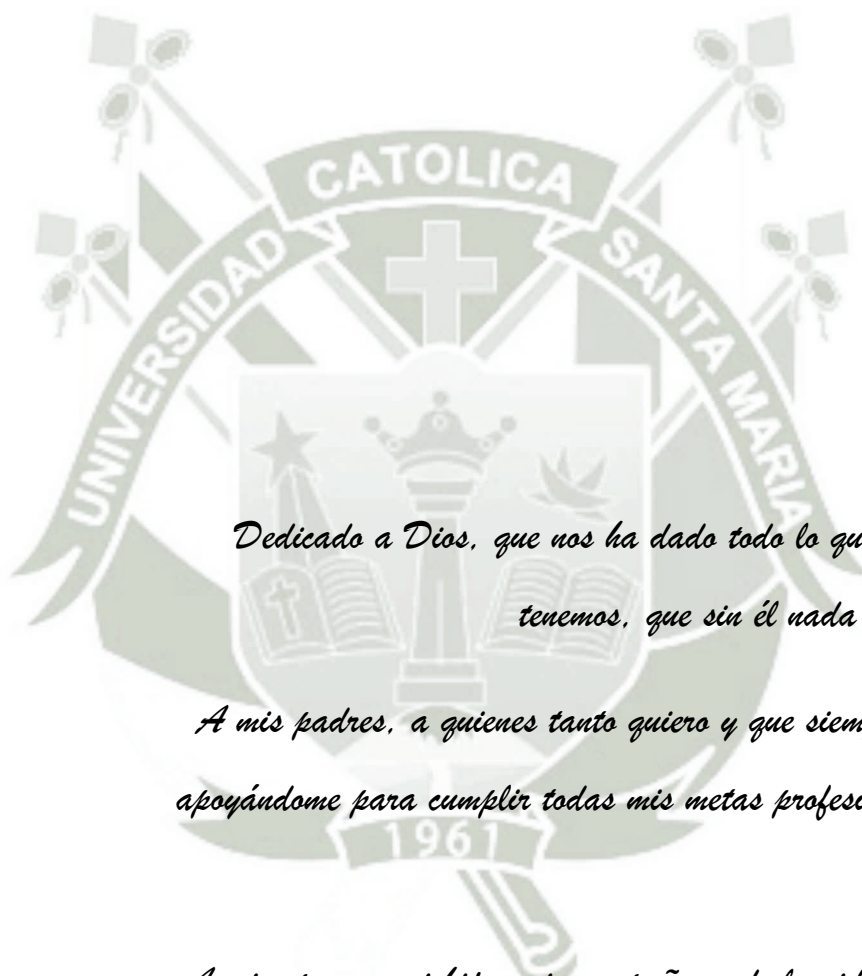
PRESIDENTE: ING. CESAR MÁLAGA CHÁVEZ

VOCAL: ING. LUCY DELGADO BARRA.

SECRETARIO: ING. PEDRO RODRÍGUEZ GONZÁLES

AREQUIPA-PERÚ

2016



*Dedicado a Dios, que nos ha dado todo lo que somos y que  
tenemos, que sin él nada sería posible.*

*A mis padres, a quienes tanto quiero y que siempre estuvieron  
apoyándome para cumplir todas mis metas profesionales y como  
persona.*

*A mi esposa y mi hijo, mis compañeros de la vida, que son mi  
motivación y mi razón para superarme cada día más.*

*A mis hermanos y amigos que me dieron su apoyo incondicional  
en el logro de mis metas.*

## PRESENTACIÓN

Señores:

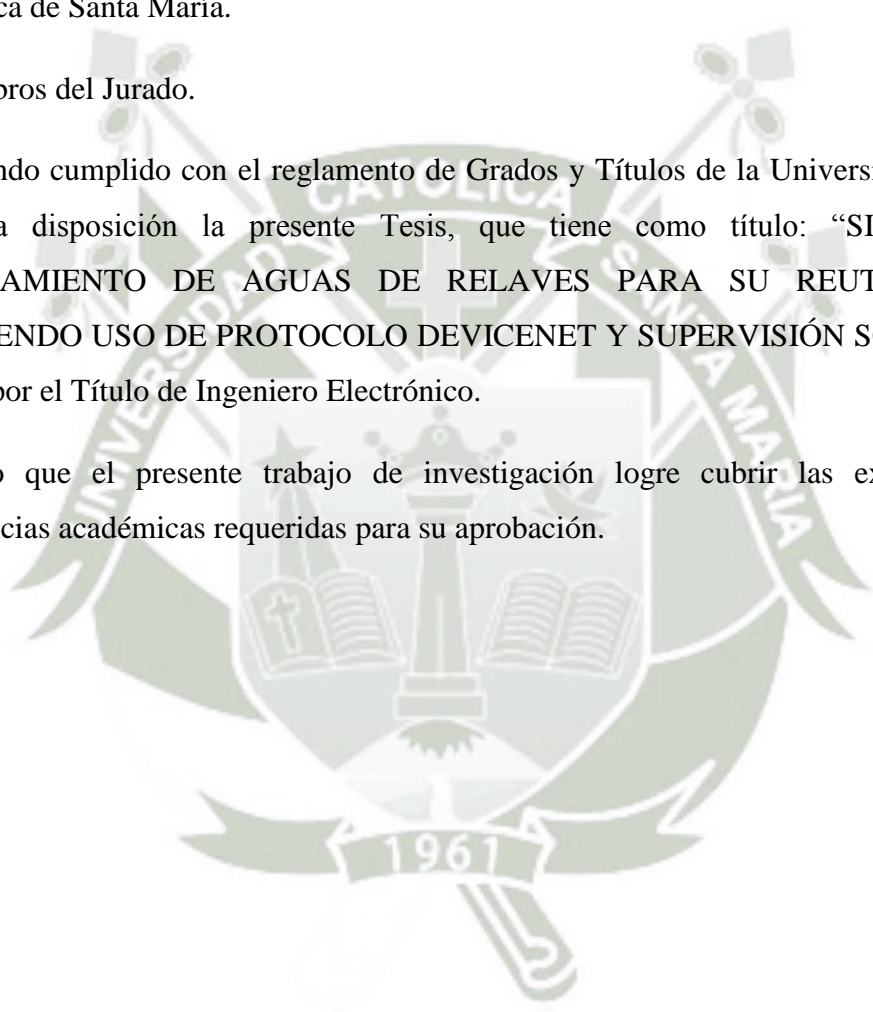
Sr. Decano de la Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales de la Universidad Católica de Santa María.

Sr. Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica de Santa María.

Miembros del Jurado.

Habiendo cumplido con el reglamento de Grados y Títulos de la Universidad, pongo a vuestra disposición la presente Tesis, que tiene como título: “SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVES PARA SU REUTILIZACIÓN, HACIENDO USO DE PROTOCOLO DEVICENET Y SUPERVISIÓN SCADA”, para optar por el Título de Ingeniero Electrónico.

Espero que el presente trabajo de investigación logre cubrir las expectativas y exigencias académicas requeridas para su aprobación.



## INDICE

1 CAPITULO I: .....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	16
1.3.1 Objetivo Principal .....	16
1.3.2 Objetivos Secundarios .....	16
1.4 HIPOTESIS .....	17
1.4.1 Hipótesis Principal:.....	17
1.4.2 Hipótesis Secundarias:.....	17
1.5 VARIABLES .....	18
1.5.1 Variable Independiente:.....	18
1.5.2 Variable Dependiente:.....	18
1.6 INDICADORES.....	18
1.7 ANTECEDENTE DE LA INVESTIGACIÓN .....	19
A. Presa de relaves SMCV:.....	19
B. Presa de relaves Tintaya:.....	19
C. Sistema de Barcazas SMCV:.....	19
1.8 ALCANCES.....	20
1.9 TÉCNICA .....	20
1.10 EQUIPOS E INSTRUMENTOS.....	21
1.11 CAMPO DE VERIFICACIÓN .....	21
1.12 ESTRATEGIAS.....	22
2 CAPITULO II.....	24
2.1 RELAVES.....	24
2.1.1 Introducción .....	24
2.1.2 El Origen del Relave.....	25
2.1.3 El Agua .....	26
2.1.4 Plantas Concentradoras:.....	27
2.2 HIDROCICLONES.....	29
2.2.1 Introducción .....	29

2.2.2	Aplicación de los Hidrociclones .....	31
2.2.3	Principios Básicos de Funcionamiento de los Hidrociclones .....	35
2.2.4	Diagrama Ideal de Flujo .....	37
2.2.5	Esquema de Flujo Real .....	38
2.2.6	Parámetros de Repartos .....	39
2.3	RED DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL DEVICENET .....	41
2.3.1	Introducción .....	41
2.3.2	Características de la red .....	43
2.3.3	Modos de Comunicación .....	44
2.3.4	Sistema de Cableado .....	45
2.4	SISTEMAS DE CONTROL .....	49
2.4.1	PLC Compact Logix L32E .....	49
2.4.2	Módulo E3 Plus (Relé de sobrecarga de estado sólido E3 y E3 Plus).....	51
2.4.3	Control PID.....	57
3	CAPITULO III.....	64
3.1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO.....	64
3.1	MODELO MATEMÁTICO.....	65
3.1.1	MODELO DE LA BOMBA CENTRIFUGA.....	65
3.1.2	MODELADO DEL HIDROCICLÓN .....	69
3.2	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE LOS HIDROCICLONES.....	73
3.3	ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA .....	79
3.3.1	Parte Mecánica.....	80
3.3.2	Parte Eléctrica.....	84
3.3.3	Parte de instrumentación.....	87
3.4	CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE EQUIPOS MEDIANTE LOS SOFTWARES DE ROCKWELL AUTOMATION .....	90
3.4.1	INTRODUCCIÓN.....	91
3.4.2	RSLINX.....	91
3.4.3	RSLOGIX 5000 .....	95
3.4.4	RSNETWORK.....	99
3.4.5	FACTORY TALK .....	101
3.5	DESARROLLO DEL SISTEMA DE SUPERVICIÓN SCADA .....	105

3.5.1	VENTANA PRINCIPAL DEL SISTEMA SCADA .....	105
3.5.2	Ventana de Control del Sistema SCADA .....	106
3.5.3	Ventana de Alarmas y Fallos del Sistema SCADA .....	107
3.6	SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA .....	108
3.7	DESARROLLO DE PRUEBAS .....	112
CONCLUSIONES .....		119
RECOMENDACIONES.....		121
BIBLIOGRAFÍA .....		123

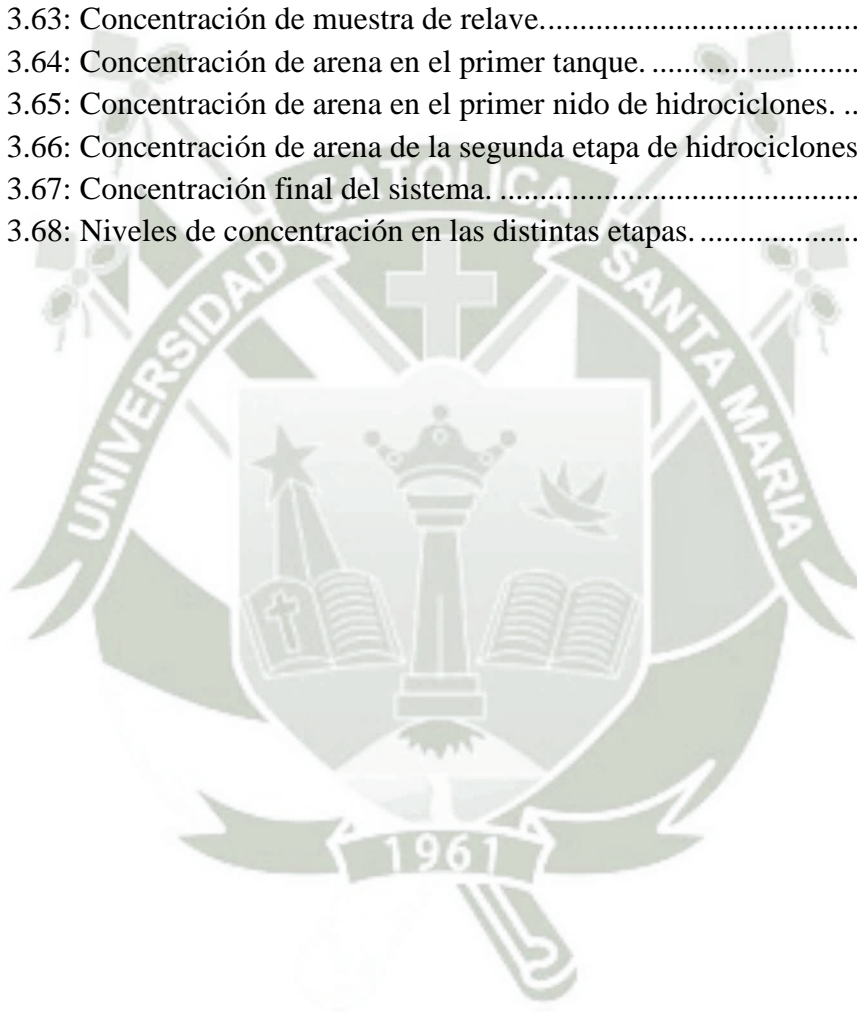


## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Extracción de cobre mediante el proceso de concentración.....	26
Figura 2.2: Extracción de cobre mediante proceso de hidrometalurgia. ....	27
Figura 2.3: Planta concentradora de Cu (SMCV – Arequipa).....	27
Figura 2.4: Espesadores de relaves (SMCV – Arequipa).....	28
Figura 2.5: Represa de relaves (SMCV – Arequipa).....	29
Figura 2.6: Esquema de funcionamiento de un hidrociclón.....	30
Figura 2.7: Distribución granulométrica para determinar la aplicación del hidrociclón.....	32
Figura 2.8: Representación esquemática del flujo ideal. ....	38
Figura 2.9: Esquema referencial de la nomenclatura a utilizar.....	39
Figura 2.10: Avances tecnológicos.....	42
Figura 2.11: Ejemplo de red DeviceNet. ....	43
Figura 2.12: Descripción del sistema de cableado.....	45
Figura 2.13: Cable redondo grueso.....	46
Figura 2.14: Cable redondo delgado.....	46
Figura 2.15: Cable plano.....	47
Figura 2.16: Conector abierto. ....	48
Figura 2.17: Conexión de los resistores de terminación.....	49
Figura 2.18: Controlador CompactLogix y módulos de E/S 1769.....	49
Figura 2.19: Descripción general del sistema CompactLogix.....	50
Figura 2.20: Combinación de controladores CompactLogix.....	51
Figura 2.21: Descripción general de las facilidades del E3 y E3 Plus.....	52
Figura 2.22: Catálogo de los E3 Plus.....	52
Figura 2.23: Entradas y salidas del E3 Plus.....	54
Figura 2.24: Indicadores del estado del E3 Plus.....	55
Figura 2.25: Diagrama de bloques.....	57
Figura 2.26: Lazo cerrado solo con ganancia proporcional.....	60
Figura 2.27: Respuesta de la planta con ganancia crítica. ....	61
Figura 2.28: Respuesta de la planta a un escalón. ....	62
Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso. ....	66
Figura 3.2: Circuito de la bomba centrífuga.....	67
Figura 3.3: Diagrama de bloques de la bomba.....	67
Figura 3.4: Circuito del hidrociclón.....	70
Figura 3.5: Diagrama de bloques del hidrociclón.....	70
Figura 3.6: Forma de hidrociclones y su aplicación. ....	73
Figura 3.7: Medidas del hidrociclón. ....	75
Figura 3.8: Rango de caudal de operación del hidrociclón.....	75
Figura 3.9: Medidas del hidrociclón a fabricar. Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchahua, 2015).....	76
Figura 3.10: Descarga normal y anormal en de un hidrociclón.....	77

Figura 3.11: Placa de datos de bomba centrífuga. ....	77
Figura 3.12: Proceso de reutilización del agua de relave. ....	79
Figura 3.13: Primer nido de hidrociclones.....	80
Figura 3.14: Segundo nido de hidrociclones. ....	81
Figura 3.15: Primera bomba centrífuga de 2HP (1er nido de hidrociclones). ....	82
Figura 3.16: Segunda bomba centrífuga de 2HP (2do nido de hidrociclones). ....	82
Figura 3.17: Bomba centrífuga de rebombeo del agua de los tanques. ....	83
Figura 3.18: Sistema de recuperación de agua de relaves (parte mecánica).....	83
Figura 3.19: Esquema eléctrico de las bombas centrífugas. ....	85
Figura 3.20: Tablero de fuerza de las bombas centrífugas. ....	86
Figura 3.21: Tablero de control e instrumentación.....	86
Figura 3.22: Diagrama P&ID del sistema.....	88
Figura 3.23: Ubicación de los sensores binarios.....	87
Figura 3.24: Esquema de conexión del tablero de control e instrumentación. ....	89
Figura 3.25: Tablero de control e instrumentación.....	90
Figura 3.26: RSLinx Classic.....	91
Figura 3.27: RSLinx Classic ventana de trabajo.....	92
Figura 3.28: Barra de comunicaciones del RSLinx Classic.....	92
Figura 3.29: Configuración del driver Ethernet IP. ....	93
Figura 3.30: Creación del driver Ethernet IP. ....	93
Figura 3.31: Creación de los IP's de los dispositivos. ....	94
Figura 3.32: RSLinx Classic en red con el dispositivo.....	94
Figura 3.33: RSLogix 5000. ....	95
Figura 3.34: RSLogix 5000 arrancando.....	95
Figura 3.35: Ventana de nuevo proyecto. ....	96
Figura 3.36: Creación del nuevo proyecto.....	97
Figura 3.37: Agregando módulos al PLC. ....	97
Figura 3.38: Creación de tags del programa.....	98
Figura 3.39: Cargando el programa hacia el PLC. ....	98
Figura 3.40: RSNetWorx DeviceNet.....	99
Figura 3.41: RSNetWorx V21. ....	99
Figura 3.42: Creación del proyecto DeviceNet.....	100
Figura 3.43: Selección del scanner de red. ....	100
Figura 3.44: Dispositivos escaneados de la red DeviceNet.....	101
Figura 3.45: Ventana de configuración del E3 Plus. ....	101
Figura 3.46: Factory Talk de Allen Bradley.....	102
Figura 3.47: Factory Talk V5.00 de Allen Bradley. ....	102
Figura 3.48: Selección del tipo de aplicación.....	103
Figura 3.49: Ventana de trabajo de Factory Talk. ....	104
Figura 3.50: Configuración del driver de comunicación. ....	104
Figura 3.51: Ventana de trabajo de los displays.....	105
Figura 3.52: Ventana de presentación del SCADA.....	106

Figura 3.53: Sistema de reutilización de agua de relaves. ....	107
Figura 3.54: Ventana de alarmas y fallas del proceso. ....	108
Figura 3.55: Curva experimental en forma de “S”. ....	109
Figura 3.56: Rampa del sistema. ....	110
Figura 3.57: Rampa del sistema en respuesta al escalón. ....	110
Figura 3.58: Programación para sintonización. ....	111
Figura 3.59: Respuesta del sistema sintonizado. ....	112
Figura 3.60: Medición de flujo de entrada a nido de hidrociclones. ....	113
Figura 3.61: Tanque lleno de relave para la prueba de hidrociclones. ....	114
Figura 3.62: Funcionamiento correcto de los hidrociclones. ....	114
Figura 3.63: Concentración de muestra de relave. ....	115
Figura 3.64: Concentración de arena en el primer tanque. ....	116
Figura 3.65: Concentración de arena en el primer nido de hidrociclones. ....	116
Figura 3.66: Concentración de arena de la segunda etapa de hidrociclones. ....	117
Figura 3.67: Concentración final del sistema. ....	118
Figura 3.68: Niveles de concentración en las distintas etapas. ....	118



## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Opciones de cable.....	45
Tabla 2.2: Identificación de conductores.....	47
Tabla 2.3: Parámetros de ajuste de PID.....	61
Tabla 2.4: Parámetros de Ajustes. ....	63
Tabla 3.1: Datos técnicos de hidrociclón REGABER.....	74



## INTRODUCCIÓN

La creciente escasez de agua en conjunto con un continuo crecimiento de la población está haciendo del agua un recurso precioso y de la reutilización de agua un mandato en todo el mundo.

Por lo general cuando hablamos de reutilizar el agua, no se trata de agua dulce. “Reutilización de agua” se refiere al tratamiento de agua en el que el agua pueda volverse a utilizar. El agua resultante puede referirse generalmente como agua potable o no potable.

En la minería, el uso más importante del agua es en el procesamiento de minerales y para eso es importante saber la cantidad de agua que se utiliza. Además de aprovechar al máximo este recurso.

La escasez de agua es ya un problema en muchas áreas donde los recursos minerales naturales son abundantes, creando un imperativo para las compañías mineras en considerar si comercializar agua, recuperar agua y reutilizar haciendo uso de distintas tecnologías. Al contrario de los sectores de la fabricación, las operaciones mineras son muy dependientes a la localización del mineral con opciones muy limitadas para adaptarse a la escasez de agua regional o impactos de calidad, es debido a esto que su manejo o utilización debe ser más controlada y mejor aprovechada.

En la presente tesis se plantea la reutilización del agua de proceso como una consideración primaria para el manejo efectivo del agua. El reciclaje puede reducir la cantidad de agua dulce requerida en los procesos minero-metalúrgicos, minimizar los requerimientos del tratamiento y la cantidad de agua de proceso descargada en el ambiente y conservar los reactivos usados en los distintos procesos.

## RESUMEN

En la presente tesis se desarrolla e implementa un sistema que permite la reutilización del agua a través de la separación de la parte sólida y líquida de los relaves, producto del procesamiento de los minerales que se realiza en las plantas concentradoras.

Esta separación se realizará mediante el uso de hidrociclones impulsados por bombas centrífugas utilizando el protocolo DEVICENET para el monitoreo y control de los equipos que se usan para este proceso.

La tesis en mención: “SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVES PARA SU REUTILIZACIÓN, HACIENDO USO DE PROTOCOLO DEVICENET Y SUPERVISIÓN SCADA”, se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo I: En este primer capítulo se plantea la problemática, siendo esta “La escasez del agua, acompañada del alto consumo que se tiene de esta en las diferentes etapas de los procesos mineros”. Se plantea una solución a esta problemática, donde se propone reducir el consumo de agua a través de la reutilización del agua proveniente de los procesos mineros, a través de un sistema scada y protocolo DeviceNet.

Capítulo II: Se muestra el marco teórico de cada uno de los componentes del proyecto, como son: Relave, hidrociclones, redes de comunicación (haciendo énfasis en el protocolo DeviceNet) y el sistema de control utilizado.

Capítulo III: Se desarrolla la ingeniería utilizada en este proyecto, así como el proceso de implementación de la tesis en sus diferentes etapas (construcción y pruebas) incluyendo la elaboración del programa y el SCADA para su control y monitoreo.

Se finaliza el documento con las conclusiones y recomendaciones que se obtienen a partir de la elaboración de la presente tesis.

Además, se detalla la bibliografía utilizada y las fuentes de referencia que sirvieron como apoyo para la elaboración de la presente tesis.

## SUMMARY

In this thesis develops and implements a system allowing water reuse through the separation of the solid and liquid tailings, product processing minerals is done in the concentrator plants.

This separation is performed by using hydrocyclones driven centrifugal pumps using the DeviceNet protocol for monitoring and control of equipment used for this process.

The thesis in question: TREATMENT SYSTEM TAILINGS WATER FOR REUSE, USING DEVICENET PROTOCOL AND SUPERVISION SCADA, is divided into the following chapters:

Chapter I: In this chapter the problem arises, this being "Water scarcity, together with the high consumption we have of this at different stages of the mining process." a solution to this problem, which it aims to reduce water consumption through the reuse of water from mining processes, through a Scada system and DeviceNet protocol arises.

Chapter II: the theoretical framework of each of the project components is displayed, such as: Relave, hydrocyclones, communication networks (emphasizing the DeviceNet protocol) and the control system used.

Chapter III: engineering used in this project as well as the implementation process of the thesis in its different stages (design and testing) including program development and SCADA for control and monitoring is developed.

The paper ends with the conclusions and recommendations obtained from the preparation of this thesis.

In addition, the bibliography and reference sources that served as support for the development of this thesis is detailed.

# CAPITULO I:

## PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde hace ya algunos años nuestra región y la parte sur de nuestro país se ve afectada por la escasez de agua en temporadas bajas de lluvia. Se suma a esto las intensas olas de calor que vienen azotando a nuestro país provocando un mayor consumo del recurso hídrico.

Este nuevo escenario está obligando a las compañías mineras no sólo a buscar formas de abastecimiento inéditas y de alto costo, como extraer y desalinizar agua de mar, sino devolver la mirada a sus procesos para buscar mayores eficiencias en el uso del recurso.

En esa línea, son numerosos los estudios que las grandes compañías que operan en el país están realizando para evaluar nuevas formas de disposición de sus relaves, con el objeto de llegar a niveles de sólido mayores y recuperar más agua para los procesos metalúrgicos de sus operaciones.

A esto se agregan las cada vez más exigentes regulaciones medioambientales que tornan insostenible las filtraciones o descargas de agua de relaves, obligando a las empresas a perfeccionar e invertir más en el tema<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Grupo editorial EDITEC (2007). Recuperando el agua en relaves. Minería Chilena.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los diferentes procesos de producción de concentrado de minerales se requieren miles de metros cúbicos de agua, resultado de este proceso es que se obtienen los relaves. En la actualidad se están centrando estudios y técnicas para el mejor aprovechamiento de los relaves, los cuales a su vez disminuyan el impacto ambiental generado durante el proceso de producción y extracción de los minerales.

Al problema del uso de grandes cantidades de agua en los distintos procesos, se suman los nuevos proyectos de expansión de las grandes unidades de extracción de mineral, lo que incurrirá en mayores consumos del preciado recurso hídrico.

Es por ello que el presente proyecto de tesis busca recuperar agua de los relaves de los centros mineros, espesando el relave en la mayor medida posible dentro de lo técnico y económicamente factible y así poder separarlo del agua para su reutilización.

Actualmente los centros mineros depositan sus relaves en presas de relaves pasando por espesadores de relaves y un sistema de ductos y canales.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Principal

Diseñar e implementar un sistema de reutilización de agua de relaves, utilizando protocolo DeviceNet y supervisión SCADA. En donde se pueda separar la parte sólida de la parte líquida de los relaves, optimizando la separación impulsando el flujo de relave a través de los hidrociclones mediante el uso de bombas y no por diferencia de niveles

### 1.3.2 Objetivos Secundarios

1. Diseñar e implementar una red en el protocolo DeviceNet para el control y supervisión de los equipos e instrumentos necesarios para la reutilización del agua de relaves.

2. Diseñar e implementar un sistema de supervisión de campo mediante SCADA, por el cual se pueda visualizar el proceso de reutilización del agua de relaves; manejando servidores OPC.
3. Diseñar e implementar un sistema de control para el proceso utilizando un control PID sintonizado, donde el Set Point variará con respecto al flujo que se maneja.
4. Diseñar e implementar un sistema de protección para motores eléctricos de inducción de corriente alterna.
5. Realizar la implementación desde el nivel donde se obtiene el relave (Espesadores de relave) hasta el nivel de acumulación de agua de re-uso para el proceso.

## 1.4 HIPOTESIS

### 1.4.1 Hipótesis Principal:

Es posible separar el agua de la parte sólida de los relaves utilizando la centrifugación del relave a través de un hidrociclón.

La separación con el hidrociclón es realizada por medio de fuerza centrífuga que empuja las partículas más pesadas que el líquido de manera espiral hacia abajo, hacia una cámara de recolección, mientras que el líquido se mueve hacia arriba en el centro, hacia la salida en la parte superior<sup>2</sup>.

### 1.4.2 Hipótesis Secundarias:

1. Es factible implementar una red de control mediante el protocolo DeviceNet, para los equipos (motores, sensores y PLC) en el proceso de reutilización del agua de relave, para su control y monitoreo.
2. Se podrá visualizar el proceso de reutilización del agua de relave mediante un sistema SCADA, utilizando servidores OPC para el acondicionamiento de los datos y sea observable a través de una PC.

---

<sup>2</sup> Mora, K.B. (2013). Conceptualización del sistema de separación y transporte de fluidos en la zona sur del campo salto.

3. Es posible implementar un control PID capaz de regular la cantidad de flujo necesaria para que se pueda realizar el proceso de reutilización del agua de relave.
4. Se puede implementar un sistema de protección para los motores, utilizando lógica de control.

## 1.5 VARIABLES

### 1.5.1 Variable Independiente:

Sistema de control y monitoreo (SCADA) para la separación del agua y la parte sólida del relave.

### 1.5.2 Variable Dependiente:

- Flujo de relave que se maneja.
- Sistema de verificación de alimentación de relave del proceso.
- Sistema de verificación de temperatura de motores.
- Nivel de líquido en tanques de almacenamiento.

## 1.6 INDICADORES

En los dispositivos integrados en red (DeviceNet) se tendrán indicadores de la conexión de los dispositivos de control, se podrán observar la conexión de los dispositivos entre el ordenador y los dispositivos de control.

Se tendrán las lecturas de las variables de control en el sistema SCADA en donde podrán ser mostradas:

- Tensión: 0-500V
- Nivel: On – Off
- Lazo de control: Flujo(m<sup>3</sup>/h)

## 1.7 ANTECEDENTE DE LA INVESTIGACIÓN

Los relaves son residuos que provienen de los procesos para el tratamiento de los minerales en las plantas concentradoras y son casi siempre transportados desde la concentradora a través de una tubería, en forma de pulpa (mezcla de agua y sólidos), en concentraciones que van de 20 a 50% de sólidos en peso, después de recuperar algo del agua del proceso en tanques conocidos como espesadores. En los depósitos de relaves la pulpa es descargada desde la cresta del dique, y conforme los sólidos se asientan, a partir de la pulpa descargada, se forma una playa de leve inclinación que se extiende desde el punto de descarga hasta la poza de decantación, donde el agua remanente de la pulpa se acumula para ser recirculada a la planta concentradora o ser vertida a un cuerpo receptor, que puede ser una quebrada, un río o una laguna<sup>3</sup>.

Actualmente tenemos en la región sur del País varios centros mineros, como son Cerro Verde, Cuajone, Toquepala, Tintaya, Antapaccay, Las Bambas, además de las nuevas minas que entrarán en operación los próximos meses como son: Tambomayo, Constanza, Tía María, entre otras.

En las minas que operan actualmente ya existen sistemas para el tratamiento de aguas residuales provenientes del tratamiento de los minerales en concentradora y su posterior reutilización como se menciona en los siguientes casos:

- A. **Presa de relaves SMCV:** Actualmente en SMCV se viene utilizando los hidrociclones como método de separación de agua y arena en los relaves, pero este sistema viene dado solo por la diferencia de niveles que hay entre la ubicación de los hidrociclones y la presa de relaves. Fuente: Experiencia propia en proyectos.
- B. **Presa de relaves Tintaya:** En Tintaya el sistema de separación del agua y arena del relave esta dado espesadores de relave que van al final de todo el sistema de la planta concentradora, luego de esto se envía hacia la presa de relaves y es ahí donde se recupera el agua. Fuente: Experiencia propia en proyectos.
- C. **Sistema de Barcazas SMCV:** Sistema encargado de bombear toda el agua recuperada de la presa de relaves de SMCV hacia tanques de almacenamiento

---

<sup>3</sup> Bullón, J. P. (2012). Tratamiento de aguas en la industria minero metalúrgica.

para su final re-uso en los diferentes procesos de la minería, mas no para el consumo humano. Fuente: Experiencia propia en proyectos.

- D. **Sistema de Barcazas Tintaya:** Tintaya está implementando en la actualidad un sistema de Barcazas para bombear el agua recuperada tanto de los relaves como de las aguas acumuladas por las lluvias en las presas que tiene, estos se enviarán a tanques de almacenamiento y luego se reutilizará en los diferentes procesos de minería, más no para el consumo humano. Fuente: Experiencia propia en proyectos.

## 1.8 ALCANCES

Se implementará un sistema para la reutilización del agua proveniente de los relaves, este sistema será impulsado por dos bombas para mejorar la presión dentro de los Hidrociclones y lograr una mejor separación entre la parte sólida y líquida de los relaves.

Este sistema partirá después de la etapa de espesamiento que existe en las plantas concentradoras mineras, y llegará hasta el sistema de depósito de agua y arena en la presa de relaves.

A su vez se llegará a diseñar un sistema SCADA para la supervisión, monitoreo y control de procesos con las condiciones fundamentales de robustez, confiabilidad, eficiencia y que sea de manejo sencillo para el Operador.

Se considera a este proyecto como un modelo de aplicación que variará dependiendo de las condiciones ofrecidas por el terreno, las distancias a considerar entre el punto de entrega y punto de culminación de este sistema. Estos factores no han sido considerados dentro de esta tesis.

## 1.9 TÉCNICA

Para el desarrollo de la tesis, se hará el uso de Hidrociclones cónicos en dos etapas distintas, debido a que los ciclones son equipos utilizados ampliamente en la industria minera, y que permiten una buena separación de sólidos y líquidos, esto aplicando la fuerza centrífuga de los ciclones.

Los ciclones tienen un principio de funcionamiento basado en la separación de las partículas mediante el uso de la fuerza centrífuga (del orden de cientos de g), lo que lo hace más efectivo que las cámaras de sedimentación.

Además, se realizará un control PID para el mejor desempeño del sistema, utilizando el flujo como variable principal.

### **1.10 EQUIPOS E INSTRUMENTOS**

- Los equipos e instrumentos a utilizar en la presente tesis son:
- Cable de red (UTP categoría 6).
- Computadora portátil (con sistema operativo Windows XP, Software de programación y supervisión SCADA).
- PLC Compact Logix 5000 L32E con módulo de entradas y salidas analógicas.
- Escáner de Red DeviceNet para PLC Compact Logix 5000 L32E.
- Módulos de entradas y salidas en protocolo DeviceNet.
- Servidores OPC.
- Fuente de alimentación alterna (220VAC).
- Fuente de alimentación de 24VDC de 20A.
- Electrobombas de 2HP.
- Sensores de nivel tipo Switch.
- Multímetro.
- Flujómetro electromagnético.
- Relés de sobrecarga.
- Interruptores termomagnéticos.
- Contactores.

### **1.11 CAMPO DE VERIFICACIÓN**

En la implementación del proyecto se verificará primero las conexiones correctas y adecuadas de todos los dispositivos de control.

Luego se va a verificar la calibración y configuración con el programa del PLC y el sistema de control programado para el proceso.

Después verificaremos la conexión mediante OPC server con los dispositivos de control, interconectado y que forman una red de comunicación industrial con un protocolo de comunicación adecuado.

Seguidamente se verificará el funcionamiento del proceso en el sistema SCADA, observando que las señales de control y comunicación de los dispositivos de control estén correctas para tener un mejor control y supervisión del proceso.

En el programa diseñado del sistema SCADA se observará el funcionamiento de todos los dispositivos para el control de procesos que a su vez se verá el funcionamiento del interfaz OPC server.

Las pruebas de funcionamiento del proyecto se realizarán en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica Santa María de Arequipa.

### **1.12 ESTRATEGIAS**

Las estrategias utilizadas en el proyecto son mencionadas a continuación: Al principio se hizo un estudio y análisis detallado sobre la estructura de los Hidrociclones, funcionamiento, diseño (respecto a los valores comerciales de los equipos a implementar), así como su respectivo y correcto funcionamiento.

Luego de haber hecho los estudios respectivos e implementación de los Hidrociclones respecto a los valores comerciales de los equipos a implementar se hará el conexionado de las mismas con los diferentes calibres de tubería, potencias de electrobombas, se verificará el acondicionamiento aislado del funcionamiento integral de los Hidrociclones, electrobombas, tanques, en un arranque directo, e integración del primer nido de ciclones con el segundo nido de ciclones.

Se harán las conexiones de los diferentes dispositivos de control, con la ayuda de esquemas eléctricos e instrumental, así como se hará la configuración de PLC para conectar los sensores (nivel), actuadores (electrobombas), etc., luego se formara una red DeviceNet con los dispositivos de control (E3 plus) para una comunicación industrial, en esta red se hará uso de un módulo scanner para poder conectar los dispositivos de

control, se hará una previa configuración del scanner, del RSlogix para la comunicación del sistema SCADA usando el protocolo TCP/IP, en el sistema SCADA se podrá realizar los cambios de cada proceso o aplicación de control desarrollado con cada PLC.



## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1 RELAVES

##### 2.1.1 Introducción

Toda planta minera cuyo proceso de concentración es Flotación, produce residuos sólidos que se denominan relaves y que corresponden a una “Suspensión fina de sólidos en líquido”, constituidos fundamentalmente por el mismo material presente in situ en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, conformando una pulpa, que se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y estériles que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina; esta "pulpa o lodo de relaves" fluctúa en la práctica con una razón aproximada de agua/sólidos que van del orden de 1:1 a 2:1. Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerá de la razón agua/sólidos y también de las características de las partículas sólidas. Esto puede ilustrarse si se consideran los siguientes ejemplos:

Una masa de relaves con un gran contenido de agua escurrirá fácilmente, incluso con pendientes pequeñas.

Una masa de relaves con un contenido de agua suficientemente bajo (por ejemplo, relaves filtrados) no escurrirá gravitacionalmente.

Si las partículas sólidas son de muy pequeño tamaño (equivalentes a arcillas), se demorarán un gran tiempo en sedimentar, manteniéndose en suspensión y alcanzando grandes distancias respecto al punto de descarga antes de sedimentar.

Si las partículas sólidas son de gran tamaño (equivalentes a arenas) sedimentarán rápidamente y se acumularán a corta distancia del punto de descarga.

Las alternativas a utilizar en la deposición de un material de relaves, dependerá de las características de los relaves que produce la planta (cantidad suficiente de material tamaño arena), del costo del agua (si es escasa, se justifican inversiones en equipos para optimizar su recuperación) y, de las características del lugar de emplazamiento del depósito de relaves<sup>4</sup>.

### **2.1.2 El Origen del Relave**

La minería es una actividad extractiva que consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales obtenidos de la corteza terrestre, la cual, en muchos casos, implica la extracción física de grandes cantidades de materiales de la misma, para recuperar sólo pequeños volúmenes del producto deseado<sup>5</sup>.

Existe una gran variedad de minerales explotados a lo largo del territorio nacional como los metales (oro, plata, cobre, hierro, etc.), los minerales industriales (potasio, azufre, cuarzo, etc.), los materiales de construcción (arena, áridos, arcilla, grava, etc.), las gemas (diamantes, rubíes, zafiros y esmeraldas), y combustibles (carbón, lignito, turba, petróleo y gas). La Guía Para el Manejo de Relaves Mineros sostiene que el chancado y molienda de minerales generan un volumen de relaves que es aproximadamente dos tercios más grande que el volumen original del mineral “in situ”, es por ello que su disposición, procurando que sea económicamente factible, así como física y químicamente estable, es tal vez el mayor problema ambiental asociado con el desarrollo minero.

---

<sup>4</sup> Morande, N.A. (2007). Guía técnica de operación y control de depósito de relaves. Servicio nacional de geología y minería.

<sup>5</sup> García Saldaña, CL.A.(s.f.). Los relaves mineros, su efecto en el ambiente y la salud. Universidad Peruana Unión – 4to CONACIN.



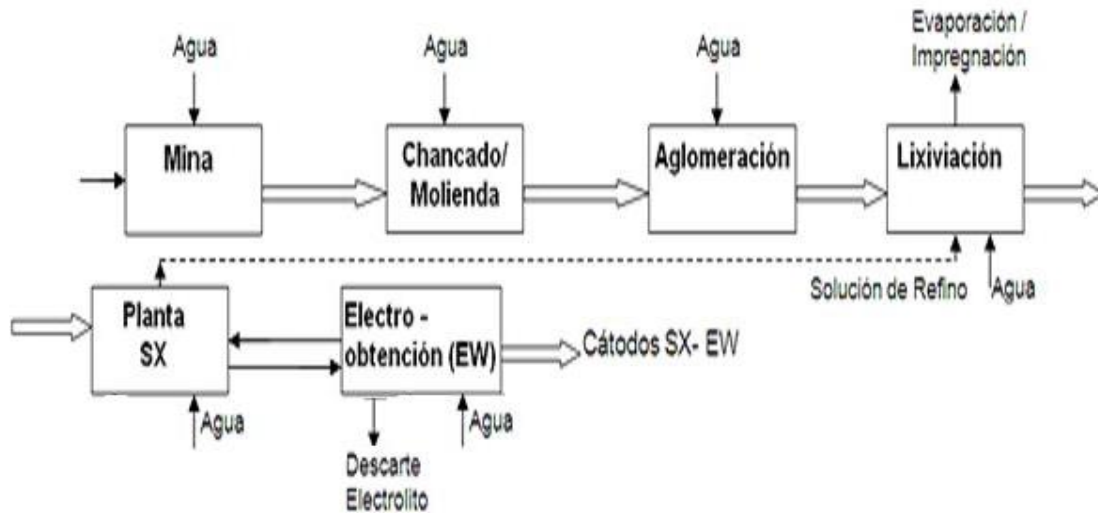


Figura 2.2: Extracción de cobre mediante proceso de hidrometalurgia.

Fuente: (Comisión Chilena del Cobre, 2012).

#### 2.1.4 Plantas Concentradoras:

El procesamiento de minerales representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales que involucra la trituración (chancado) y molienda del mineral luego la flotación, clasificación y espesamiento.



Figura 2.3: Planta concentradora de Cu (SMCV – Arequipa).

Fuente: (Bravo Galvéz, ---).

Su mayor consumo se da en la flotación, el transporte de concentrados y desechos (relaves) y la evaporación e infiltración en las represas. Con frecuencia el mineral es acondicionado previo a la molienda. La flotación del mineral es físico-química: consiste

en extracción no del mineral como tal, sino que de partículas del mineral que lo contienen en combinación con azufre. Ello significa que se le agrega agua en exceso y algunos reactivos que son importantes en la flotación y por lo general en un pH alcalino (10 a 11). Por lo tanto, es necesario añadir algún reactivo, usualmente cal, para elevar el pH desde 7 que contiene el agua natural, hasta 10 o 11. El producto de estas plantas de flotación es un concentrado que contiene entre 20 y 40 por ciento de mineral.



Figura 2.4: Espesadores de relaves (SMCV – Arequipa)

Fuente: (Bravo Galvéz, ---).

El agua del proceso de flotación se usa también para transportar los concentrados y los materiales de desecho hacia las represas de relaves. Según la distancia entre la concentradora y las instalaciones de filtrado y almacenaje, las aguas residuales pueden o no ser recirculadas al proceso. Cuando ello no es posible, una parte del agua se destina a uso industrial y el resto se devuelve al ambiente bajo condiciones controladas.

Una parte importante del agua que se utiliza en la flotación pasa a formar parte de los desechos o relaves, jales, colas, etc., que se envían a la etapa de espesamiento para recuperar una parte del agua que contienen.

Los relaves se descargan en represas que contienen el efluente, permiten la sedimentación de los finos en el depósito y retienen los más gruesos en el muro. Así se recupera el máximo volumen posible de las aguas claras, las que, cuando hay

factibilidad económica, se retornan al proceso de flotación, reduciendo el consumo de agua fresca<sup>7</sup>.



Figura 2.5: Represa de relaves (SMCV – Arequipa).

Fuente: (Bravo Galvéz, ---).

## 2.2 HIDROCICLONES

### 2.2.1 Introducción

La separación por sedimentación de partículas se da en la naturaleza en cualquier lago o estanque donde se introduce agua turbia. Las partículas se posan en el fondo, formando un sedimento que posee un grado de espesado en relación con la concentración de la alimentación (feed), mientras que el agua sobrante es clarificada y eliminada como flujo superior (overflow).

Los mismos fenómenos ocurren en una suspensión en rotación, donde fuerzas centrífugas mucho mayor a las producidas por la gravedad producen los efectos de separación por el aumento del grado de sedimentación. Los equipos que se emplean normalmente para este propósito son las centrifugas con camisa maciza, y los Hidrociclones pueden ser considerados como una centrifuga de camisa maciza, en la cual esta permanece fija, mientras que la rotación de la suspensión es producida por la propia alimentación al ciclón, tangencialmente y a presión.

---

<sup>7</sup> Avila, E.C. (2009). Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua. Naciones Unidas - CEPAL

La suspensión de alimentación forma un torbellino primario a lo largo de la superficie interior de la pared de las partes cilíndrica y cónica, dirigiéndose al exterior a través del vórtice cónico. Al ser este estrecho, solamente una parte de la corriente es evacuada como flujo inferior (underflow), transportando las partículas gruesas o inclusive todos los sólidos con ella. La mayoría del líquido (que ha sido limpiado por la sedimentación de los sólidos en el torbellino primario, o bien que transporta las partículas finas sobrantes con el), es forzado a abandonar el ciclón a través de la tobera del flujo superior (overflow) formando un torbellino secundario ascendente alrededor del núcleo de la carcasa. En el interior del núcleo se crea una depresión, que recoge todo el aire que ha sido transportado como burbujas o disuelto en el agua de alimentación. También el vapor creará esta visible columna central de aire. Debido al incremento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario, las altas fuerzas centrífugas generadas traen consigo una eficiente separación secundaria. Las partículas finas rechazadas sedimentan radialmente y se unen al torbellino primario; la mayoría de estas partículas son evacuadas finalmente a través de la boquilla formada por el vórtice del cono. Por consiguiente, la separación dentro de un hidrociclón tiene lugar como resultado de estos dos procesos, y el punto de corte final será determinado principalmente por la aceleración centrífuga del torbellino secundario interior<sup>8</sup>.



Figura 2.6: Esquema de funcionamiento de un hidrociclón  
Fuente: (Universidad de Chile, 2010)

<sup>8</sup> Dr. Helmut Trawinski (s.f.). Aplicaciones y Funcionamiento Práctico de los Hidrociclones.

### 2.2.2 Aplicación de los Hidrociclones

Las aplicaciones de los Hidrociclones son muchas, pero solo mencionaremos entre las más importantes en los procesos mineros:

- **Espesado**

Esta denominación se refiere a la eliminación de la mayor cantidad de agua para producir un escurrido de los sólidos. El verdadero espesado apunta a la recuperación de todos los sólidos, resultando una clarificación del líquido, pero como en la práctica, y debido a que los agentes floculantes no pueden ser utilizados, en los Hidrociclones, como acelerantes de la sedimentación, la recuperación de peso (mass recovery) es limitada y el resultado es un flujo superior turbio, es decir, lo que tiene lugar en el ciclón es un deslamado. La construcción de diques de residuos con Hidrociclones es un ejemplo muy conocido de esta técnica.

- **Deslamado**

En esta operación el objeto es eliminar las partículas finas junto con el flujo superior. Esto es a menudo necesario para mejorar el producto para procesos posteriores, tales como flotación, separación magnética en húmedo, filtración, etc. En plantas químicas, los ciclones en deslamado se usan frecuentemente para eliminar el agua después de un proceso de cristalización; los cristales finos, son evacuados con el flujo superior, siendo reciclados al cristizador donde actúan como núcleos para la formación de un nuevo cristal.

- **Refinado**

En el refinado, el flujo superior es el producto final y pequeñas cantidades de partículas superiores al tamaño deseado son evacuadas con el flujo inferior. La figura 2.7 muestra, gráficamente, la diferencia entre refinado y deslamado, usando una curva granulométrica.

El punto de corte 2 en la parte inferior de la curva se refiere al deslamado, y el punto de corte 3, en la parte superior, al refinado; el punto 1 a la izquierda de la curva, a la clarificación o espesado, y el 7 en la mitad, al fraccionamiento o clasificación.

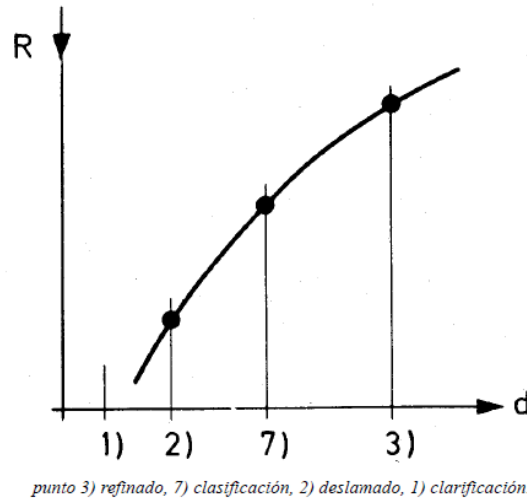


Figura 2.7: Distribución granulométrica para determinar la aplicación del hidrociclón.

Fuente: (Dr. Helmut Trawinski, ---)

- **Circuitos cerrados de molienda**

Los ciclones de deslamado y refinado se usan a menudo juntos con procesos de molienda. Se considera circuitos diferentes e igualmente posibles, en los cuales, los Hidrociclones de clasificación y molinos en vía húmeda, pueden emplearse conjuntamente.

**Caso a**

El ciclón es instalado, antes del molino, para deslamar la alimentación. La fracción fina descargada con el flujo superior es enviada como producto final, y la gruesa con el flujo inferior al molino, cuya descarga (material molido) es el principal componente de la mezcla, "producto final", Esto es conocido como un "circuito abierto".

**Caso b**

La alimentación va directamente al molino, cuya descarga es introducida al ciclón para su desarenado. El flujo superior es el "producto" mientras que el -sobretamaño- flujo inferior, regresa al molino para molerse otra vez junto con la nueva alimentación. Esto se conoce como "circuito cerrado de molienda".

**Caso c**

Aquí los casos a) y b) se combinan de modo que la alimentación y la descarga del molino se mezclan y se clasifican conjuntamente con el mismo ciclón, el

cual desempeña las dos funciones, deslamado de la alimentación gruesa y desarenado del producto fino del molino.

El flujo superior es el "producto" y el inferior es reciclado al molino. A causa de las dos funciones del ciclón, nosotros hablamos en este caso de un "doble circuito".

#### **Caso d**

Para mejorar el trabajo de los ciclones, el deslamado y desarenado debe realizarse, independientemente, en ciclones separados de diferentes tamaños. Ambos flujos superiores son entonces "producto" y los flujos inferiores son introducidos en el molino. Esto es una combinación más lógica de los casos a) y b), llamada "circuito mejorado".

#### **Caso e**

Para reducir aún más la carga en el molino, el circuito cerrado caso "b" puede modificarse mediante el empleo de dos etapas de desarenado. Las primeras arenas son deslamadas en el segundo ciclón, y el producto grueso intermedio es mezclado con la alimentación primaria. Sin reducir el tamaño del producto final, los rechazos al molino llevan menos residuos finos.

#### **Caso f**

Si el primer flujo superior continúa llevando demasiados sobre-tamaños, puede limpiarse en una segunda etapa de ciclonado. Puesto que el flujo inferior del segundo ciclón arrastrará todavía muchas partículas finas con él, éste, es reciclado a la alimentación del primer ciclón para ser deslamado posteriormente.

#### **Caso g**

Se puede usar una modificación del circuito d), si el flujo superior del ciclón primario no es de la calidad requerida. En este caso el flujo superior primario es mezclado con la alimentación secundaria para una segunda operación de limpieza.

La carga circulante, factor  $n$ , compara el tonelaje de alimentación al molino con el tonelaje requerido de producto final. Cuando el valor del reparto de peso (mass recovery) es conocido.

- **Clasificación selectiva**

La separación de una alimentación heterogénea en sus componentes minerales puede basarse en las diferentes características de los minerales: por. Ejemplo: el peso específico (separación por medios densos, mesas, espirales); forma de partículas (mesas, espirales); tensión superficial (flotación); propiedades eléctricas y magnéticas (separadores); solubilidad (proceso de lixiviación); y otras. Algunas veces, tan sólo la diferencia en el tamaño del grano permite la separación por un simple proceso mecánico.

- **Recuperación de sólidos**

Los equipos de lavado y escurrido, a menudo, generan efluentes turbios (flujos superiores o filtrados) que transportan con ellos fracciones finas, las cuales causan pérdidas de producto. La recuperación de estas fracciones finas de: tornillos lavadores de arenas, desenlodadores, escurridores, cribas, escurridoras centrífugas, es una aplicación atractiva para los Hidrociclones.

- **Fraccionamiento**

Otra aplicación interesante en el tratamiento por Hidrociclones, es la clasificación en dos fracciones para un tratamiento posterior en diferentes procesos. Un ejemplo típico, es el fraccionado de un concentrado de hierro para alimentación sinter (gruesos) y pellet (finos).

- **Pre-concentración**

Si hay grandes diferencias en el peso específico de los componentes minerales, el producto bruto puede ser enriquecido en Hidrociclones. Esto es un proceso de concentración por gravedad, o quizás, mejor dicho, un proceso de concentración centrífuga. En estos Hidrociclones no se usan medios densos. Un ejemplo típico es la separación de componentes pesados, tales como sulfuros metálicos (pirita, blenda), óxidos metálicos, metales preciosos (plata, platino), etc., de gangas. Los

ciclones para esta operación difieren de los tipos normales, ya que su fondo plano y su larga parte cilíndrica se han proyectado para aumentar la eficacia.

- **Recuperación de líquido**

Si las aguas de procesos o soluciones madres deben reciclarse, con Hidrociclones puede obtenerse a menudo una clarificación satisfactoria. En las plantas de lavado de carbón, este es uno de los problemas más importantes, especialmente cuando los espesadores existentes están sobrecargados; en estos casos, los Hidrociclones se instalan frecuentemente en paralelo para mantener el nivel de turbiedad del agua de reciclado dentro de valores admisibles.

- **Lavado contra-corriente**

La eliminación de ácidos adherentes, lejías o partículas finas de un producto en particular, es realizada por diluciones y espesados periódicos en etapas múltiples de ciclones. Si es el factor de dilución de las etapas  $i$  y  $n$ , cuando hay varias etapas sucesivas, el efecto total del lavado asciende.

Aquí se requiere un total de  $n$  veces la cantidad de agua de dilución empleada por etapa. El lavado en contra-corriente puede alcanzar eficiencias altas, añadiendo agua solamente una vez, p. ej. En la última etapa de cicloneado. En comparación con los procesos en los que se añade agua limpia varias veces, el efecto total de lavado es un poco más reducido, por supuesto, pero en relación con la cantidad de agua limpia añadida, el sistema contra-corriente es mucho más efectivo<sup>9</sup>.

### 2.2.3 Principios Básicos de Funcionamiento de los Hidrociclones

Las fuerzas que actúan sobre las partículas livianas dentro de un medio denso, provocando la flotación de estas, producen además que estas asciendan a la superficie, mientras que las partículas más densas, al ser más pesadas que el fluido que desplazan, se hunden.

Las magnitudes de estas fuerzas, gravitacionales y de empuje, son de mucha importancia, ya que estas son las que regirán la velocidad con la que se producirá la

---

<sup>9</sup> Dr. Helmut Trawinski (s.f.). Aplicaciones y Funcionamiento Práctico de los Hidrociclones.

separación de las partículas, lo cual a su vez determinará cuál debe ser la capacidad del estanque (hidrociclón).

Para separadores centrífugos, el balance entre estas fuerzas gravitacionales (centrífugas) y de flotación (empuje) puede escribirse como:

$$F = (M_S - M_f) \frac{v^2}{R} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde:

$F$ : Fuerza sobre la partícula [N].

$M_S$ : Masa de la partícula [Kg].

$M_f$ : Masa del fluido desplazado por la partícula [Kg].

$v$ : Velocidad Tangencial de la partícula [m/s].

$R$ : Radio del ciclón [m].

La fuerza resultante sobre la partícula se balanceará, sin embargo, cuando la partícula en cuestión alcance la velocidad terminal. Las partículas que estén sujetas a una fuerza resultante pequeña, se comportaran según la Ley de Stokes, donde la resistencia del fluido se debe principalmente a su viscosidad.

Las partículas que estén sujetas a fuerzas de mayor magnitud, se regirán según Newton, donde la resistencia del fluido es principalmente inercial e independiente de la viscosidad. A raíz de esta disyuntiva, es que no es posible lograr una única ecuación que describa la velocidad terminal que alcanzaran las partículas en el medio<sup>10</sup>.

En un hidrociclón típico, las fuerzas actuando sobre una partícula que se encuentra en el cilindro de alimentación son del orden de 20 veces mayores que la fuerza de gravedad. En la sección cónica del hidrociclón la velocidad tangencial de la partícula aumenta siguiendo la siguiente relación:

$$v\sqrt{R} = \text{constante}. \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Con lo que se obtiene que, en el Ápex, la aceleración aumente hasta ser del orden de 200 veces la aceleración de gravedad.

---

<sup>10</sup> Juan Cuevas R., F.T. (2010). Diseño de hidrociclón. Universidad de Chile.

Los separadores de medios densos que existen actualmente tienen, en su mayoría, diámetros que se mueven en el rango de 0.5 - 1 m, donde los de 0.5 m de diámetro tienen capacidades de procesamiento del orden de las 50 tph. Un ángulo usual para la sección cónica es de 20 grados.

#### 2.2.4 Diagrama Ideal de Flujo

El flujo ideal en un hidrociclón es una espiral ascendente contenida de otra espiral descendente.

El fluido que entra a gran velocidad debido a la presión de entrada, comienza a deslizarse tangencialmente por las paredes del ciclón, formando el espiral exterior ascendente.

La presencia del Ápex en la cabeza de parte cónica hace que una parte del fluido se separe de la masa descendente de la espiral exterior, originando el flujo de descarga, llamado también UNDERFLOW, que arrastra consigo los productos gruesos de la separación. Este flujo aumenta cuando el ángulo de la sección cónica, crece.

La cantidad de flujo que no descarga en el ápex sigue su movimiento rotatorio con un cambio en la componente vertical de su velocidad que origina una espiral interior que lleva consigo los materiales más finos de la separación, los cuales salen por la abertura superior llamada VORTEX-FINDER. A este flujo ascendente se le llama Overflow<sup>11</sup>.

Es importante notar que tanto el espiral descendente como el ascendente giran hacia el mismo lado, como se aprecia en el esquema de la figura.

---

<sup>11</sup> Juan Cuevas R., F.T. (2010). Diseño de hidrociclón. Universidad de Chile.

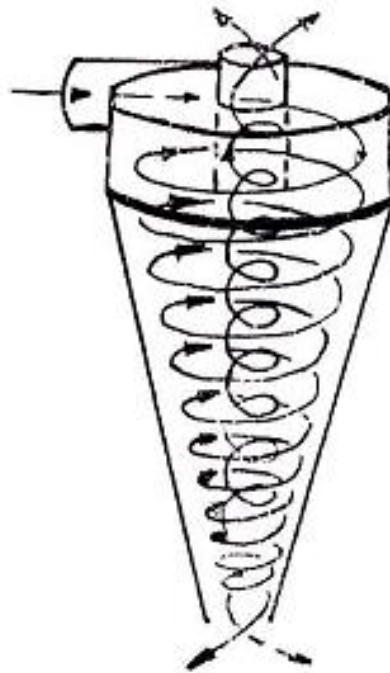


Figura 2.8: Representación esquemática del flujo ideal.

Fuente: (Universidad de Chile, 2010).

La inversión del flujo se explica por la incapacidad del ápex de canalizar toda la masa en movimiento.

Es por esto que parte del flujo asciende por el espiral interior y sale por el vortex-finder. En general, el movimiento de rotación produce movimiento relativo del particulado suspendido en el fluido, lo que permite una separación entre ellos, o en relación al fluido.

### 2.2.5 Esquema de Flujo Real

En la realidad, el diagrama de flujo ideal se ve alterado por el roce, ya que esta causa pérdidas en la velocidad tangencial, lo que redundaría en un flujo no tangencial que lleva partículas al ápex, las cuales no siguen el proceso de las espirales y descargan directamente en el underflow<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Juan Cuevas R., F.T. (2010). Diseño de hidrociclón. Universidad de Chile.

### 2.2.6 Parámetros de Repartos

A continuación, se definirán una serie de parámetros o indicadores que permitirán lograr y entender el desarrollo posterior. En cualquier operación de un hidrociclón es posible establecer el siguiente esquema, mostrado en la figura siguiente.

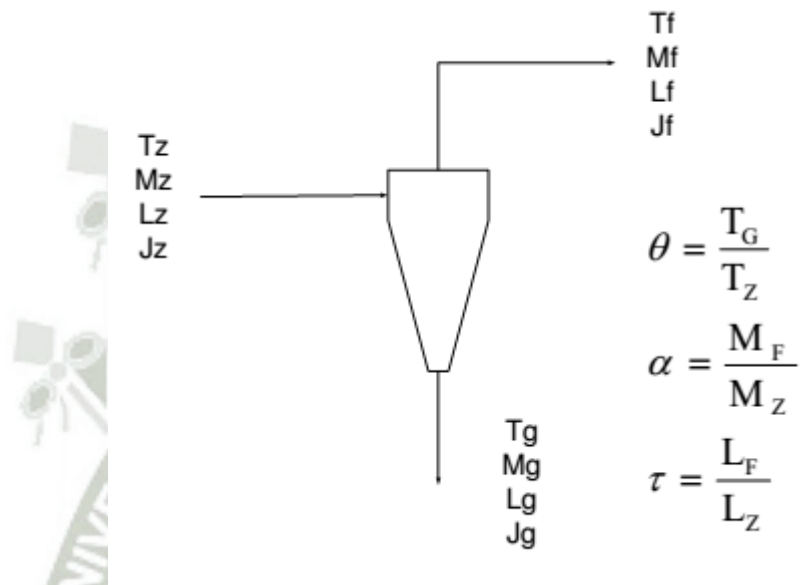


Figura 2.9: Esquema referencial de la nomenclatura a utilizar.

Fuente: (Universidad de Chile, 2010)

Siendo,

Ti: el flujo másico en tph de solido seco en la corriente i

Mi: Flujo volumétrico en  $m^3h$  de pulpa en la corriente i

Li: Volumen en  $m^3h$  de líquido en la corriente i

Ji: concentración de sólidos, expresadas en gramos de solido seco por litro de pulpa.

Se definen entonces los siguientes parámetros:

#### Reparto de sólidos ( $\theta$ )

$$\theta = \frac{T_G}{T_Z} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Es la relación de masa de sólidos de alimentación que es descargada por la corriente de gruesos

### Reparto de pulpa ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{M_F}{M_Z} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Es la relación de volumen de pulpa de alimentación que es evacuado por la corriente de finos Reparto de líquido ( $\tau$ ):

$$\tau = \frac{L_F}{L_Z} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Relación de volumen de líquido de alimentación que es evacuado por la corriente de finos.

A pesar de la simplicidad de las relaciones anteriores, en operaciones normales resulta prácticamente imposible cuantificar las masas de sólido o volúmenes de pulpa en las diferentes corrientes de hidrociclón, por lo que se hace necesario desarrollar un método de cálculo de estos parámetros, en base a las concentraciones de sólidos, las cuales pueden ser determinadas fácilmente mediante toma de muestras<sup>13</sup>.

El desarrollo de estas expresiones es extenso, por lo que se omitirá, presentándose solamente los resultados finales, los cuales son:

Reparto de Sólido

$$\theta = \frac{J_Z - J_F}{J_G - J_F} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde se tiene que:

$J_Z$ : Concentración de sólidos a la entrada.

$J_G$ : Concentración de sólidos en el grueso.

$J_F$ : Concentración de sólidos en el fino.

Además,  $\epsilon$  se define como el factor de Espesado, que a su vez se define como:

$$\epsilon = \frac{J_G}{J_Z} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Reparto de pulpa

$$\alpha = \frac{J_G - J_Z}{J_G - J_F} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Reparto de Líquido

<sup>13</sup> Juan Cuevas R., F.T. (2010). Diseño de hidrociclón. Universidad de Chile.

$$\alpha = \frac{\gamma_S - J_F}{\gamma_S - J_Z} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Dónde:

$\gamma_S$ : Densidad específica del sólido.

## 2.3 RED DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL DEVICENET

### 2.3.1 Introducción

DeviceNet es una red digital, multi-punto para conexión entre sensores, actuadores y sistemas de automatización industrial en general. Esta tecnología fue desarrollada para tener máxima flexibilidad entre los equipos de campo e interoperabilidad entre diferentes fabricantes.

Introducido originalmente en 1994 por Allen-Bradley, DeviceNet transfirió su tecnología a ODVA en 1995. La ODVA (Open DeviceNet Vendor Association) es una organización sin fines de lucro compuesta por cientos de empresas alrededor del mundo que mantiene, difunde y promueve la tecnología DeviceNet y otras redes basadas en el protocolo CIP (Common Industrial Protocol). Actualmente más de 300 empresas están registradas como miembros, y 800 más ofrecen productos DeviceNet de todo el mundo<sup>14</sup>.

La red DeviceNet está clasificada en el nivel de red llamada device bus, cuyas características principales son: alta velocidad, comunicación a nivel de byte que incluye comunicación con equipos discretos y analógicos y el alto poder de diagnóstico de los dispositivos de la red (como se muestra en la figura).

---

<sup>14</sup> SMAR Equipamentos Industriais, (2016). <http://www.smar.com/espanol/devicenet>

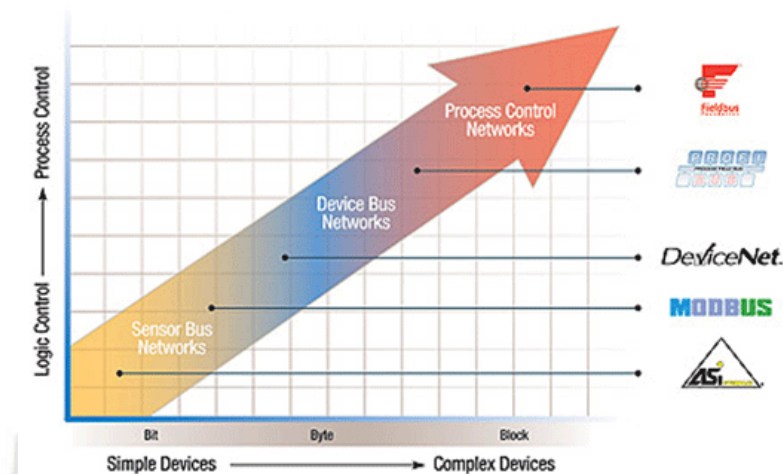


Figura 2.10: Avances tecnológicos.

Fuente: (Equipamentos Industriais SMAR, 2015).

La tecnología “DeviceNet” es un estándar abierto de automatización con el objetivo de transportar 2 tipos principales de información:

- Datos cíclicos de sensores y actuadores, directamente relacionados al control y,
- Datos no cíclicos indirectamente relacionados al control, como configuración y diagnóstico.

Los datos cíclicos representan la información intercambiada periódicamente entre el equipo de campo y el controlador. Por otro lado, los no cíclicos son informaciones intercambiadas eventualmente durante la configuración o diagnóstico del equipo de campo.

La capa física y de acceso a la red “DeviceNet” está basada en la tecnología CAN (Controller Area Network) y las capas superiores en el protocolo CIP, que define una arquitectura basada en objetos y conexiones entre ellos<sup>15</sup>.

Una red “DeviceNet” puede tener hasta 64 dispositivos donde cada dispositivo ocupa un nodo en la red, direccionados de 0 a 63. Cualquiera de ellos puede ser utilizado. No hay ninguna restricción para el uso de ellos, aunque el uso de los 63 no es recomendable, ya que se utiliza para la puesta en marcha.

Un ejemplo de red “DeviceNet” se muestra en la figura siguiente.

<sup>15</sup> SMAR Equipamentos Industriais, (2016). <http://www.smar.com/espanol/devicenet>



- Varias fuentes pueden ser usadas en la misma red para satisfacer las necesidades de la aplicación en términos de carga y la longitud de los cables.
- Velocidad de comunicación seleccionable: de 125,250 y 500 kbps.
- Comunicación basada en conexiones de E/S y modelo de pregunta y respuesta.
- Diagnóstico de cada equipo y de la red.
- Transporte eficiente de datos de control discretos y analógicos.
- Detección de direccionamiento duplicado en la red.
- Mecanismo de comunicación extremadamente robusto para interferencias electromagnéticas<sup>16</sup>.

### 2.3.3 Modos de Comunicación

El protocolo DeviceNet tiene dos tipos básicos de mensajes, mensaje cíclico I/O y explícito. Cada uno de ellos es adecuado a un determinado tipo de dato, conforme se describe:

- **Cíclic I/O:** Tipo de telegrama síncrono dedicado al procesamiento de datos prioritarios entre un productor y uno o más consumidores. Se dividen de acuerdo con el método de intercambio de datos. Los principales son:
- **Polled:** Método de comunicación en que el maestro envía un telegrama a cada uno de su lista de esclavos (scan list). Así mismo, en cuanto reciba la solicitud, el esclavo responde rápidamente a la solicitud del maestro. Este proceso es repetido hasta que todos sean consultados, reiniciando el ciclo.
- **Bit-strobe:** Método de comunicación donde el maestro envía un telegrama por la red con 8 bytes de datos. Cada bit de estos 8 bytes representa un esclavo que, se direcciona y responde de acuerdo con lo programado.

Cambio de Estado: método de comunicación donde el intercambio de datos entre el maestro y esclavo que ocurre cuando hubo cambios en los valores monitoreados/controlados, hasta un cierto límite de tiempo. Cuando este límite es alcanzado, la transmisión y recepción ocurren, incluso sin alteraciones. La configuración de esta variable de tiempo es hecha en el programa de configuración de la red.

---

<sup>16</sup> SMAR Equipamentos Industriais, (2016). <http://www.smar.com/espanol/devicenet>.

- **Cíclico:** Otro método de comunicación muy semejante al anterior. La única diferencia está en la producción y consumo de mensajes. En este tipo, todo el intercambio de datos ocurre en intervalos regulares de tiempo, independiente de ser alterados o no. Este periodo también es ajustado en el software de configuración de la red.
- **Mensaje Explícito:** Tipo de telegrama de uso general y no prioritario. Utilizado principalmente en tareas asíncronas tales como parametrización y configuración del equipo.

### 2.3.4 Sistema de Cableado

El sistema de cableado comienza en el punto de conexión de un dispositivo a la red. El sistema de cableado DeviceNet utiliza una topología de línea troncal y línea de derivación.

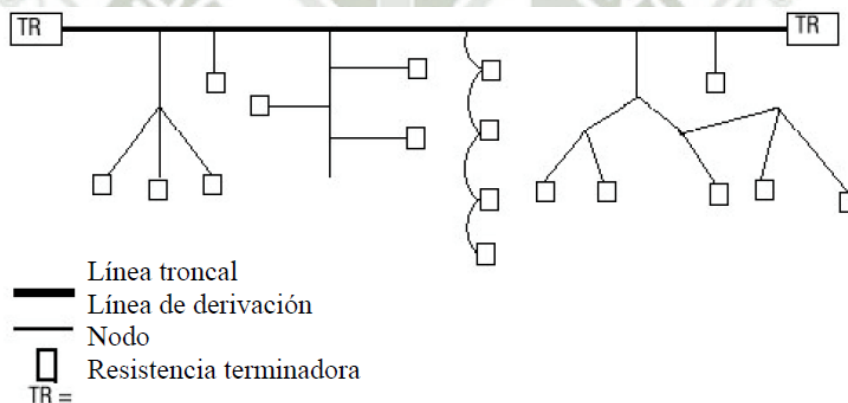


Figura 2.12: Descripción del sistema de cableado.

Fuente: (Equipamentos Industriales SMAR, 2015)

Los dispositivos se pueden conectar mediante tres tipos de cable

Tabla 2.1: Opciones de cable.

Utilizar este cable	Para
<b>Cable redondo grueso</b> (Round thick)	Se utiliza generalmente como línea troncal, tiene un diámetro exterior de 12.2 mm. También se puede utilizar como línea de derivación.

<p><b>Cable redondo delgado</b> (Round Thin)</p>	<p>Se utiliza generalmente como línea de derivación, tiene un diámetro exterior de 6.9 mm. Cable mucho más pequeño y flexible que el cable grueso. También se puede utilizar como línea troncal.</p>
<p><b>Cable Plano (Flat)</b> <b>Clase 1:</b> Soporta hasta 8 A. <b>Clase 2:</b> No superar los 4 A.</p>	<p>Con unas dimensiones de 19.3 mm x 5.3 mm. Este cable se utiliza generalmente como línea troncal, no tiene longitudes predeterminadas y es posible poner conexiones libremente donde se necesitan.</p>
<p>Cable derivación KwikLink (KwikLink drop Line)</p>	<p>Cable de derivación de 4 conductores no blindado para uso exclusivo de sistemas KwikLink.</p>

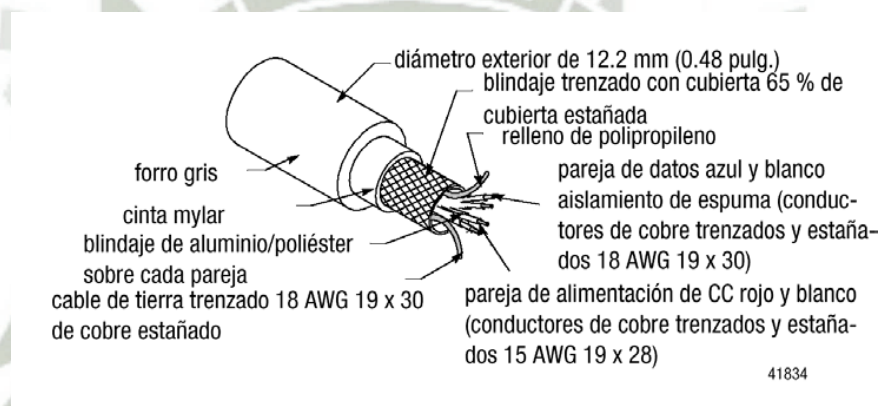


Figura 2.13: Cable redondo grueso.

Fuente: (Equipamentos Industriales SMAR, 2015)

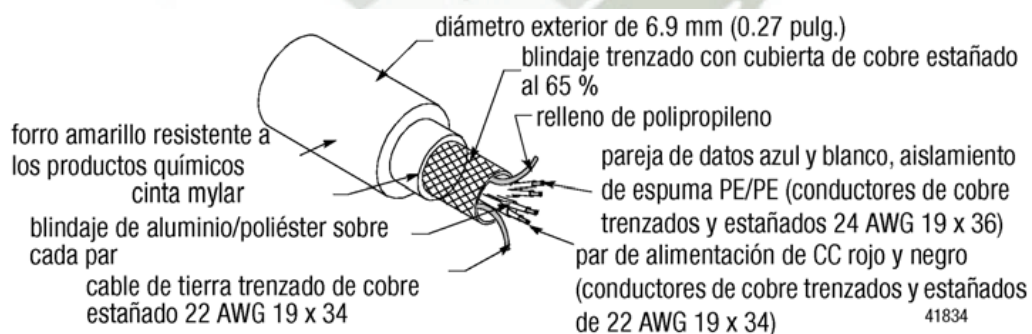


Figura 2.14: Cable redondo delgado.

Fuente: (Equipamentos Industriales SMAR, 2015).

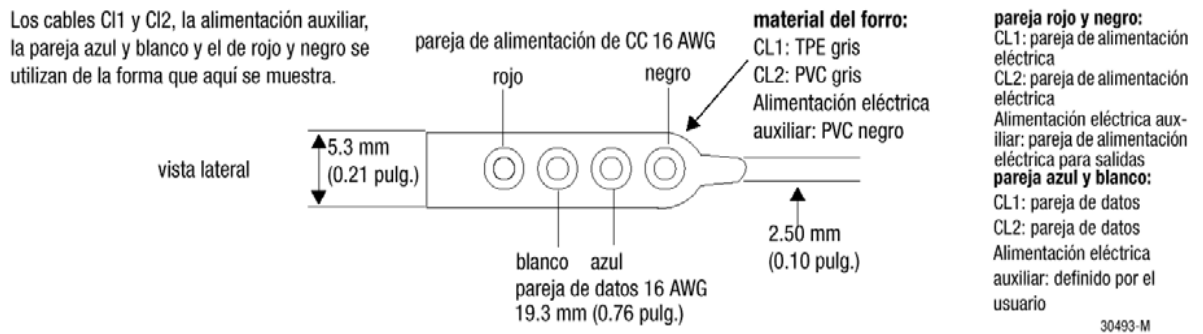


Figura 2.15: Cable plano.

Fuente: (Equipamentos Industriales SMAR, 2015).

### 2.3.4.1 Cable Redondo Delgado

Dimensionado para 3 A, con un diámetro exterior de 6.9 mm, conecta dispositivos a la línea de derivación DeviceNet mediante tomas de conexión. También puede utilizarse como cable troncal.

El cable redondo delgado contiene cinco conductores: un par trenzado (rojo y negro) para 24V dc de alimentación, un par trenzado (azul y blanco) para señal y una malla<sup>17</sup>.

Tabla 2.2: Identificación de conductores.

Color del cable.	Identificación del cable.	Cable redondo.	Cable plano.
Blanco	CAN_H	Señal	Señal
Azul	CAN_L	Señal	Señal
Desnudo	Drenaje	Blindaje	
Negro	V-	Alimentación	Alimentación
Rojo	V+	Alimentación	Alimentación

### 2.3.4.2 Conectores

Hay tres tipos básicos de conectores: abierto, mini-cerrado y micro-cerrado. El uso de uno o de otro depende de la aplicación y de las características del equipo o de la

<sup>17</sup> Departamento de Capacitación (2011). Teoría de redes. Curso Redes Control Net - Device Net. TUNNING

conexión que debe ser hecha. Veja en las figuras siguientes la codificación de los hilos en cada tipo<sup>18</sup>.

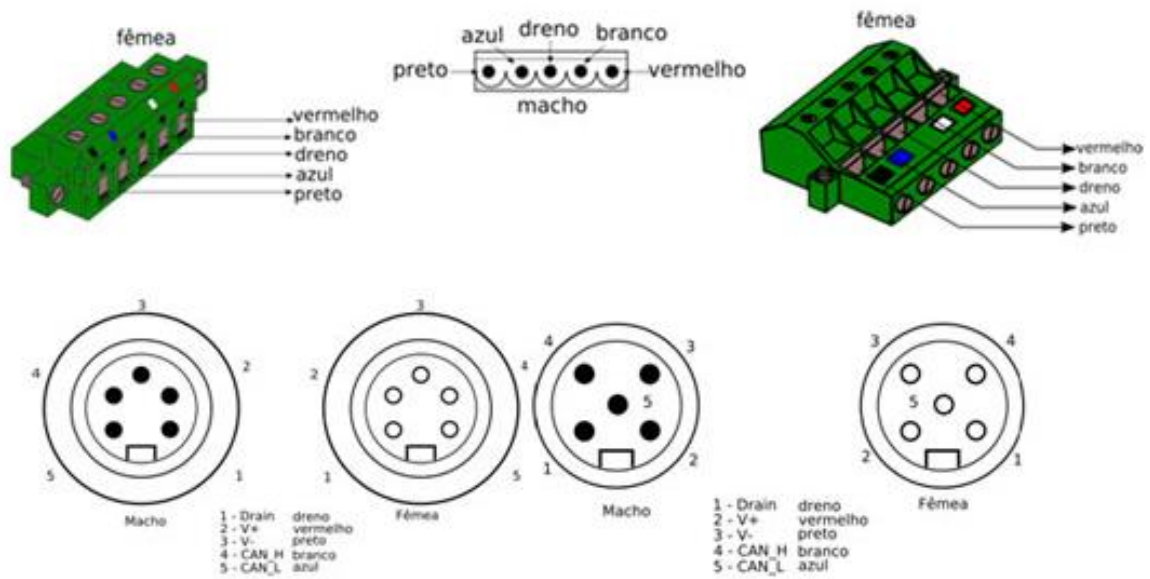


Figura 2.16: Conector abierto.

Fuente: (Equipamentos Industriales SMAR, 2015).

### 2.3.4.3 Terminadores de la red

Los terminadores en la red DeviceNet ayudan a minimizar las reflexiones en la comunicación y son esenciales para el funcionamiento de la red. Los resistores de terminación (121W, 1%, ¼ W) deben ser colocados en los extremos del bus, entre los hilos CAN\_H y CAN\_L (blanco y azul).

- No coloque el terminador dentro de un equipo o en el conector porque al ser movido también mueve el terminador causando una falla general en la red. Deje los terminadores siempre independientes y aislé los extremos del bus, de preferencia dentro de las cajas protectoras o cajas de paso.
- Para verificar si los terminadores están presentes en la red, mida la resistencia entre los hilos CAN\_H y CAN\_L (blanco y azul) con la red desenergizada: la resistencia medida debe estar entre 50 y 60 Ohms<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Departamento de Capacitación (2011). Teoría de redes. Curso Redes Control Net - Device Net. TUNNING

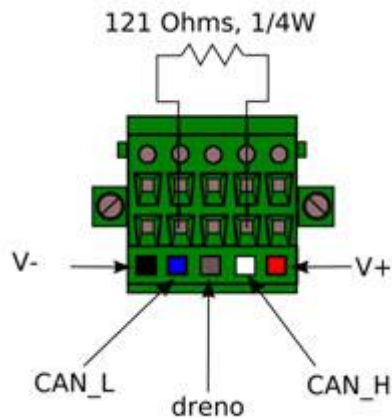


Figura 2.17: Conexión de los resistores de terminación.

Fuente: (Equipamentos Industriales SMAR, 2015)

## 2.4 SISTEMAS DE CONTROL

### 2.4.1 PLC Compact Logix L32E

El controlador CompactLogix 1769 ofrece control, comunicación y elementos de E/S avanzados en un paquete de control distribuido.

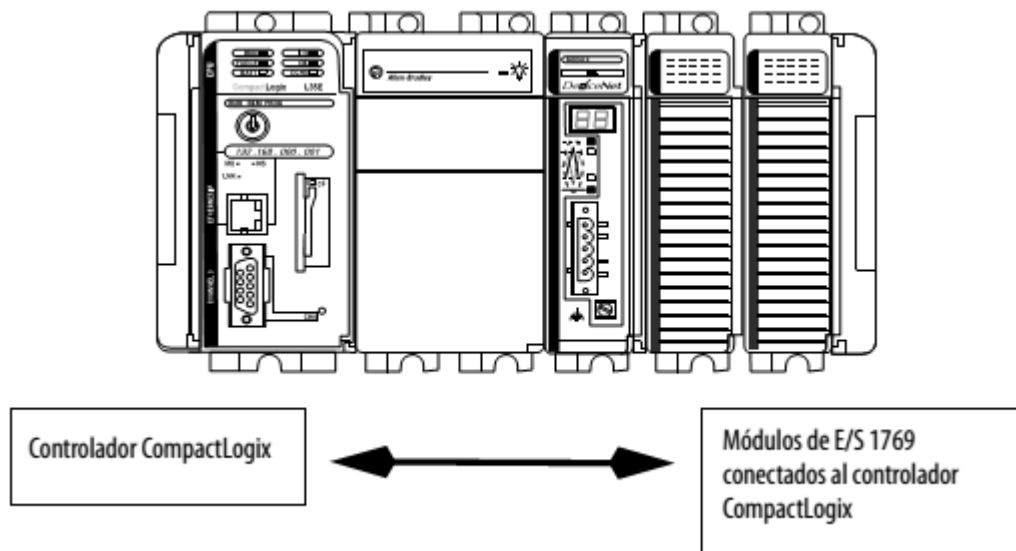


Figura 2.18: Controlador CompactLogix y módulos de E/S 1769.

Fuente: (Rockwell Automation, 2013).

<sup>19</sup> Departamento de Capacitación (2011). Teoría de redes. Curso Redes Control Net - Device Net. TUNNING

Para un sistema más flexible, se utiliza:

- Varios controladores en un único chasis.
- Varios controladores unidos a través de redes.
- E/S en varias plataformas que se distribuyen en muchos lugares y conectadas a través de varios vínculos de E/S<sup>20</sup>.

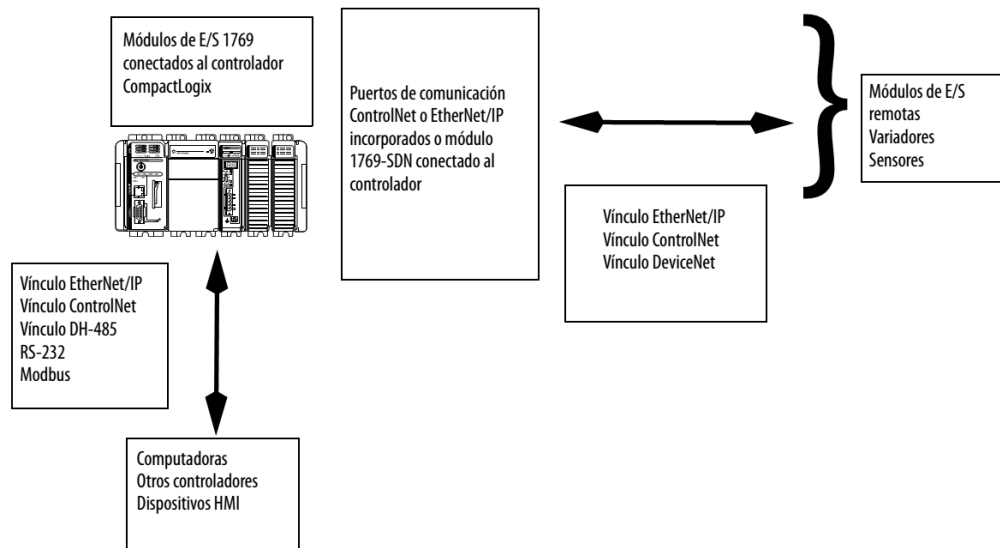


Figura 2.19: Descripción general del sistema CompactLogix.

Fuente: (Rockwell Automation, 2013).

El controlador CompactLogix, parte de la familia de controladores Logix, proporciona un sistema pequeño, eficiente y rentable que consta de lo siguiente:

- Software de programación RSLogix™ 5000.
- Puertos incorporados de comunicación para redes EtherNet/IP (solo 1769-L32E y 1769-L35E) y ControlNet (solo 1769-L32C y 1769-L35CR solo).
- Un módulo de interface de comunicación 1769-SDN proporciona control de E/S y la configuración remota de los dispositivos a través de DeviceNet.
- Un puerto serial incorporado en cada controlador CompactLogix.
- Módulos Compact I/O que proporcionan un sistema de E/S compacto, montado en panel o riel DIN<sup>21</sup>.

<sup>20</sup> Allen Bradley (2013). Manual del usuario de los controladores CompactLogix 1769.

<sup>21</sup> Allen Bradley (2013). Manual del usuario de los controladores CompactLogix 1769.

Controlador	Memoria disponible	Opciones de comunicación	Número de tareas admitidas	Número de módulos de E/S locales admitidos
1769-L35CR	1.5 MB	1 puerto ControlNet - admite medios redundantes 1 puerto serial RS-232 (protocolos de sistema o del usuario)	8	30
1769-L35E		1 puerto EtherNet/IP 1 puerto serial RS-232 (protocolos de sistema o del usuario)		
1769-L32C	750 KB	1 puerto ControlNet 1 puerto serial RS-232 (protocolos de sistema o del usuario)	6	16
1769-L32E		1 puerto EtherNet/IP 1 puerto serial RS-232 (protocolos de sistema o del usuario)		
1769-L31	512 KB	1 puerto serial RS-232 (protocolos de sistema o del usuario) 1 puerto serial RS-232 (solo protocolo del sistema)	4	

Figura 2.20: Combinación de controladores CompactLogix.

Fuente: (Rockwell Automation, 2013).

#### 2.4.1.1 Diseño de un Sistema CompactLogix

Al diseñar un sistema CompactLogix, determine la configuración de red y la posición de los componentes en cada ubicación. Para el diseño de su sistema CompactLogix, se debe seleccionar lo siguiente:

- Dispositivos de E/S
- Una red de comunicación
- Controladores
- Fuentes de alimentación
- Software.

#### 2.4.2 Módulo E3 Plus (Relé de sobrecarga de estado sólido E3 y E3 Plus)

##### 2.4.2.1 Descripción

El relé de sobrecarga E3 es un relé de sobrecarga electrónico de estado sólido multifunciones basado en microprocesador para la protección de motores de inducción de jaula de ardilla con corrientes nominales de 0.4...5,000 A. Hay dos versiones disponibles: el E3 y el E3 Plus<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> Allen Bradley (2004), Relé de sobrecarga de estado sólido E3 y E3 Plus. Manual de usuario.

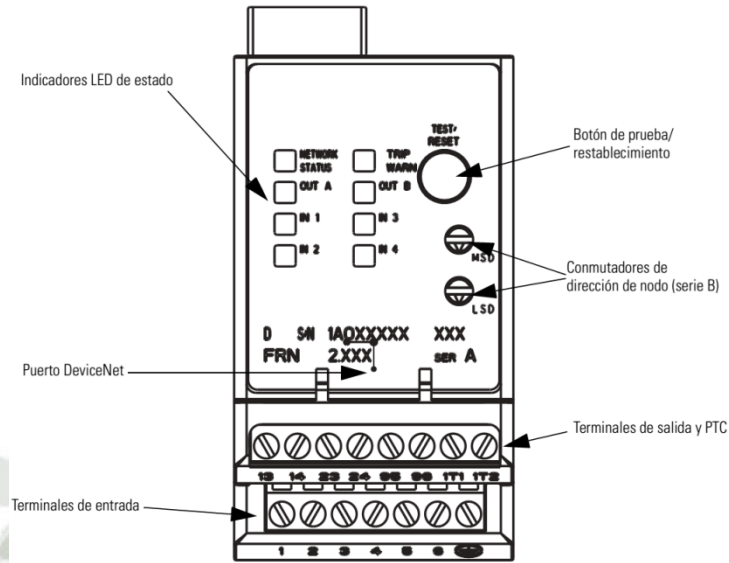


Figura 2.21: Descripción general de las facilidades del E3 y E3 Plus.

Fuente: (Rockwell Automation, 2013)

Explicación de números de catálogo:

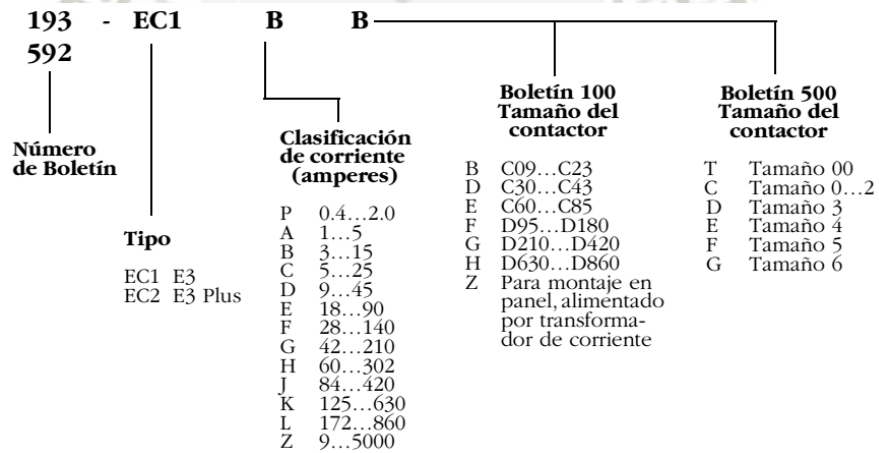


Figura 2.22: Catálogo de los E3 Plus.

Fuente: (Rockwell Automation, 2013)

### 2.4.2.2 Operación Monofásica/Trifásica

El relé de sobrecarga E3 se programa en la fábrica para operación trifásica. El instalador puede cambiarlo fácilmente para funcionamiento monofásico accediendo y cambiando el valor del parámetro 27<sup>23</sup>.

- Funciones de protección y advertencia

El relé de sobrecarga E3 proporciona las siguientes funciones de protección y advertencia:

- Sobrecarga
- Pérdida de fase (disparo solamente)
- Paro (disparo solamente)
- Obstrucción
- Carga insuficiente
- Desequilibrio de corriente
- Fallo de tierra (E3 Plus solamente)
- Entrada de termistor (PTC) (E3 Plus solamente)

### 2.4.2.3 Parámetros de Monitoreo de Corriente

El relé de sobrecarga E3 permite al usuario monitorear los siguientes datos de operación mediante la red DeviceNet:

- Corrientes de cada fase (en amperes)
- Corrientes de cada fase (como porcentaje de la corriente de plena carga del motor)
- Corriente promedio (en amperes)
- Corriente promedio (como porcentaje de la corriente de plena carga del motor)
- Porcentaje de capacidad térmica utilizada
- Porcentaje de desequilibrio de corriente
- Corriente de fallo de tierra (en amperes) (E3 Plus solamente)

---

<sup>23</sup> Allen Bradley (2004), Relé de sobrecarga de estado sólido E3 y E3 Plus. Manual de usuario.

#### 2.4.2.4 Parámetros de Diagnostico

El relé de sobrecarga E3 permite al usuario monitorear la siguiente información de diagnóstico mediante la red DeviceNet:

- Estado de dispositivo
- Estado de disparo
- Estado de advertencia
- Tiempo hasta un disparo por sobrecarga (en segundos)
- Tiempo hasta restablecimiento tras un disparo por sobrecarga (en segundos)
- Historial de los últimos 5 disparos

#### 2.4.2.5 Relé de Disparo

Cuando el relé de sobrecarga E3 está en estado desactivado, el contacto del relé de disparo está abierto. El contacto del relé de disparo se cierra aproximadamente 2.35 segundos después de que se aplica la alimentación eléctrica, si no existe una condición de disparo.

#### 2.4.2.6 Entradas y Salidas

Además del relé de disparo, el relé de sobrecarga E3 proporciona entradas y salidas según la Tabla.

Tipo	Entradas p	Salidas
E3	2	1
E3 Plus	4	2

❶ Las entradas son para 24 VCC solamente.

Figura 2.23: Entradas y salidas del E3 Plus.

Fuente: (Rockwell Automation, 2013).

El estado de cada una puede monitorearse a través de la red DeviceNet mediante el parámetro 21, Device Status, o mediante uno de los ensambles de entrada. Además, las salidas pueden controlarse a través de la red mediante uno de los ensambles de salida<sup>24</sup>.

Los relés de sobrecarga E3 Plus serie B ofrecen mayor flexibilidad al proporcionar la capacidad de realizar funciones de control con las entradas y salidas a través de DeviceLogix.

Las entradas del relé de sobrecarga E3 serie B se configuran independientemente para restablecimiento de disparo, disparo remoto, operación normal y de dos velocidades.

#### 2.4.2.7 Indicación de Estado

El relé de sobrecarga E3 cuenta con los siguientes indicadores LED:

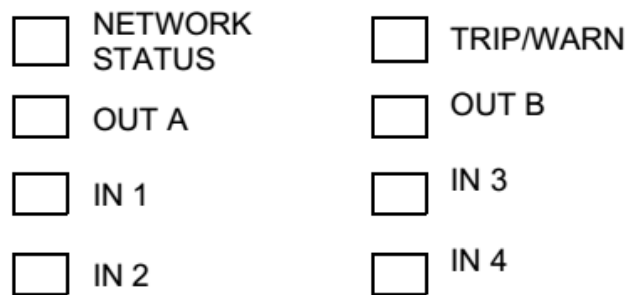


Figura 2.24: Indicadores del estado del E3 Plus.

Fuente: (Rockwell Automation, 2013).

- NETWORK STATUS:
- Este indicador LED verde/rojo indica el estado de la conexión de red.
- TRIP/WARN:
- Este indicador LED rojo/ámbar parpadea para emitir un código de color ámbar al presentarse una condición de advertencia y un código de color rojo cuando se dispara. La advertencia o el código de disparo se indican mediante el número de parpadeos en secuencia. Consulte la etiqueta situada en el costado del producto para obtener información sobre los códigos de disparo/advertencia.
- OUT A y OUT B:

<sup>24</sup> Allen Bradley (2004), Relé de sobrecarga de estado sólido E3 y E3 Plus. Manual de usuario.

- Estos indicadores LED de color ámbar se iluminan cuando los contactos de salida reciben el comando cerrar.
- IN 1...4:
- Estos indicadores LED de color ámbar se iluminan cuando se cierra el contacto del dispositivo conectado por el usuario.

#### 2.4.2.8 Botón de Prueba/Restablecimiento

El botón de prueba/restablecimiento ubicado en la parte frontal del relé de sobrecarga E3 permite al usuario realizar lo siguiente:

- **Prueba:** El contacto de relé de disparo se abrirá si el relé de sobrecarga E3 está en una condición no disparada y se presiona el botón de prueba/restablecimiento. El botón de prueba/restablecimiento debe presionarse por 2 segundos como mínimo (en dispositivos con número de revisión de firmware (FRN) 2.000 y posteriores) para activar la función de prueba.
- **Restablecimiento:** El contacto de relé de disparo se cerrará si el relé de sobrecarga E3 está en una condición disparada, la causa del disparo ya no existe y se presiona el botón de prueba/restablecimiento.
- **Conmutadores de dirección de nodo:** Los conmutadores de dirección de nodo ubicados en la parte frontal del relé de sobrecarga E3 serie B proporcionan medios físicos para establecer el valor de la dirección de nodo del dispositivo. Cuando se coloca en los conmutadores un valor mayor que 63, la dirección de nodo se puede configurar por software<sup>25</sup>.

#### 2.4.2.9 Compatibilidad con DeviceNet

El relé de sobrecarga E3 acepta la siguiente funcionalidad DeviceNet.

- Transmisión de mensajes de E/S encuestadas
- Mensajes de cambio de estado/cíclicos
- Mensajes explícitos
- Transmisión de mensajes de recuperación de nodo Grupo 4 – fuera de línea

---

<sup>25</sup> Allen Bradley (2004), Relé de sobrecarga de estado sólido E3 y E3 Plus. Manual de usuario.

- Compatibilidad total con objetos de parámetros
- Identificación automática de velocidad en baudios
- Valor de coherencia de configuración
- UCMM (administrador de mensajes no conectados) (dispositivos serie B solamente)
- Tecnología de componentes DeviceLogix (E3 Plus solamente, dispositivos serie B solamente)

### 2.4.3 Control PID

Un sistema de control PID es un mecanismo de control con realimentación y está compuesto por el control proporcional, integral y derivativo, la suma de estas tres acciones de control se usa para que el sistema de control sea más estable y tenga más exactitud (es decir elimine el error o la diferencia entre el valor medido y el valor deseado), logrando controlar mejor al proceso, la siguiente figura muestra el bloque PID de un sistema de control realimentado.

#### 2.4.3.1 Estructura del PID

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad:

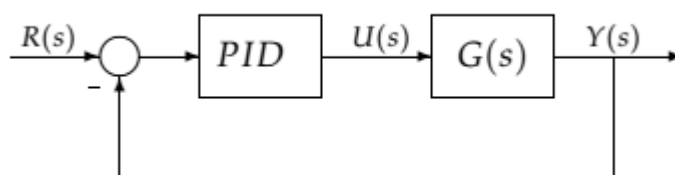


Figura 2.25: Diagrama de bloques.

Fuente: (Katsuhiko Ogata, 2010)

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID<sup>26</sup>.

<sup>26</sup> Virginia Mazzone (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

- P: acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:  $u(t) = K_P \cdot e(t)$ , que descrita desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p(1) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable.

Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

- I: acción de control integral: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

La señal de control  $u(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero. Por lo que se concluye que, dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

- PI: acción de control proporcional-integral, se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde  $T_i$  se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativa la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

- PD: acción de control proporcional-derivativa, se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia  $K$ , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable<sup>27</sup>.

- PID: acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Su función transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

#### 2.4.3.2 Métodos clásicos de ajuste de Ziegler and Nichols

En esta sección veremos dos métodos de ajuste de las ganancias de un controlador PID, el Método de Oscilación o Método de Respuesta en Frecuencia y el Método Basado en la Curva Reacción o Método de Respuesta al Escalón. El primero se basa en un lazo de

<sup>27</sup> Virginia Mazzone (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

control solo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al periodo de esas oscilaciones, podemos establecer las ganancias del controlador PID. El otro método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador PID. Estos métodos fueron propuestos por Ziegler y Nichols (Z-N) en 1942, quienes se basaron en la práctica para desarrollarlos<sup>28</sup>.

### A. Método de Oscilación

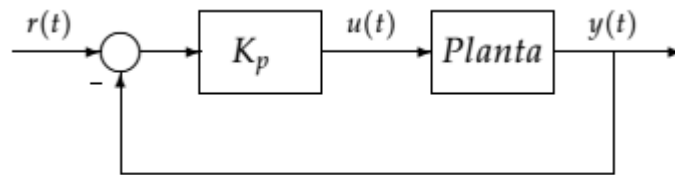


Figura 2.26: Lazo cerrado solo con ganancia proporcional.

Función: (Katsuhiko Ogata, 2010)

Este procedimiento es válido solo para plantas estables a lazo abierto y se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Utilizando solo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar que se requieren oscilaciones lineales y que estas deben ser observadas en la salida del controlador.
- Registrar la ganancia crítica del controlador  $K_p = K_c$  y el periodo de oscilación de la salida del controlador,  $P_c$ . (en el diagrama de Nyquist, corresponde a que  $K_c G(j\omega)$  cruza el punto  $(-1, 0)$  cuando  $K_p = K_c$ ).
- Ajustar los parámetros del controlador según la Tabla:

<sup>28</sup> Virginia Mazzone (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

Tabla 2.3: Parámetros de ajuste de PID.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.50K_c$		
PI	$0.45K_c$	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$\frac{P_c}{8}$

Dicha tabla fue obtenida por Ziegler y Nichols quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para plantas que puedan describirse satisfactoriamente por un modelo de la forma:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{v_0 s + 1}, \text{ donde } v_0 > 0 \quad \text{Ecuación 2.18}$$

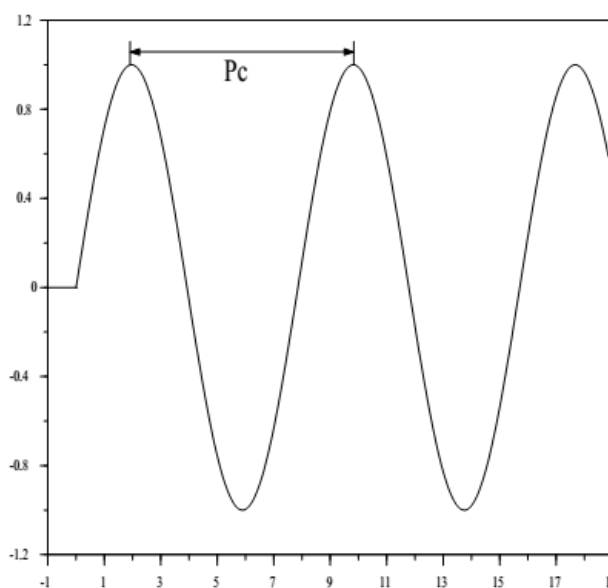


Figura 2.27: Respuesta de la planta con ganancia crítica.

Fuente: (Katsuhiko Ogata, 2010)

### B. Método Basado en la Curva Reacción

Muchas plantas, pueden ser descritas satisfactoriamente por el modelo:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{v_0 s + 1}, \text{ donde } v_0 > 0 \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Una versión cuantitativa lineal de este modelo puede ser obtenida mediante un experimento a lazo abierto, utilizando el siguiente procedimiento:

- Con la planta a lazo abierto, llevar a la planta a un punto de operación normal. Digamos que la salida de la planta se estabiliza en  $y(t) = y_0$  para una entrada constante  $u(t) = u_0$ .
- En el instante inicial  $t_0$ , aplicar un cambio en la entrada escalón, desde  $u_0$  a  $u_\infty$  (esto debería ser en un rango de 10 al 20% de rango completo).
- Registrar la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Supongamos que la curva que se obtiene es la que se muestra en la Figura. Esta curva se llama curva de reacción del proceso<sup>29</sup>.

Calcular los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_\infty}; \quad \tau_0 = t_1 - t_0; \quad v_0 = t_2 - t_1 \quad \text{Ecuación 2.20}$$

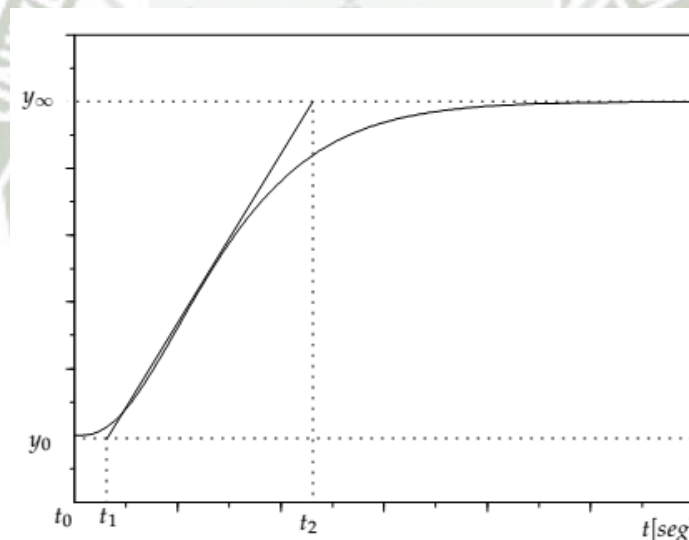


Figura 2.28: Respuesta de la planta a un escalón.

Fuente: (Katsuhiko Ogata, 2010)

El modelo obtenido puede ser utilizado para varios métodos de ajuste de controladores PID. Uno de estos también fue propuesto por Ziegler y Nichols. El objetivo de diseño es alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo

<sup>29</sup> Virginia Mazzone (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

pico de la respuesta a una referencia escalón. Los parámetros sugeridos por Z-N son los que se muestran en la Tabla:

Tabla 2.4: Parámetros de Ajustes.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{v_0}{K_0\tau_0}$		
PI	$\frac{0.9v_0}{K_0\tau_0}$	$3\tau_0$	
PID	$\frac{1.2v_0}{K_0\tau_0}$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$



## CAPITULO III

# INGENIERIA DEL PROYECTO

### 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

En el siguiente diagrama se muestra el sentido de flujo del relave proveniente de la etapa de procesamiento de minerales, este relave será usado para la recuperación del agua mediante el uso de dos nidos de hidrociclones los cuales como se observa en la figura 3.1 se encuentran en cascada, estos nidos de hidrociclones estarán alimentados por una bomba cada uno, las cuales cumplen una función muy importante pues estas son las encargadas de generar el caudal de relave necesario a la velocidad adecuada para tener la mayor eficiencia de los hidrociclones. También contamos con dos bombas de recirculación de pulpa de relave uno en cada nido de hidrociclones, estas bombas tendrán la función de trasladar la pulpa de relave recuperada para un nuevo filtrado.

El material (relave) proveniente del procesamiento de minerales y de la etapa de espesamiento pasará a un proceso de filtrado que consistirá en el almacenaje del material en el tanque TK-001, este material será impulsado por la bomba PP-001 hacia el primer nido de hidrociclones para su primera etapa de filtrado, los gruesos (underflow) de esta primera etapa serán enviados al tanque TK-001 para entrar nuevamente al proceso para un nuevo filtrado, el rebose de los hidrociclones (overflow) será enviado al tanque de almacenamiento TK-002 para ser impulsados por la bomba PP-003 hacia el segundo nido de hidrociclones de donde el rebose (overflow) será el

agua de reutilización que se requiere para los nuevos procesos, el underflow pasará de retorno al proceso impulsado por la bomba PP-004.

El overflow obtenido del segundo nido de hidrociclones será depositado en una presa de relaves en la cual por proceso de sedimentación se tendrá una mejor separación para su posterior reutilización. Ver página 65.

### **3.1 MODELO MATEMÁTICO**

El presente modelo matemático comprende el estudio de la bomba centrífuga como parte importante de nuestro proyecto, pues estas hacen que funcionen los hidrociclones, estas deben cumplir las necesidades de los hidrociclones, las bombas centrífugas llevarán relaves por tuberías, deberán vencer presiones en contra, así como llevar el material hacia un punto elevado.

También se hará el modelado de los hidrociclones por ser pieza clave en la recuperación del agua mediante fuerzas centrífugas en el interior de esta.

A continuación, se hará una un modelado matemático de los principales componentes de nuestro sistema de reutilización de agua de relaves:

#### **3.1.1 MODELO DE LA BOMBA CENTRIFUGA**

Consideramos una bomba centrífuga de velocidad variable que extrae el agua de relave de un tanque y la eleva hasta las baterías de hidrociclones (nidos de hidrociclones), como se muestra en la figura 3.2.

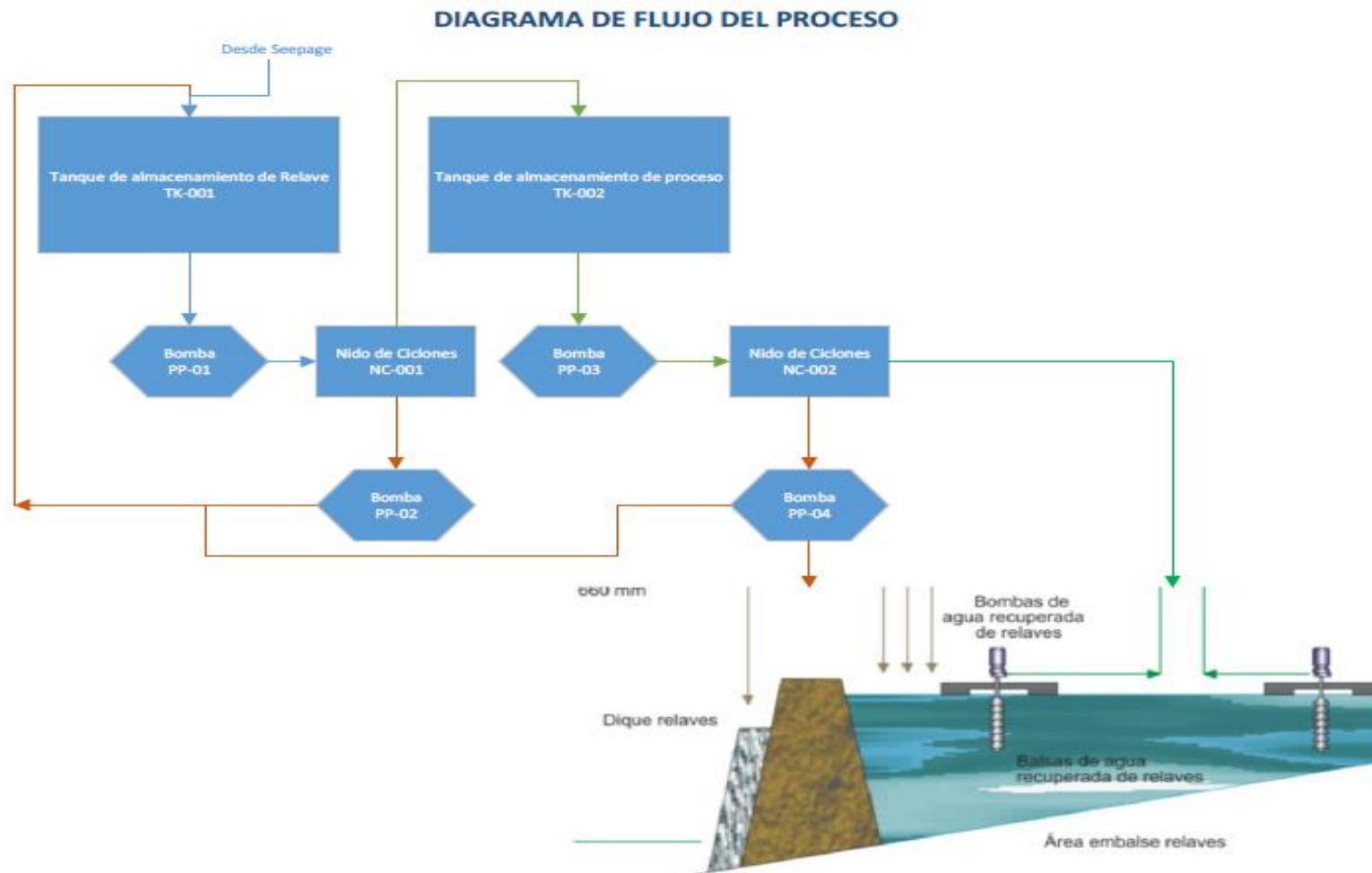


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

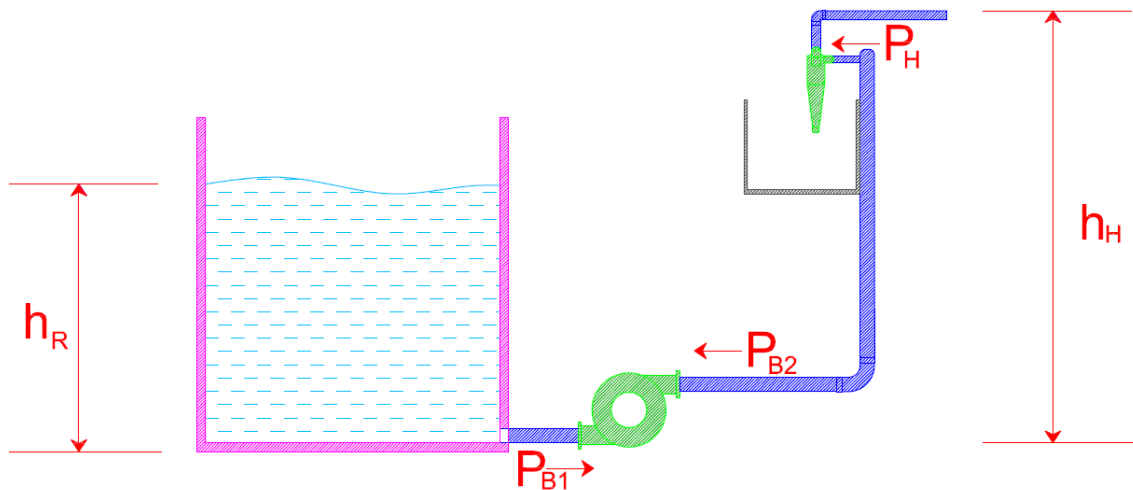


Figura 3.2: Circuito de la bomba centrífuga.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015), (Roberto Patrico Orellana Araya, 2010)

Este modelo matemático para la bomba considera flujos volumétricos y presiones. En la bomba el flujo volumétrico de alimentación es igual al de descarga " $\bar{f}_B$ " y es función de las presiones en la alimentación " $P_{B1}$ " y en la descarga " $P_{B2}$ " de la bomba, y de la velocidad " $v_B$ " de la bomba.

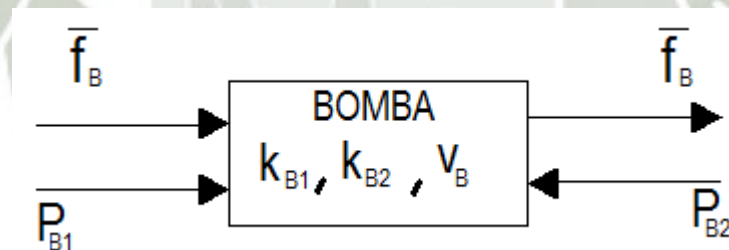


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la bomba.

Fuente: (Roberto Patrico Orellana Araya, 2010)

En donde " $k_{B1}$ " y " $k_{B2}$ " son constantes de proporcionalidad propias de cada bomba.

El flujo volumétrico de relave " $\bar{f}_B$ " que impulsa la bomba es proporcional a la velocidad de la bomba e inversamente proporcional a la diferencia entre las presiones de alimentación y de descarga:

$$\bar{f}_B = k_{B1} v_B - k_{B2} [P_{B2} - P_{B1}] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

La presión en la alimentación " $P_{B1}$ " es causada por la columna de relave en el pozo. La densidad del relave es la densidad de esta en el pozo de mineral sobrante " $\rho_{tr}$ " luego se tiene:

$$P_{B1} = \rho_{tr} g h_R \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

La presión en la descarga de la bomba será igual a la suma de la presión ejercida en la alimentación a los hidrociclones, " $P_H$ ", más el peso de la columna de relave en las cañerías que alimentan a los hidrociclones, más las pérdidas por roce del relave en las cañerías " $P_{B3}$ " y más las pérdidas singulares " $P_{B4}$ " causadas por el enfrentamiento del flujo del relave con quiebres (como codos) en las cañerías. Es decir:

$$P_{B2} = P_H + \rho_{tr} g h_H + P_{B3} + P_{B4} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Las pérdidas por fricción dependen de la velocidad del relave  $v_R$  del diámetro  $d_T$  y longitud  $L_T$  de la tubería, y de un factor de pérdidas de fricción " $k_{TF}$ " que es característico de la tubería. La ecuación que representa estas pérdidas es:

$$P_{B3} = k_{TF} \frac{L_T v_R^2}{d_T 2g} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Las pérdidas por singularidades dependen de la velocidad del relave " $v_R$ " y de las características topológicas del sistema de tuberías, las que se representan en un factor de pérdidas singulares " $k_{TS}$ ". La ecuación que representa estas pérdidas es:

$$P_{B4} = k_{TS} \frac{v_R^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Reemplazando se obtiene:

$$P_{B2} = P_H + \rho_{tr} g h_H + k_{TF} \frac{L_T v_R^2}{d_T 2g} + k_{TS} \frac{v_R^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Si  $A_T$  es el área transversal de la cañería, entonces la velocidad del relave está dada por:

$$v_R = \frac{\bar{f}_B}{A_T} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Luego:

$$P_{B2} = P_H + \rho_{tr}gh_H + k_{TF} \frac{L_T}{d_T} \frac{1}{2g} \left( \frac{\bar{f}_B}{A_T} \right)^2 + k_{TS} \frac{1}{2g} \left( \frac{\bar{f}_B}{A_T} \right)^2$$

$$P_{B2} = P_H + \rho_{tr}gh_H + \bar{f}_B^2 \left( \frac{L_T}{A_T^2 d_T} \frac{k_{TF}}{2g} + \frac{1}{A_T^2} \frac{k_{TS}}{2g} \right)$$

Sea:

$$k_{B3} = \frac{L_T}{A_T^2 d_T} \frac{k_{TF}}{2g} + \frac{1}{A_T^2} \frac{k_{TS}}{2g}$$

En que  $k_{B3}$  sólo depende de parámetros geométricos y las constantes del sistema.

Obtenemos:

$$P_{B2} = P_H + \rho_{tr}gh_H + k_{B3}\bar{f}_B^2$$

Reemplazando en la ecuación el valor de las presiones se obtiene el valor de la presión en la entrada a los hidrociclones:

$$\bar{f}_B = k_{B1} v_B - k_{B2} \left[ \left( P_H + \rho_{tr}gh_H + k_{B3}\bar{f}_B^2 \right) - \rho_{tr}gh_R \right]$$

$$\bar{f}_B = k_{B1} v_B - k_{B2} P_H - k_{B2} \left[ \rho_{tr}g(h_H - h_R) + k_{B3}\bar{f}_B^2 \right]$$

Finalmente despejando y acomodando tenemos:

$$P_H = \frac{k_{B1}}{k_{B2}} v_B - \frac{\bar{f}_B}{k_{B2}} - \rho_{tr}g(h_H - h_R) + k_{B3}\bar{f}_B^2 \quad \text{Ecuación 3.8}$$

### 3.1.2 MODELADO DEL HIDROCICLÓN

El modelo de hidrociclón [desarrollado por Lynch y Rao] con la ecuación de eficiencia [Plitt], se consideran por separado los flujos de sólidos y de agua. El diagrama en bloques del modelo de hidrociclón es el siguiente:

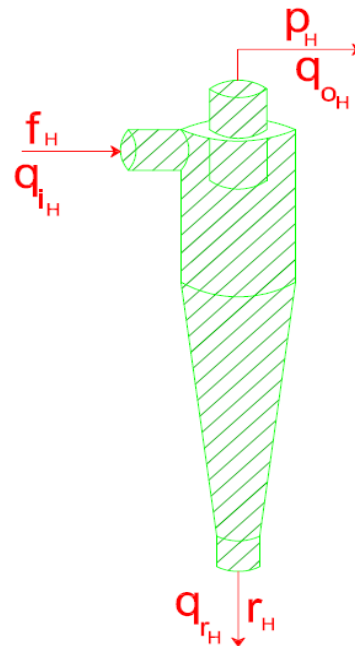


Figura 3.4: Circuito del hidrociclón.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchagua, 2015), (Roberto Patrico Orellana Araya, 2010)

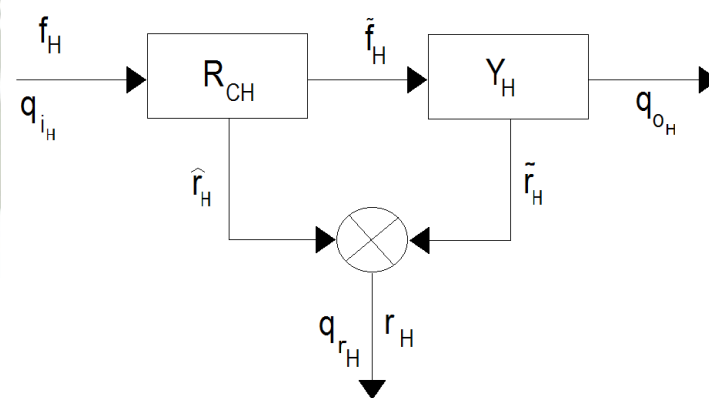


Figura 3.5: Diagrama de bloques del hidrociclón.

Fuente: (Roberto Patrico Orellana Araya, 2010)

De acuerdo a los procesos cinéticos descritos en el capítulo anterior, la densidad de agua en el relave es distinta en las diferentes zonas interiores del hidrociclón. No todo el mineral fino es arrastrado hacia el rebose, el mineral fino disuelto en una pulpa (relave) con un cierto contenido de agua mínimo es conducido al rechazo. El modelo representa este hecho separando el mineral en el rechazo en dos, uno que sólo es función de la

densidad de agua en la pulpa (el que se dice que es “arrastrado por el agua”) y otro que es producto de clasificación.

De esta forma el mineral que es arrastrado por el agua al rechazo es:

$$\hat{r}_H = R_{CH} f_H \quad \text{Ecuación 3.9}$$

En donde  $R_{CH}$  es el “Rechazo de Agua” o “Cortocircuito de Agua” y está definido como el cociente entre el flujo de agua en la alimentación  $q_{iH}$  y en el rechazo  $q_{rH}$ .

$$R_{CH} = \frac{q_{rH}}{q_{iH}} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Se tiene que:

$$q_{rH} = q_{iH} - q_{oH}$$

En forma empírica [Mular A.L & Bhauppu, R., 1978] se encontró una relación para el flujo de agua en el rebose, la cual depende del porcentaje de sólidos en la alimentación  $C_{PFH}$  y el número de Hidrociclones ( $n_H$ ).

$$q_{oH} = 1.1q_{iH} - (3.96C_{PFH} + k_{H2})n_H \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde  $k_{H2}$  es un parámetro identificable para cada hidrociclón.

Luego el mineral que va a clasificación es:

$$\tilde{f}_H = f_H - \hat{r}_H = (1 - R_{CH})f_H \quad \text{Ecuación 3.12}$$

El flujo másico de mineral que va al rechazo producto de clasificación es:

$$\tilde{r}_H = Y_H \tilde{f}_H \quad \text{Ecuación 3.13}$$

En donde  $Y$  es la matriz diagonal de clasificación, y está dada por:

$$Y_H = \begin{bmatrix} y_{H1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_{H2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & y_{Hn} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Con la ecuación:

$$y_{H1} = 1 - e^{-0.693 \left( \frac{X_i}{d_{50}} \right)^{\alpha_H}}$$

Dónde:

- $X_i$ : Tamaño representativo del intervalo de tamaño  $i$ .
- $\alpha_H$ : Parámetro de Plitt.
- $d_{50}$ : Diámetro para el cual el 50% de las partículas que son clasificadas pasan al rechazo.

Para determinar el  $d_{50}$  se desarrolló la siguiente ecuación empírica, la que es función de características físicas, de la presión de alimentación al hidrociclón y del agua en el rebose:

$$d_{50} = \exp\left(\frac{d_{vf}}{6.6} - \frac{d_{SP}}{8.9} + \frac{P_H}{10.7} - \frac{q_{oH}}{47.2n_H} + k_{H3}\right)$$

Dónde:

- $d_{vf}$ : Diámetro del buscador de vórtice (vortex finder).
- $d_{SP}$ : Diámetro del orificio de salida (spigot).
- $P_H$ : Presión de la pulpa de mineral en la alimentación de los hidrociclones.
- $k_{H3}$ : Parámetro del hidrociclón.

La presión de la pulpa de mineral en la alimentación de los hidrociclones, se determina por la siguiente ecuación empírica.

$$P_H = 13.725 \left( \frac{\bar{f}_H}{1.48d_{vf}n_H(1-C_P)^{0.125}k_{H1}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 3.15}$$

En donde  $k_{H1}$  es un parámetro del sistema y  $\bar{f}_H$  el flujo volumétrico total de pulpa en la alimentación al hidrociclón. Se puede observar que:

$$\bar{f}_H = \frac{F_H}{\rho_m} + q_{iH} = \frac{F_H}{\rho_t C_P} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

El rechazo de mineral, el que será enviado de nuevo al tanque del hidrociclón, es:

$$r_H = \hat{r}_H + \tilde{r}_H \quad \text{Ecuación 3.17}$$

En que  $\rho_m$  es la densidad del mineral,  $\rho_t$  es la densidad del relave de mineral en la entrada a los Hidrociclones (la que es igual al de la salida del pozo) y  $F_H$  es el flujo másico total de mineral en la alimentación a los hidrociclones.

Por último, tenemos que el vector de flujo másico de mineral por intervalos de tamaños en el rebose es:

$$p_H = \tilde{f}_H - \tilde{r}_H \quad \text{Ecuación 3.18}$$

### 3.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE LOS HIDROCICLONES

Para poder hacer el diseño de nuestros hidrociclones tenemos que ver el tipo que más se adecue a nuestro sistema, que cumpla con los requerimientos en el proceso de separación del agua con los sólidos. En el Capítulo 2 se mencionaron las aplicaciones de los distintos tipos de hidrociclones de lo cual podemos resumir tres tipos distintos de aplicaciones:

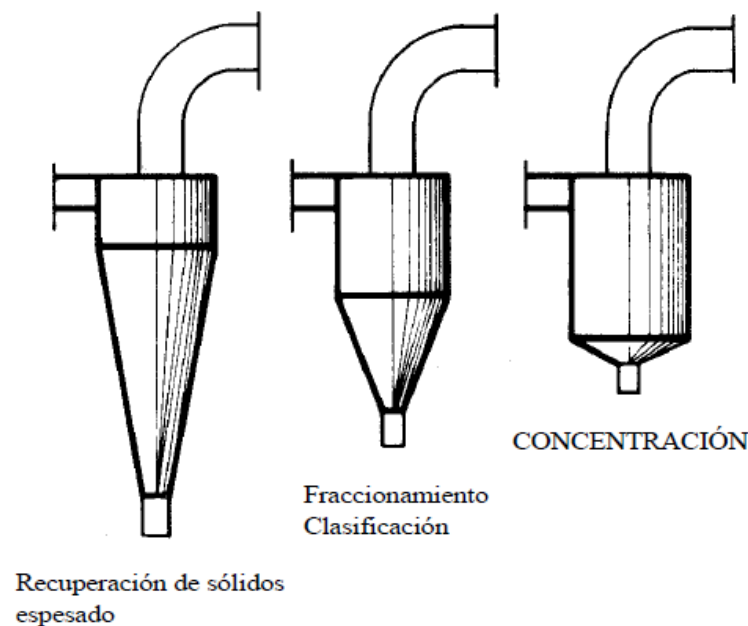


Figura 3.6: Forma de hidrociclones y su aplicación.

Fuente: (Dr. Helmut Trawinski, ---)

Considerando lo antes mencionado y realizados los estudios de arquitectura respectiva es que se optó por la construcción de un hidrociclón de recuperación de sólidos espesado de la figura 3.7 pues esta cumple los requerimientos de nuestra aplicación.

Este tipo de hidrociclón es bastante conocido en el mercado, motivo por el cual basaremos nuestro proyecto en hidrociclones ya existentes de una reconocida marca, en donde lo que se quiere obtener de este es la mayor eficiencia, y esto se obtendrá dándole el flujo adecuado a la velocidad adecuada, donde la velocidad centrifuga y la gravedad dentro del hidrociclón se encuentren en equilibrio para obtener una mejor separación de sólidos.

La forma de nuestro hidrociclón debe cumplir como mínimo las medidas de diseño para el tipo de hidrociclón, las cuales los fabricantes de hidrociclones cumplen al momento de su fabricación pues estas ya fueron probadas en laboratorios y dan como resultado las hojas de datos para que los compradores puedan elegir según la envergadura del proyecto a realizar.

En nuestro caso tomaremos como referencia hidrociclones de la marca REGABER donde se indican las dimensiones que debe de tener el hidrociclón y los rangos de caudal recomendado para este equipo.

Se tomó como referencia la siguiente tabla de la hoja de datos de REGABER:

Tabla 3.1: Datos técnicos de hidrociclón REGABER.

Datos técnicos

B pulgadas	D mm	H mm	L mm	Peso Kg	Volumen depósito Lt	Caudal comendado m <sup>3</sup> /h	Presión máx. trabajo kg/cm <sup>2</sup>	Conexiones	Conexiones purga depósito
1"	2.5"	460	140	9	2	3,5 a 7,5	8	1" RM	½" RH
1-½"	6"	720	240	18	10	7,5 a 12	8	1-½ RM	2" RH
2"	8"	735	295	20	10	11 a 17	8	2" RM	2" RH
3"	8"	830	300	27	10	18 a 34	8	3" brida	2" RH
4"	16"	1720	600	125	120	52 a 82	8	4" brida	3" Brida
6"	20"	1900	600	172	220	98 a 160	8	6" brida	3" Brida
6"	24"	2155	600	205	220	140 a 230	8	6" brida	3" Brida

Fuente: (REGABER, 2015)

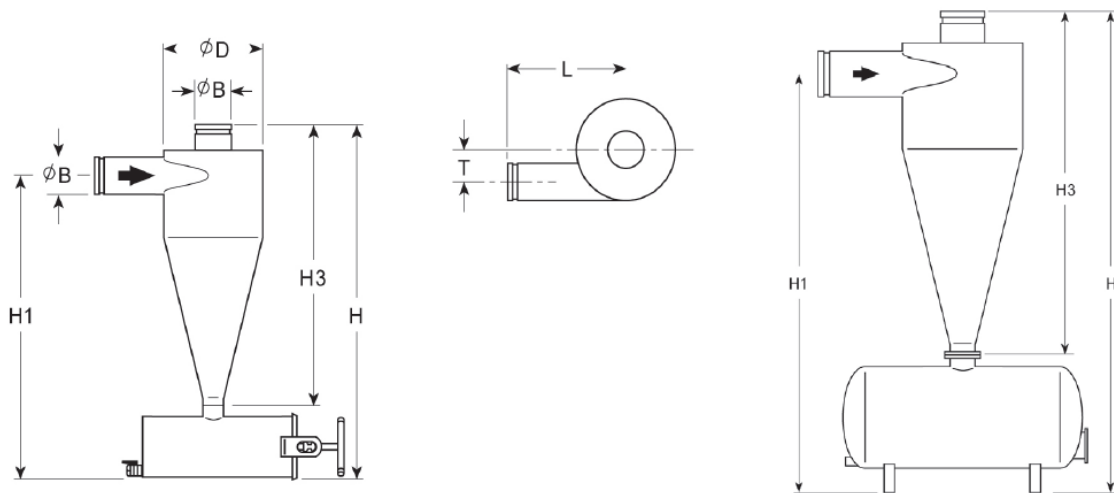


Figura 3.7: Medidas del hidrociclón.

Fuente: (REGABER, 2015)

Ya tenemos escogido el tipo de hidrociclón a utilizar y tenemos las dimensiones dadas por un conocido fabricante, donde a la vez no especifica las caudales de trabajo.

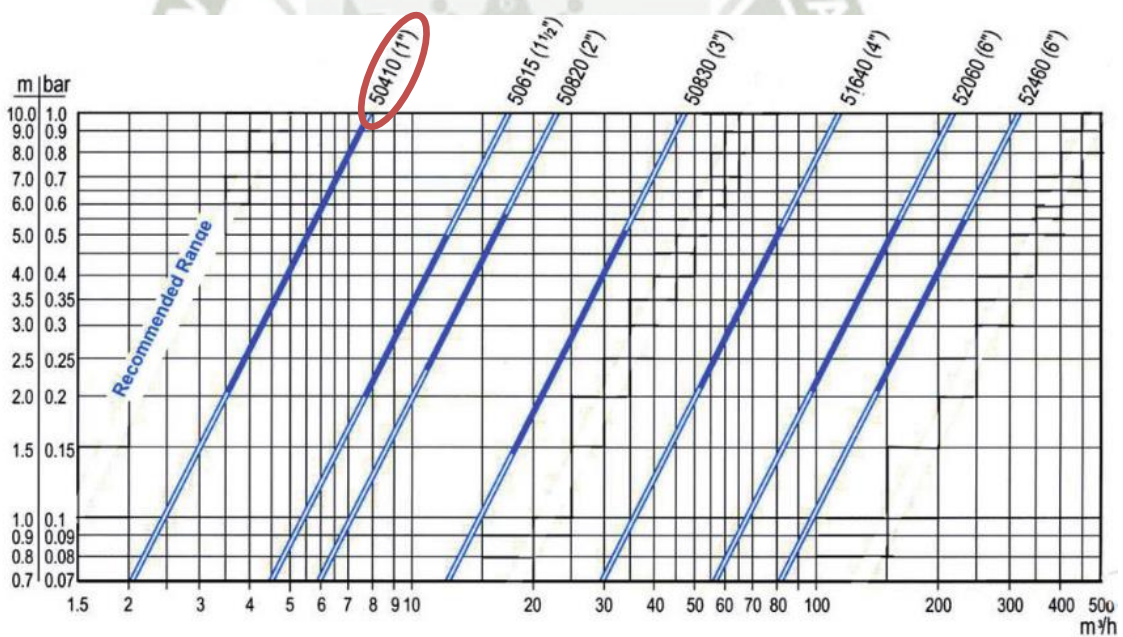


Figura 3.8: Rango de caudal de operación del hidrociclón.

Fuente: (REGABER, 2015)

A partir de esta información se fabricó nuestro hidrociclón con las siguientes dimensiones(mm):

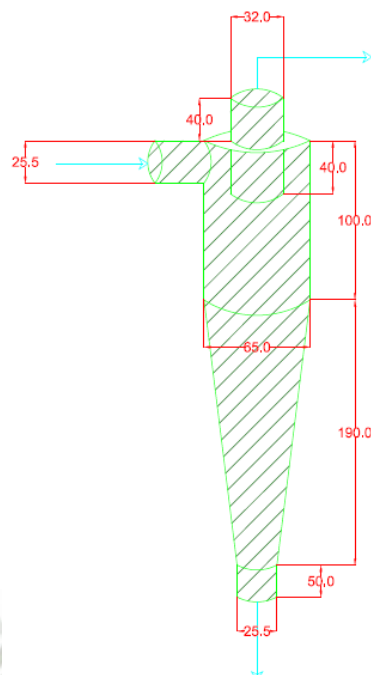
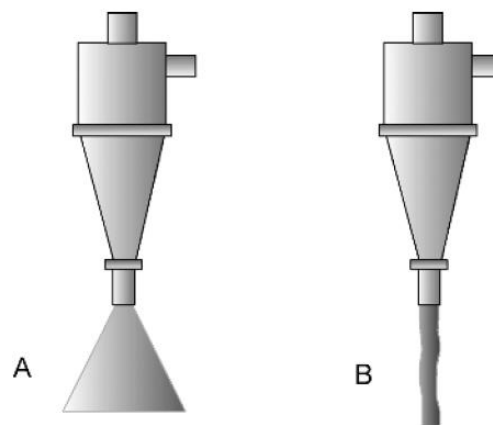


Figura 3.9: Medidas del hidrociclón a fabricar.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Ahora tendremos que tener en cuenta la bomba centrífuga la cual hará el correcto funcionamiento del hidrociclón, pues si esta no recibe un correcto caudal y/o presión del material esta no funcionara correctamente, en la figura 3.10 se muestra una descarga normal del hidrociclón, en la cual en el underflow se forma un cono del material, mientras una descarga anormal se da en forma de cuerda en el underflow lo cual nos da a conocer el mal funcionamiento del hidrociclón ya sea por falta de un caudal y/o presión adecuado para su funcionamiento.



Hydrocyclone discharge. A - Normal spray discharge, B – rope discharge

Figura 3.10: Descarga normal y anormal en de un hidrociclón.

Fuente: (Juan Cuervas R, Fernando Torres F., 2010)

Es necesario tener en cuenta que para nuestra aplicación utilizaremos bombas de potencias y caudales comerciales y de fácil adquisición por ser este un proyecto donde se realizarán pruebas.

De acuerdo a la hoja técnica de REGABER el hidrociclón fabricado tiene un rango de trabajo entre 3.5 a 7.5m<sup>3</sup>/h, para lo cual las bombas en el mercado son excesivamente superiores, motivo por el cual debemos implementar baterías de hidrociclones que utilicen el caudal de una bomba centrífuga comercial.



Figura 3.11: Placa de datos de bomba centrífuga.

Fuente: (Elaboración propia: Walter Huracchua, 2015)

Una bomba centrífuga de 2HP como el de la figura 3.11 tiene un caudal mínimo de 100L/min y un caudal máximo de 500L/min, realizamos los cálculos para llevarlo a las unidades en las que estamos trabajando:

Datos de la bomba centrífuga:  $Q_{\min} = 100 \text{ L/min}$        $Q_{\max} = 500 \text{ L/min}$

Calculamos:

$$Q = 100 \frac{\text{L}}{\text{min}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} * \frac{60\text{min}}{1\text{h}} = 6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Ecuación 3.1: Caudal mínimo por hora.

$$Q = 500 \frac{\text{L}}{\text{min}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} * \frac{60\text{min}}{1\text{h}} = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Ecuación 3.2: Caudal máximo por hora.

Consideramos que la bomba trabajará en su caudal máximo siendo este 30m<sup>3</sup>/h, esta bomba tiene una eficiencia de 90% para lo cual la bomba tendría un caudal de 27m<sup>3</sup>/h.

Para nuestro hidrociclón se obtiene aproximadamente 7m<sup>3</sup>/h, si la necesidad de alimentación es 27m<sup>3</sup>/h, luego se requieren  $27/7 = 3.85$ (4 unid.) hidrociclones de 2.5” de diámetro. El resto de dimensiones básicas se deducen de las consideraciones expuestas referentes a parámetros.

Por lo tanto, la bomba de 2 HP será suficiente para llevar al sistema a la cantidad de flujo en m<sup>3</sup>/h necesarios para poder realizar el correcto funcionamiento del hidrociclón, el cual hará la separación de la parte sólida y líquida.

A continuación se hará un esboce de nuestra planta la cual se implementará una vez construidos los hidrociclones, pues como anteriormente se mencionó está constituida por dos nidos de hidrociclones, los cuales cada una de ellas contendrá 4 hidrociclones, los cuales están ubicadas en un tanque, los cuales tomaran el agua de relave de dos tanques de alimentación para los mismos, los dos nidos de hidrociclones estarán interconectados entre ellos para que esta maximice el funcionamiento de nuestro proceso de recuperación de agua.

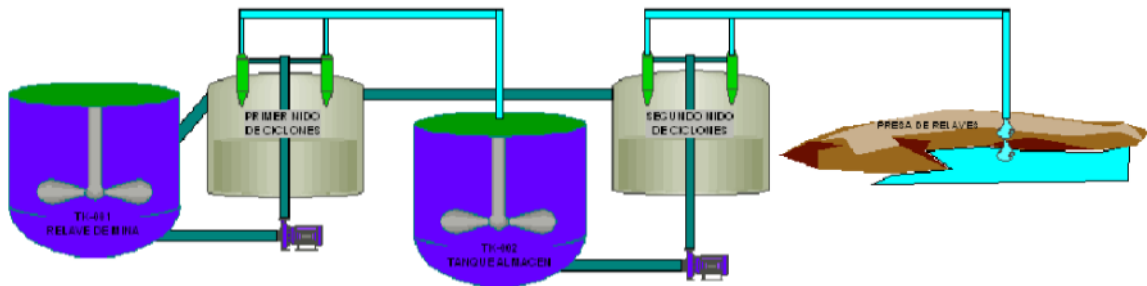


Figura 3.12: Proceso de reutilización del agua de relave.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Cabe resaltar que se hará la sintonización de los Hidrociclones para que este maximice el correcto funcionamiento de los Hidrociclones, este proceso se hará una vez construida nuestra planta (pruebas). Y con eso tendríamos una recuperación de agua el cual sería una parte muy importante en cualquier proceso minero e industrial.

### 3.3 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA

La etapa de construcción está dividida en tres áreas bastante diferenciadas una de la otra, estas son:

- Área Mecánica.
- Área Electricidad-
- Área Instrumentación

El área mecánica incluirá todo lo que refiere a la parte estructural del proyecto, donde se puede mencionar a los tanques, hidrociclones y bombas centrifugas.

El área de electricidad se refiere a la distribución de la energía, dentro de los cuales podemos mencionar el sistema de cableado, el sistema de protección (interruptores, contactores, relés).

El área de instrumentación se refiere a todos los instrumentos que se encargarán de tomar medidas y transmitir señales hacia el controlador principal que permitirán que se realice la sintonización del proceso.

La integración de estas tres áreas hará posible que nuestro sistema opere correctamente bajo un sistema de control en donde se integrará cada uno de los equipos y sus señales, los cuales deben estar sintonizados con el proceso, donde se busca la mayor eficiencia posible de nuestro sistema de separación del agua proveniente del relave.

### 3.3.1 Parte Mecánica

En esta sección se materializa el estudio de los hidrociclones, estos mismos están hechos de material INOX el cual es un material muy robusto y es capaz de soportar muy bien las grandes presiones y caudales en su interior, pues el material que estos hidrociclones procesan contienen dispersas en el agua partículas finas de arena, esta arena con agua a grandes presiones/caudales llegan a degradar cualquier material por fricción, es por ellos que se tomó esta opción al momento de su construcción.

Una vez construidos los hidrociclones estos se unieron en grupos de cuatro, cada grupo de cuatro hidrociclones conforman un nido, en este caso tenemos dos etapas de filtrado es por ello que contamos con dos nidos de hidrociclones.



Figura 3.13: Primer nido de hidrociclones.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)



Figura 3.14: Segundo nido de hidrociclones.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Las conexiones de tanque a bomba y de bomba a nido de hidrociclones se realiza a través de tubería galvanizada de 2". La succión de cada hidrociclón es con tubería de 1", cada hidrociclón tiene un overflow y un underflow de 1" de acuerdo a las dimensiones dadas por el fabricante REGABER.

Así mismo se tomaron tanques cilíndricos para almacenamiento y alimentación de los relaves hacia el nido de hidrociclones, desde los tanques el relave será impulsado por las bombas centrifugas, para poder obtener así finalmente el líquido separado en el segundo nido de hidrociclones (en el overflow).



Figura 3.15: Primera bomba centrífuga de 2HP (1er nido de hidrociclones).

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)



Figura 3.16: Segunda bomba centrífuga de 2HP (2do nido de hidrociclones).

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Además de las bombas centrífugas de los nidos de hidrociclones, tenemos bombas centrífugas de rebombeo del agua de relave de los tanques para que esta esté recirculando en los tanques de alimentación de los respectivos nidos de hidrociclones.



Figura 3.17: Bomba centrífuga de rebombeo del agua de los tanques.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchagua, 2015)

A continuación, se muestra los nidos de hidrociclones, los tanques y tuberías ensambladas, conjuntamente con las bombas centrifugas de bombeo y rebombeo del agua de relaves, con esto se terminaría con la parte mecánica dando paso a las partes eléctrico- instrumental para que nuestra planta pueda trabajar correctamente.



Figura 3.18: Sistema de recuperación de agua de relaves (parte mecánica).

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchagua, 2015)

### 3.3.2 Parte Eléctrica.

En esta sección se tomó en consideración la protección de los circuitos eléctricos en especial de las bombas centrifugas, pues estas tienen que tener un cuidado especial, para esto se tomó los relés de sobrecarga E3 Plus, así mismo se contaron con llaves termo magnéticas y contactores.

A continuación, en la figura 3.18 se muestra el plano eléctrico, donde se observa el cableado de fuerza y control de las bombas de alimentación a los hidrociclones y también el de las bombas de recirculación del material proveniente del underflow de los hidrociclones.

Cabe resaltar que el relé de sobrecarga E3 Plus solo estará para las bombas que alimentan los nidos de hidrociclones mas no en las bombas centrifugas de rebombeo, pues estas solo hacen recircular el material, como se sabe el relé de sobrecarga proporciona protección a las bombas centrifugas de sobrecorriente, falla a tierra, baja tensión, etc. En el caso de las bombas centrifugas de rebombeo se utilizó el 100-DNY-41R como un arrancador de motor.

Tanto el relé de protección E3 Plus y el 100-DNY41R están en conexión mediante la red DeviceNet esta a su vez a un PLC, esta parte se mostrará con más detalle en la sección de instrumentación.

En la figura 3.19 se muestra el tablero de fuerza y control de las bombas centrifugas, donde se hace el uso de interruptores termomagnéticos, contactores y relés de protección.

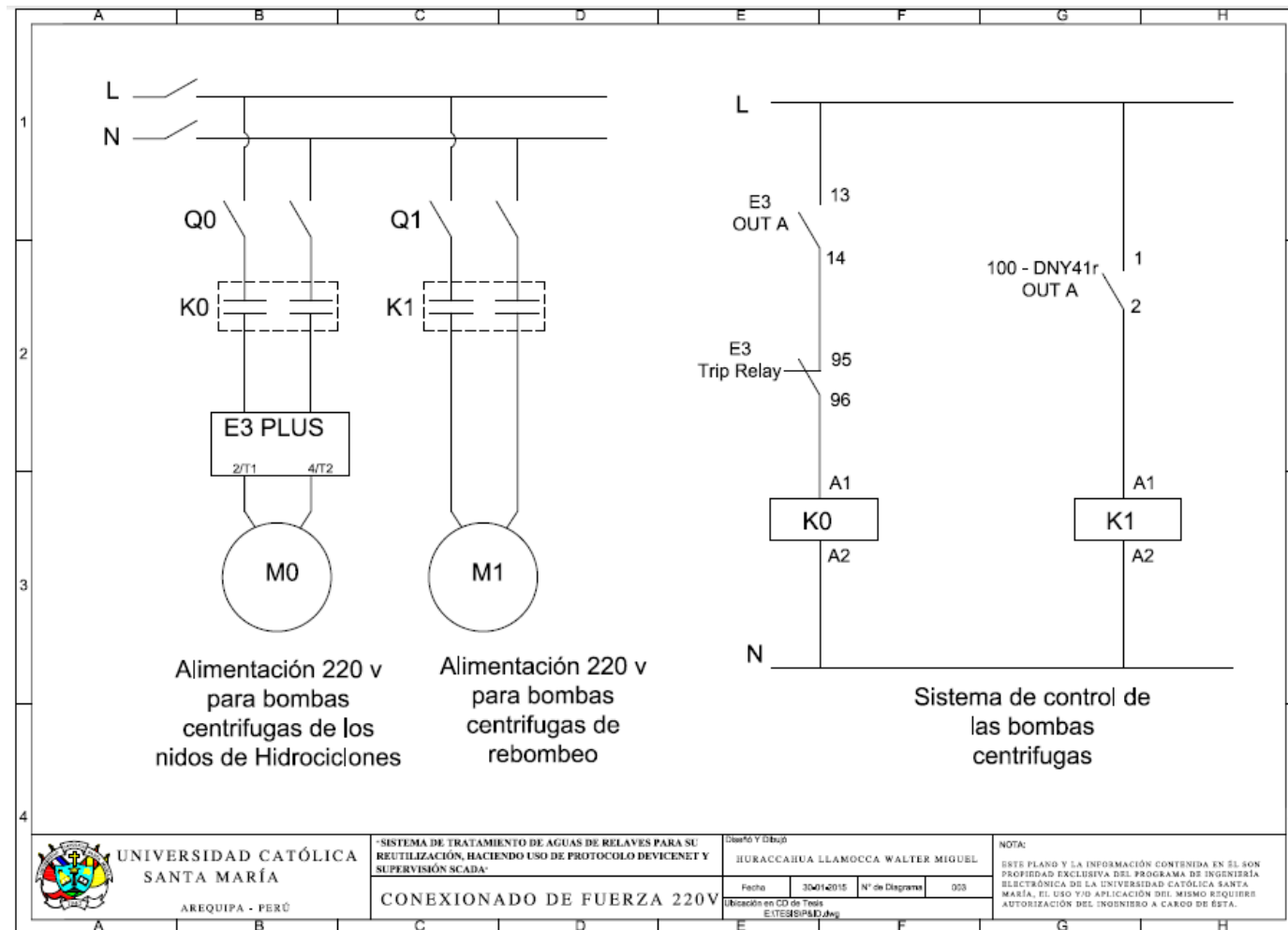


Figura 3.19: Esquema eléctrico de las bombas centrifugas.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)



Figura 3.20: Tablero de fuerza de las bombas centrífugas.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

En la figura 3.20 se puede observar el tablero de control de todo el sistema, donde se encuentra el controlador PLC, relés de protección y los dispositivos que corresponden al protocolo DeviceNet.



Figura 3.21: Tablero de control e instrumentación.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

### 3.3.3 Parte de instrumentación

En esta sección se realizó el P&ID de nuestra planta para poder entender los diferentes instrumentos y sensores, su ubicación y función, teniendo en cuenta el diseño de nuestra planta, estos son: sensores de nivel binarios, flujómetro, relé de sobrecarga, arrancador de motores, (100DNY41R), el PLC el cual contendrá la lógica programada.

En el P&ID se muestra el conexionado de los diferentes instrumentos ubicación de los mismos, ubicación de los hidrociclones, el sentido de flujo y el conexionado de las tuberías y de todo el sistema en sí.

En la figura 3.23 se muestra la ubicación de los sensores binarios de nivel, en este caso en el tanque de nidos de hidrociclones los cuales constan de dos sensores posicionados en un nivel máximo y un nivel mínimo, los cuales se aplicarán como bajo nivel de relave y alto nivel de relave. Estos serán permisivos de las bombas de centrifugas de alimentación a los hidrociclones y para las bombas centrifugas de recirculación.



Figura 3.22: Ubicación de los sensores binarios.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

En la figura 3.24 se observa el diagrama de conexionado de control, donde se muestran las señales provenientes de los instrumentos, ya sea en protocolo DeviceNet o señales analógicas(Flujómetro) y las señales discreta

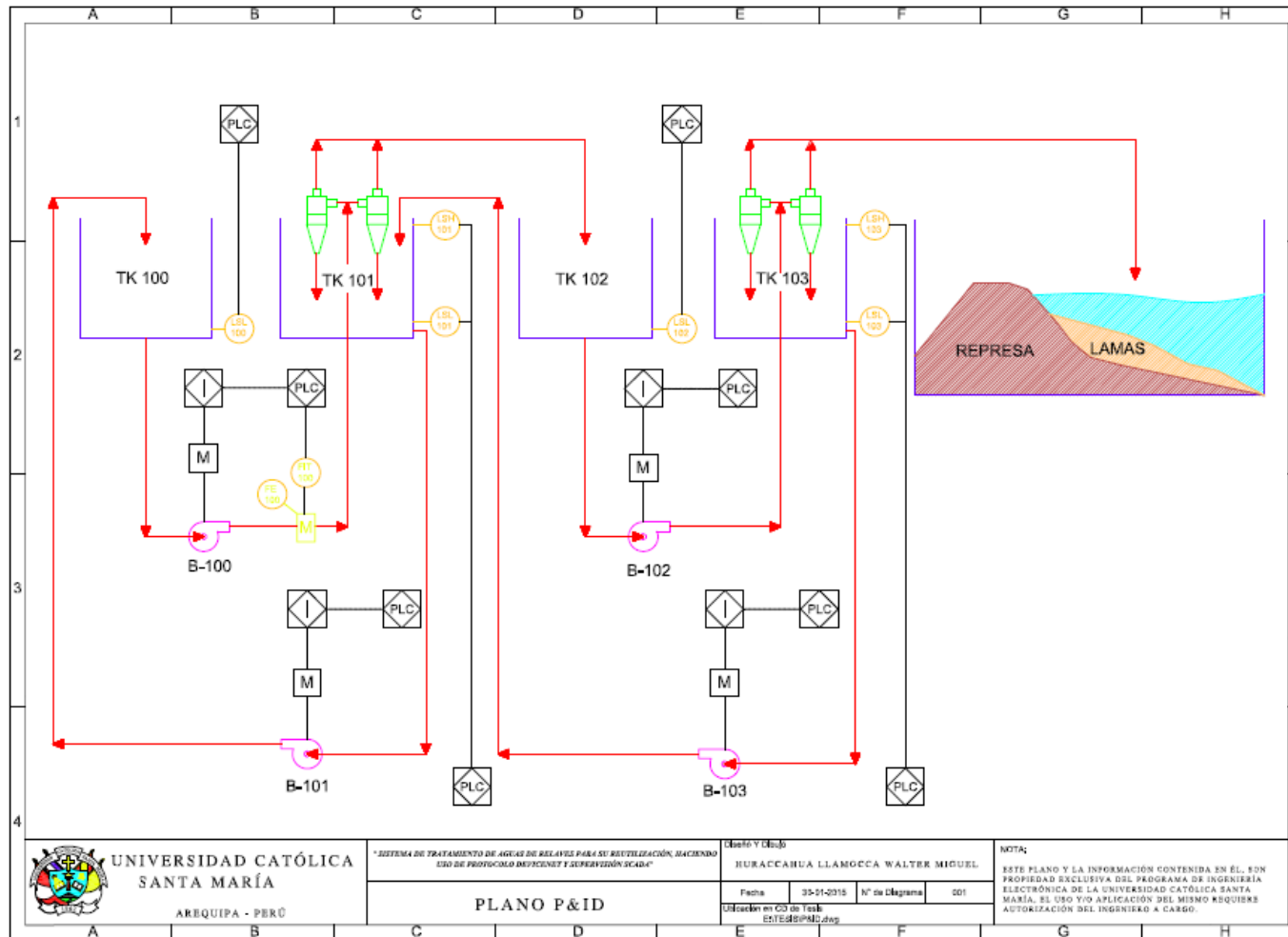


Figura 3.23: Diagrama P&ID del sistema.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

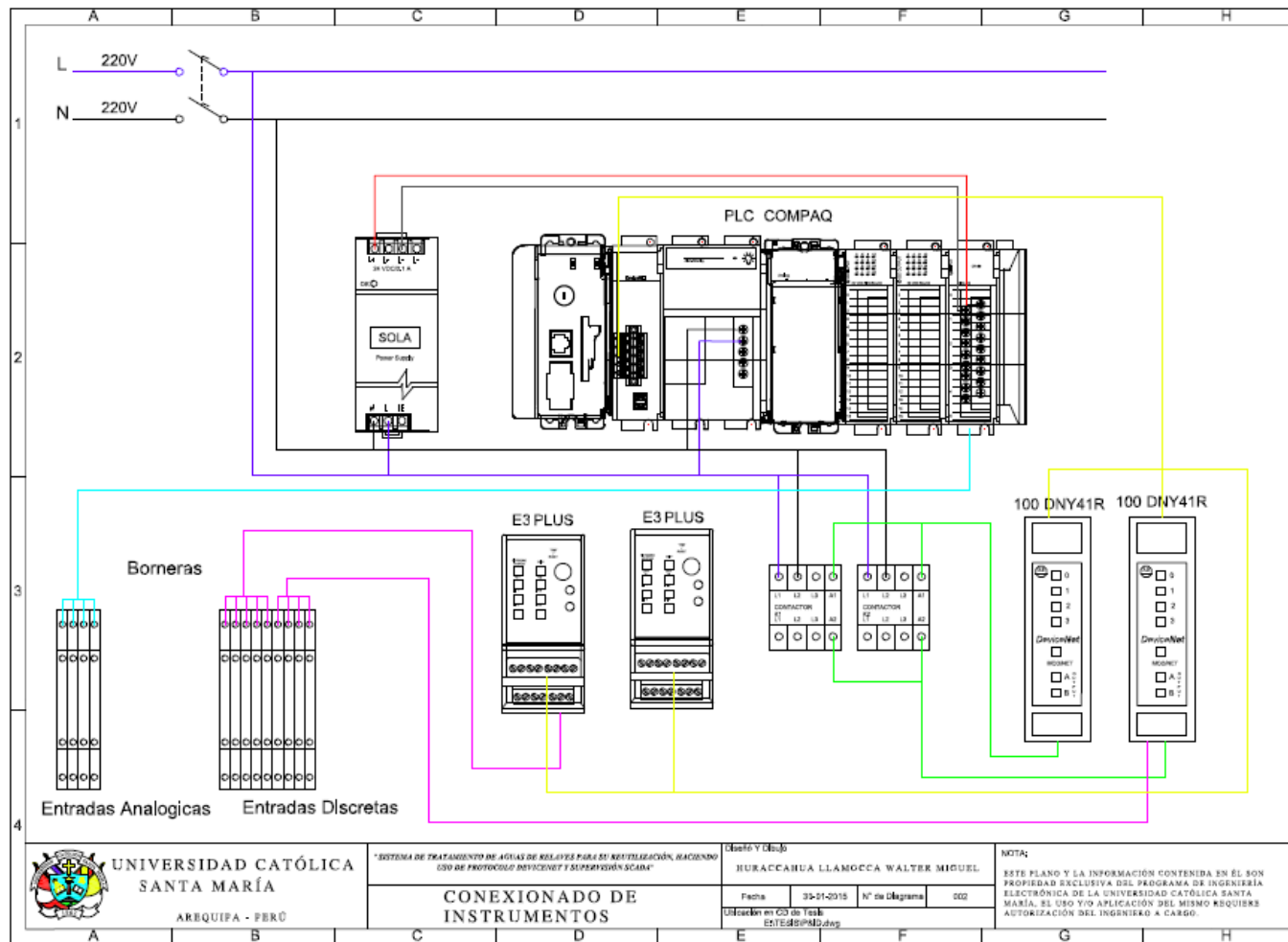


Figura 3.24: Esquema de conexión del tablero de control e instrumentación.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchagua, 2015)

Teniendo el esquema de conexionado del tablero de instrumentación, conectamos los instrumentos y equipos, con esto solo sería cuestión de conectar los sensores binarios de nivel (0V y 24V), flujómetro (4-20mA), hacia las respectivas borneras de salida del tablero.



Figura 3.25: Tablero de control e instrumentación.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

### 3.4 CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE EQUIPOS MEDIANTE LOS SOFTWARES DE ROCKWELL AUTOMATION

- Se realiza el cableado por medio de puerto Ethernet del Compact Logix y la PC
- Se realiza el cableado de La red DeviceNet, el maestro y los esclavos.

### 3.4.1 INTRODUCCIÓN.

Para la realización de este proyecto de tesis se hizo uso de software de Rockwell Automation de Allen Bradley, entre ellos RSlinx, RSlogix 5000, Factory Talk, RSNetWork.

A continuación, se hará la configuración de los equipos así mismo se mencionará el uso detallado de cada uno de estos softwares.

### 3.4.2 RSLINX

El RSlinx es el software que permite configurar y supervisar la red de comunicación en la que se encuentra el autómatas CompactLogix, este permite al usuario trabajar sobre las comunicaciones PC-PLC o sobre las comunicaciones entre los dispositivos conectados al backplane del autómatas mediante en control bus.

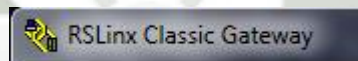


Figura 3.26: RSLinx Classic.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

Desde la PC se puede entrar en la CPU del autómatas con el software de programación RSLogix de Allen Bradley.

- **Configuración del driver.**

A continuación, se da una serie de pasos para la configuración del driver con el cual se desarrolló en proyecto:

- ✓ Abrir el RSLinx

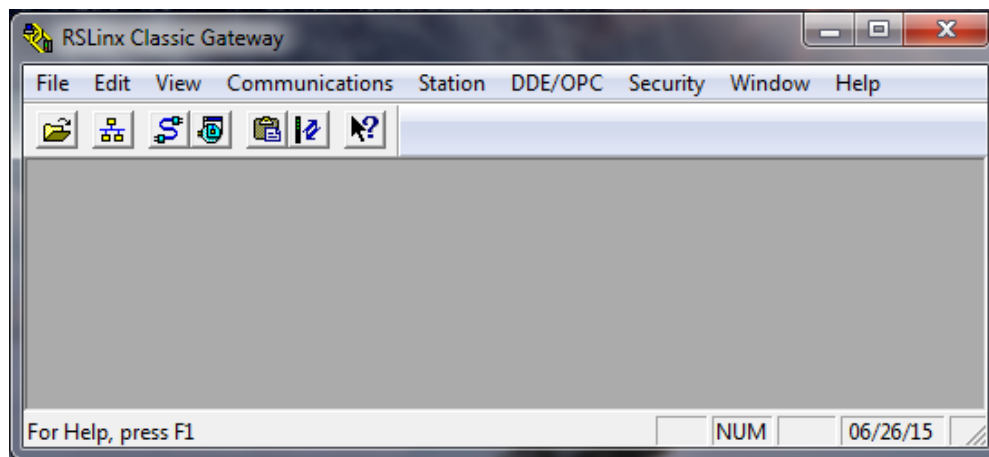


Figura 3.27: RSLinx Classic ventana de trabajo.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Desde la barra principal, elegir Communications y luego Configure Drivers...

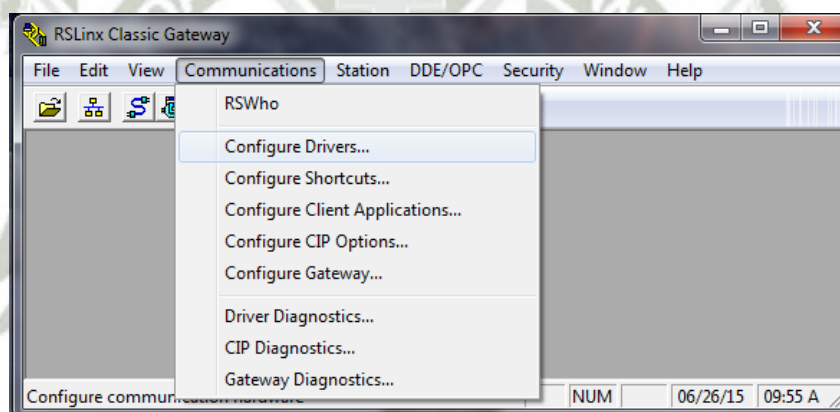


Figura 3.28: Barra de comunicaciones del RSLinx Classic.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ En la ventana se nota la configuración de varios drivers, en nuestro caso configuramos el driver de Ethernet/I como se muestra:

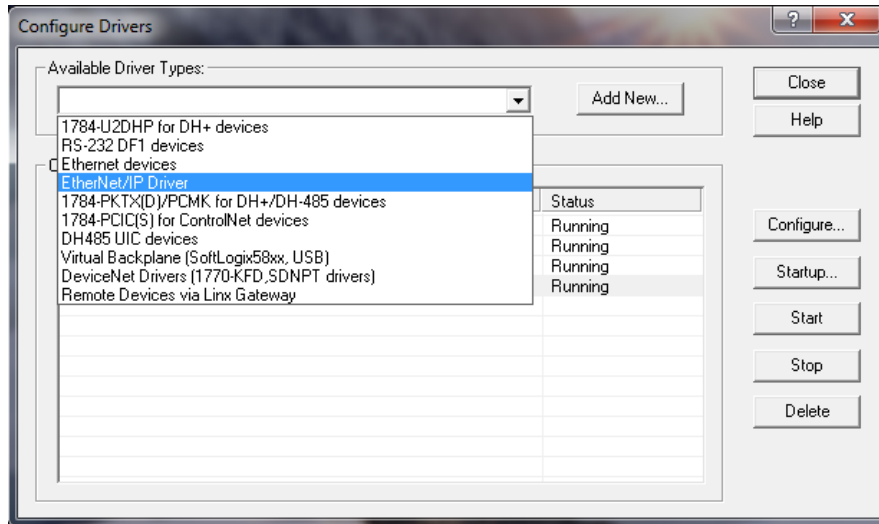


Figura 3.29: Configuración del driver Ethernet IP.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez seleccionado se agrega en la lista de drivers del RSLogix

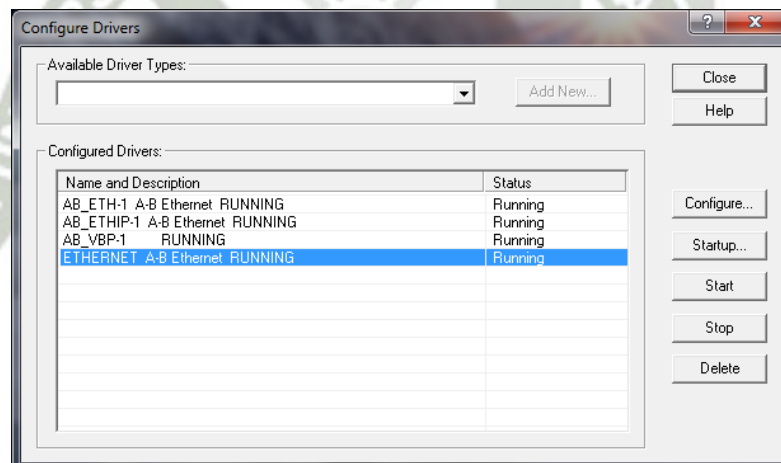


Figura 3.30: Creación del driver Ethernet IP.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Lo siguiente es agregar los IP's del PLC así como del computador

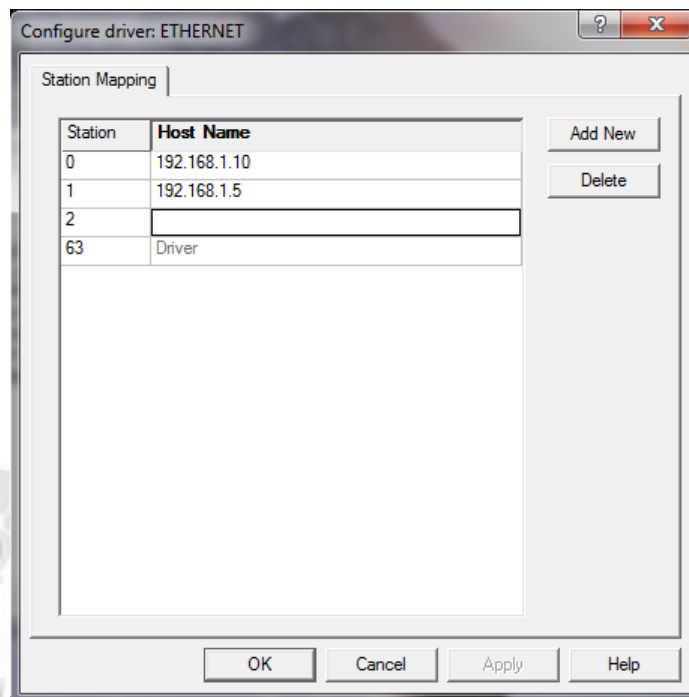


Figura 3.31: Creación de los IP's de los dispositivos.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez agregado el driver queda configurado y en marcha.

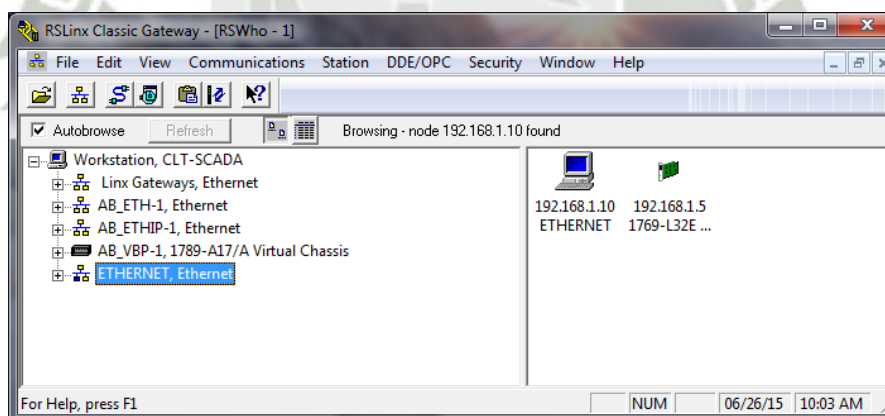


Figura 3.32: RSLinx Classic en red con el dispositivo.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

Una vez configurado cerramos el RSLinx y a continuación se empieza a hacer el enlace con el RSLogix 5000 y ver la comunicación entre el PLC y el Computador.

### 3.4.3 RSLOGIX 5000

El RSLogix 5000 es el software que permite configurar, programar y supervisar el funcionamiento del autómeta CompactLogix. Para introducirnos en su utilización veremos la creación del proyecto desarrollado, la configuración del módulo de entradas y salidas analógicas, el Scanner de red DeviceNet, etc.

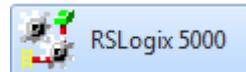


Figura 3.33: RSLogix 5000.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

A continuación, veremos la configuración y creación del proyecto:

- ✓ Hacer doble click en el icono del RSLogix 5000.



Figura 3.34: RSLogix 5000 arrancando.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Hacemos click en archivo y luego en nuevo en el menú principal.

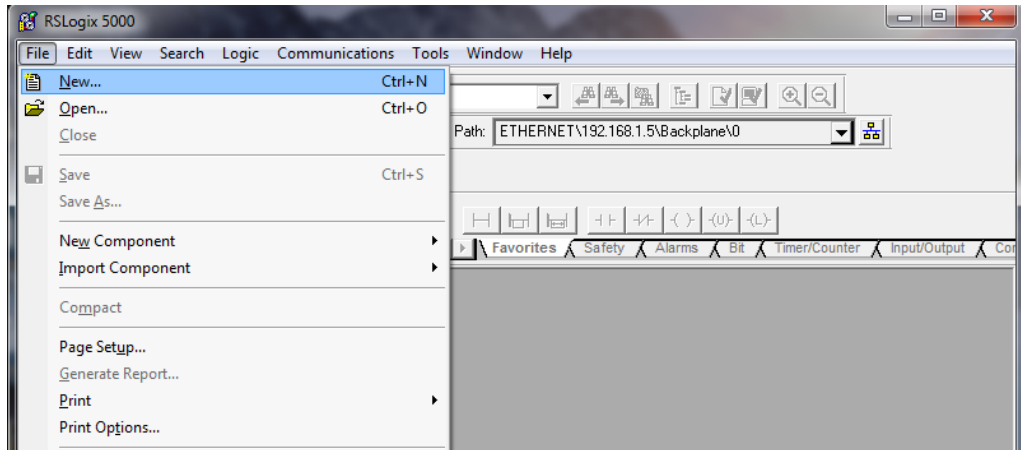


Figura 3.35: Ventana de nuevo proyecto.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

✓ Y colocamos lo siguiente:

**Type:** Aquí escogemos el tipo de controlador que vamos a utilizar en la lista desplegable, nuestro caso un CompactLogix L32E

**Revisión:** Se elige la misma para los módulos para su comunicación correcta, nosotros utilizamos la revisión 17.

**Name:** aquí le ponemos el nombre que queremos a nuestro proyecto que vamos a realizar, el nombre de nuestro proyecto es SISTEMA HIDROCICLONES.

**Create IN:** aquí nos muestra la ruta donde se va a crear el proyecto y seleccionamos OK.

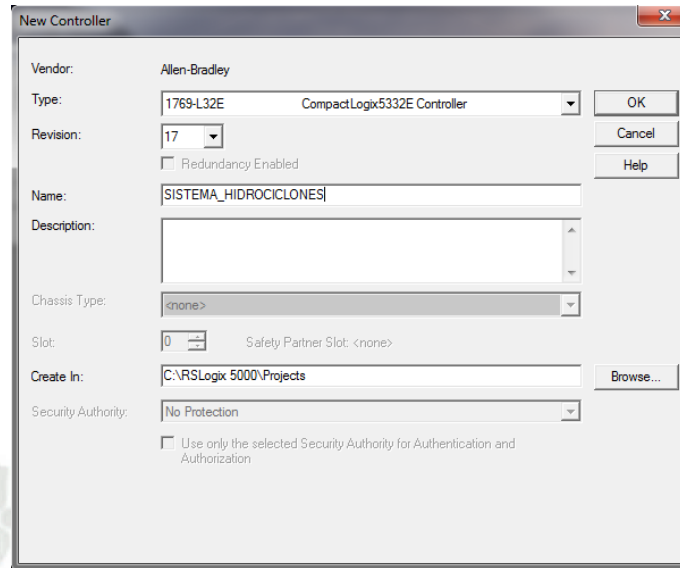


Figura 3.36: Creación del nuevo proyecto.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ A continuación, tenemos creado nuestro proyecto en RSLogix 5000 para poder realizar la configuración de los módulos los cuales son agregados en orden:

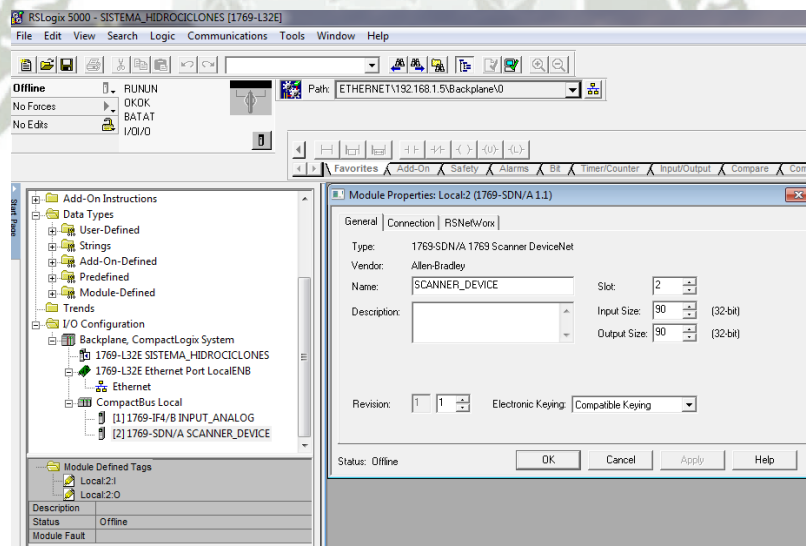


Figura 3.37: Agregando módulos al PLC.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez creada vamos a la base de tags del controlador, en donde crearemos los tags para nuestro proyecto, así como su respectivo direccionamiento de las mismas.

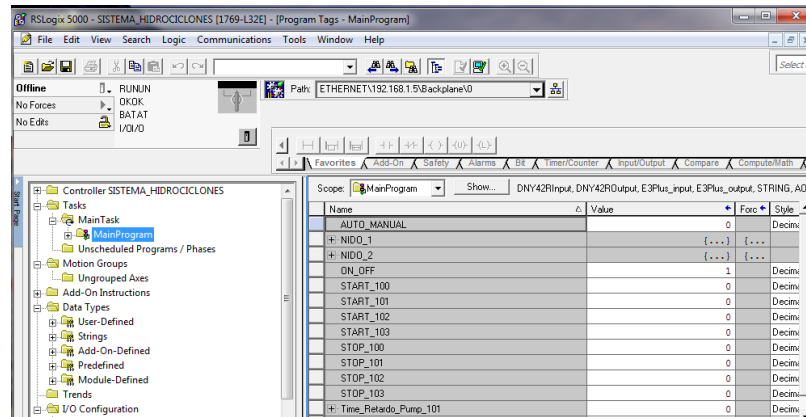


Figura 3.38: Creación de tags del programa.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez creado la lógica de control y plasmado en la programación del PLC haciendo uso de la lógica de escalera LADDER, y las respectivas herramientas que ofrece RSLogix 5000 cargamos el programa al PLC.

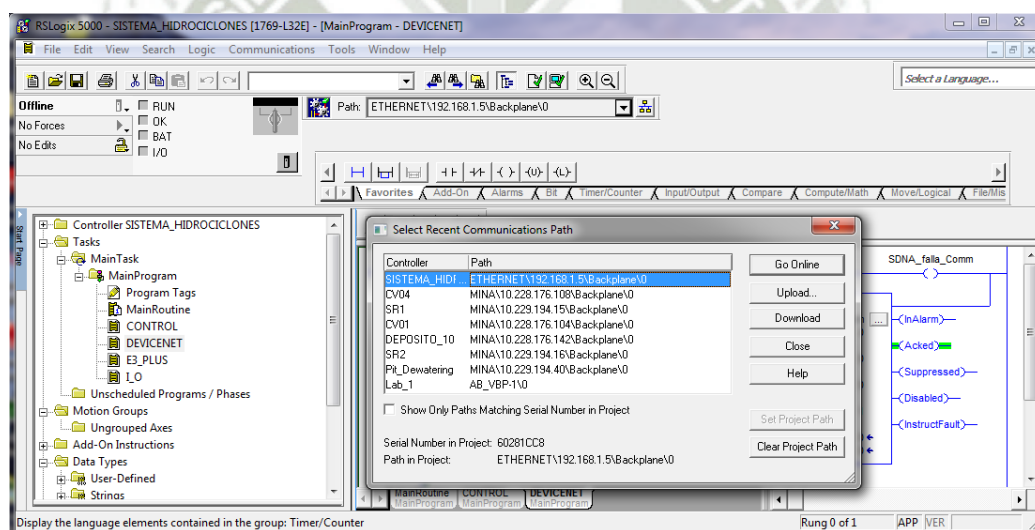


Figura 3.39: Cargando el programa hacia el PLC.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

En la figura 3.39 se muestra la selección del driver de comunicación antes creada en el RSLinx la cual la seleccionamos y la descargamos hacia el PLC.

### 3.4.4 RSNETWORX

El RSNetWorx es el software que permite configura, programar y supervisar los diferentes componentes, y el funcionamiento de la red DeviceNet en nuestro proyecto:

- ✓ Seleccionamos y damos doble click en el icono:

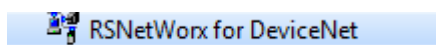


Figura 3.40: RSNetWorx DeviceNet.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ A continuación, se cargará el programa:



Figura 3.41: RSNetWorx V21.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez abierta creamos un nuevo proyecto el cual tendrá por nombre DEVICENET para nuestro proyecto.

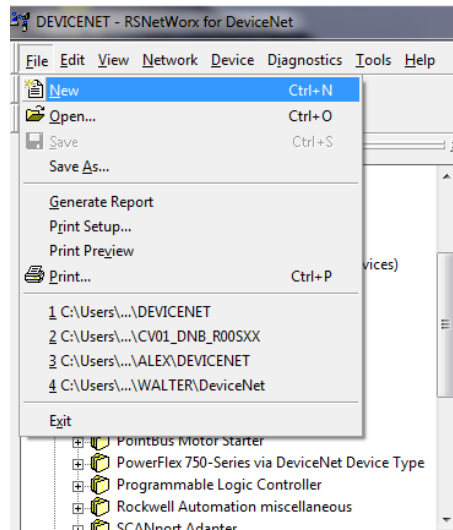


Figura 3.42: Creación del proyecto DeviceNet.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez creado el proyecto seleccionamos el scanner el cual fue cargado en el RSLogix 5000, seleccionamos el módulo.

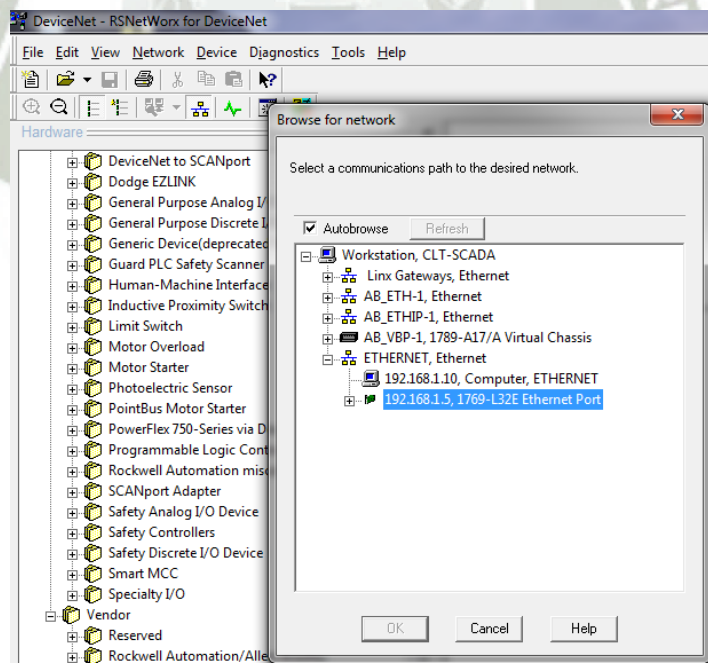


Figura 3.43: Selección del scanner de red.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez encontrado el módulo hacemos un Scanner del módulo, esta nos mostrar todos los dispositivos que se encuentran en esta red DeviceNet.

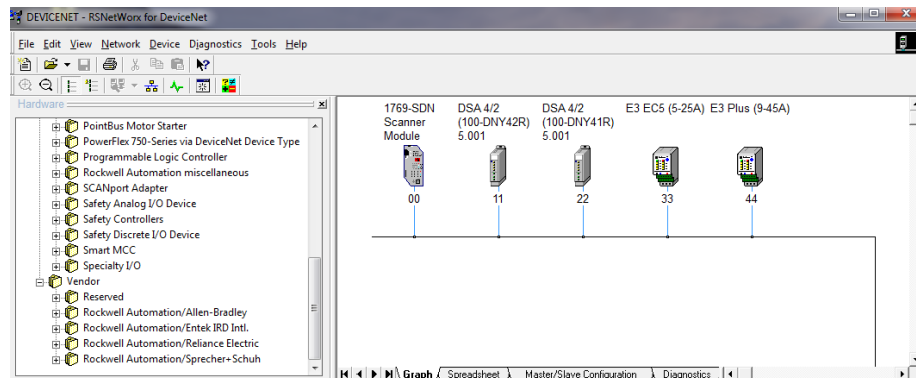


Figura 3.44: Dispositivos escaneados de la red DeviceNet.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ En esta ventana podemos seleccionar cualquiera de los dispositivos cargados en ella, dando doble click, en donde podemos configurar los datos de comunicación de estas y/o configurar los parámetros de las mismas.

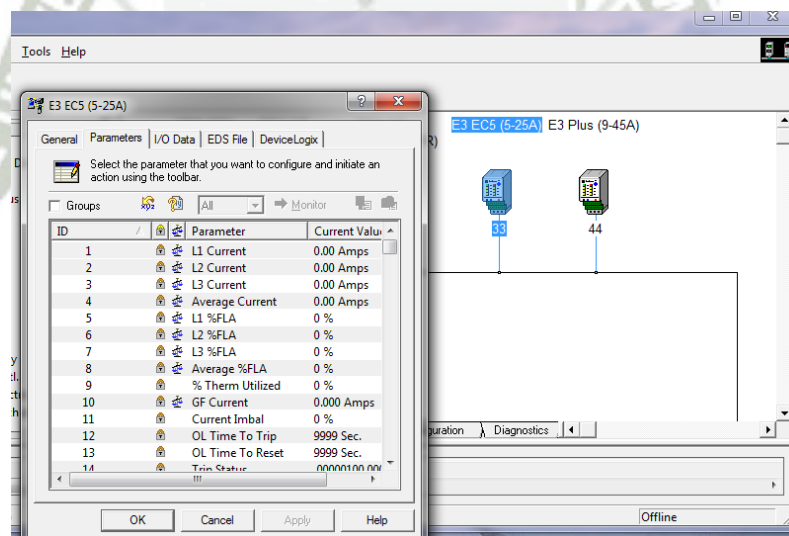


Figura 3.45: Ventana de configuración del E3 Plus.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

### 3.4.5 FACTORY TALK

El Factory Talk es un programa de supervisión (SCADA) de Rockwell Automation a continuación veremos una breve introducción teniendo como ejemplo el proyecto:

- ✓ Hacemos doble click en el icono de Factory Talk.

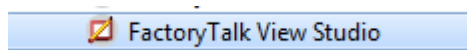


Figura 3.46: Factory Talk de Allen Bradley.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Y a continuación se carga el programa:



Figura 3.47: Factory Talk V5.00 de Allen Bradley.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Una vez cargada el programa no hace referencia a que tipo de aplicación queremos crear:

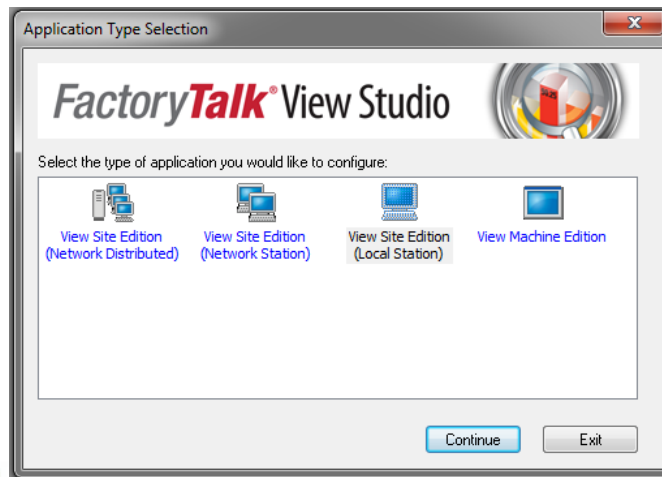


Figura 3.48: Selección del tipo de aplicación.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

Las letras SE de Factory Talk SE hacen referencia a las dos versiones disponibles de Factory Talk View SE. Se trata de la Station Edition y Site Edition.

- A. **La Station Edition:** Es un sistema autónomo de interfaz de operador para la supervisión y control de proceso o líneas individuales. Todos los componentes se ejecutan en un único PC y no se distribuyen entre varios PC.
- B. **La Site Edition:** Es una versión distribuida en los servidores de interfaz de operador, los servidores de datos, los clientes y los Studio Editors pueden distribuirse en PC independientes. La tecnología de Factory Talk permite que el software distribuido funcione como una aplicación perfecta, de modo que los programadores y los operadores del sistema no tengan que preocuparse de la distribución física del sistema.

Este proyecto se centra en la Station Edition con el objetivo de presentar la distribución de SE.

- ✓ Una vez explicada las versiones de Factory Talk y como se dijo se creará una versión de Station Edition para nuestra aplicación entonces creamos el proyecto con el nombre de CLIENTE\_HIDROCICLONES.

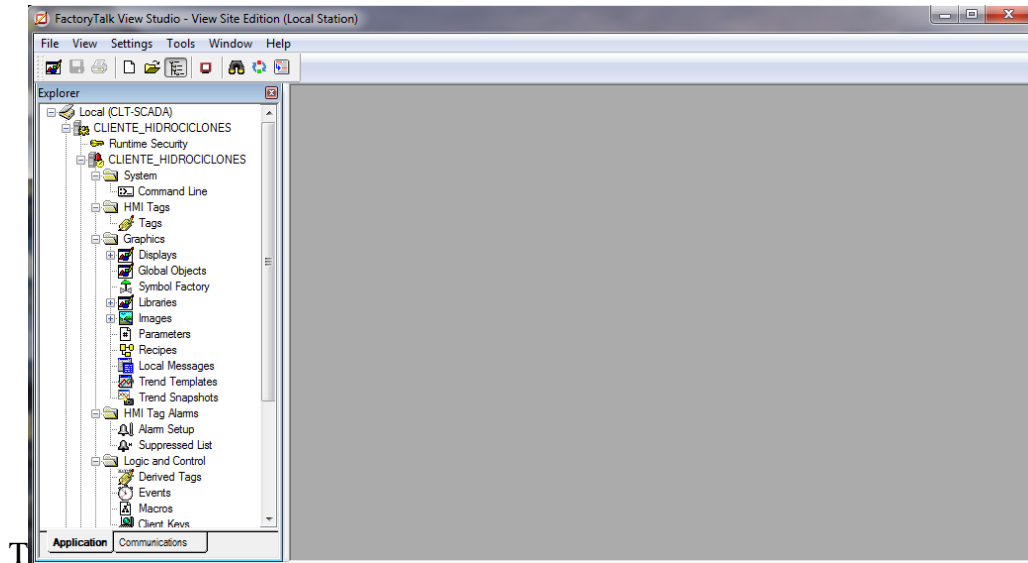


Figura 3.49: Ventana de trabajo de Factory Talk.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Seguidamente configuramos el servidor RSLinx Enterprise, agregamos un nuevo shortcut con el nombre de CONEXIÓN seleccionamos el procesador donde está cargado nuestro programa en este caso SISTEMA\_HIDROCICLONES habilitamos las alarmas y eventos y seguidamente damos OK para poder configurarlo.

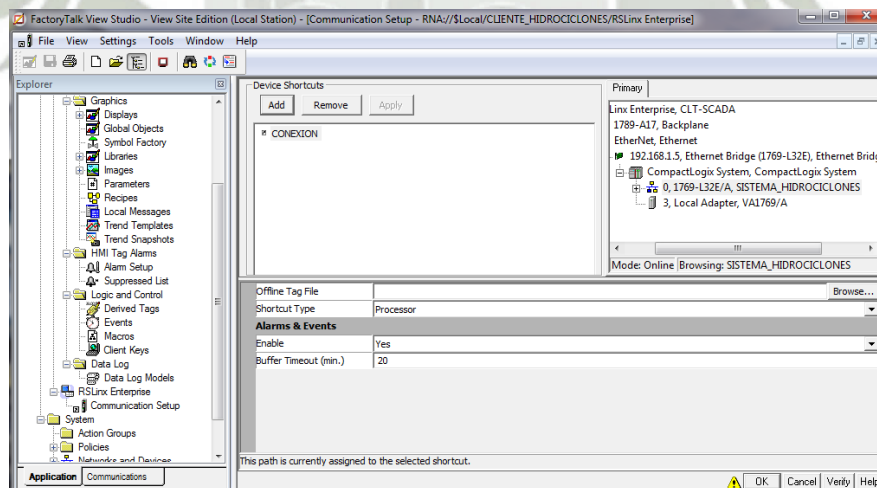


Figura 3.50: Configuración del driver de comunicación.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

- ✓ Luego de la configuración podemos crear los displays en donde podremos crear las diferentes imágenes, las cuales estarán direccionadas a los tags del RSLogix 5000.

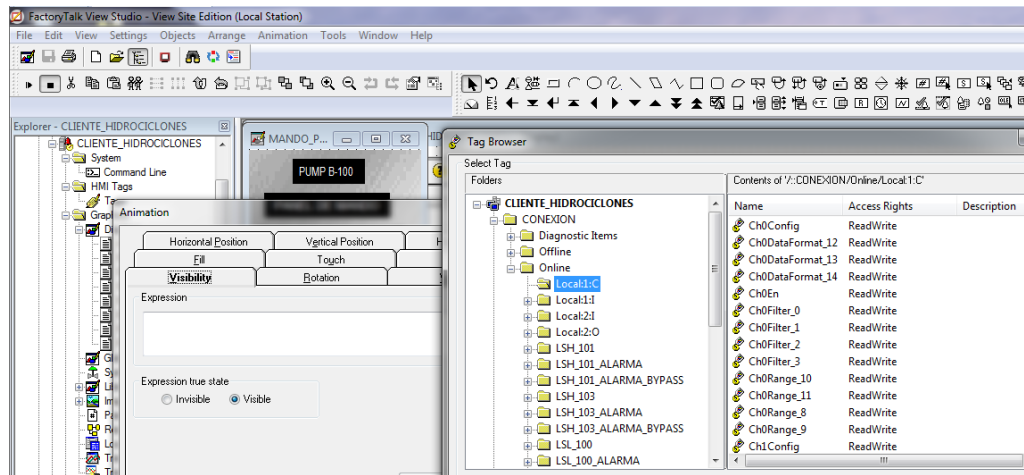


Figura 3.51: Ventana de trabajo de los displays.

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

### 3.5 DESARROLLO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN SCADA

En el desarrollo de los sistemas de supervisión SCADA con Factory Talk se tomó en cuenta el tipo de control que se ha desarrollado en el PLC, los sistemas de control desarrollados en Factory Talk usan tags los cuales han sido creados en el programa y cargados al PLC, la forma de crear y cargar se explicó en el inciso 3.5.3 RSLogix 5000, estos tags se crearon para poderse comunicar con el servidor RSLinx y poder así controlar al PLC, los cuales también servirán para registrar el estado de funcionamiento de cada aplicación de control.

#### 3.5.1 VENTANA PRINCIPAL DEL SISTEMA SCADA

El sistema de supervisión empieza con una pantalla general de presentación de nuestro trabajo, seguido de un botón “PROCESO” en donde se mostrará una imagen del proceso en nuestro caso el sistema de reutilización de agua de relaves, cabe mencionar que esta imagen en su parte inferior nos muestra los mensajes de Factory Talk con respecto al funcionamiento de nuestra SCADA, en esta sección se nos indicará si el

sistema PC-PLC se encuentra en correcto funcionamiento con respecto a red, y tags del sistema.



Figura 3.52: Ventana de presentación del SCADA.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchagua, 2015).

### 3.5.2 Ventana de Control del Sistema SCADA

En esta ventana de presentación del proceso se tiene una imagen del proceso de recuperación de agua de relaves, mostrando los nidos de Hidrociclones, los tanques de almacenamiento de los diferentes nidos así como las bombas centrifugas de alimentación como las de rebombeo, que cumplen un papel de recirculación del material, también se cuenta con las bombas centrifugas las cuales al darles doble click nos muestran un submenú de mando de las misma, esto a nivel manual, pues nuestro sistema cuenta con un selector de funcionamiento (auto-manual), solo es visible este submenú cuando está en manual, cuenta con un botón de activación de la red DeviceNet lo cual hace activa la red DeviceNet con nuestro sistema de supervisión (PC-PLC), cuenta con un botón de Stop general, se muestra también la corriente consumida por las bombas centrifugas así como también el flujo que tiene el nido 1, con respecto a los tanques se muestra el nivel máximo y mínimo de los tanques gracias a los sensores de

nivel binarios los cuales son mostrados mediante visualizadores en rojo para totalmente lleno/vacío y verde para completamente vacío/lleño según sea el caso de los tanques.

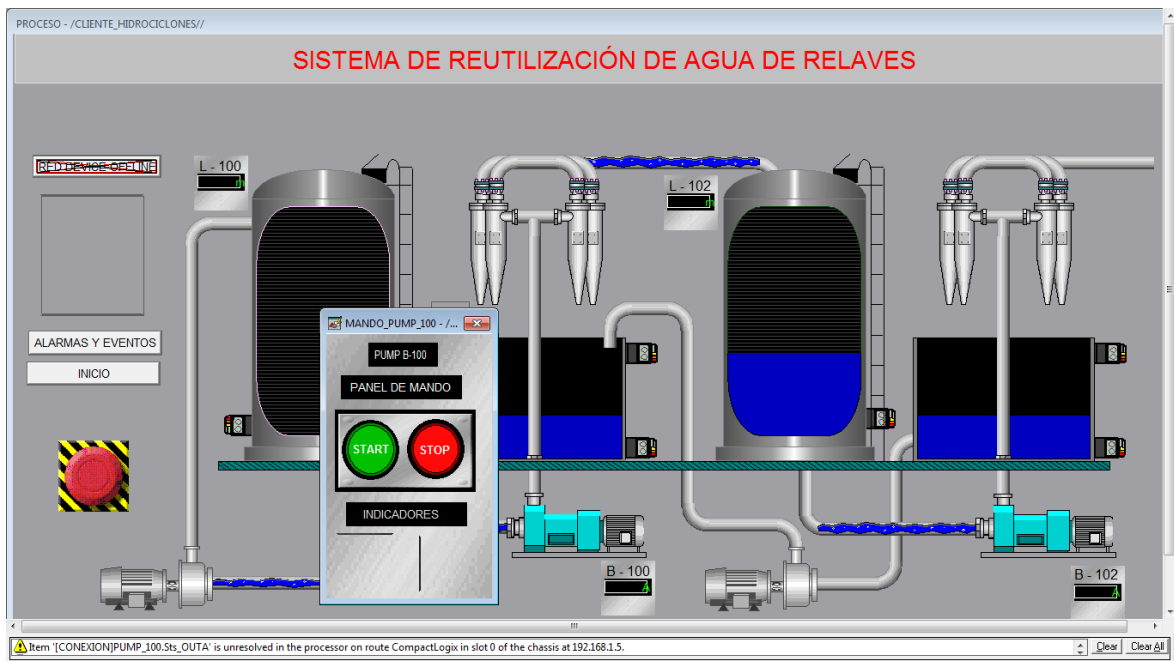


Figura 3.53: Sistema de reutilización de agua de relaves.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Nuestro SCADA cuenta con un menú de alarmas los cuales son displayadas haciendo click en el botón de alarmas y eventos estas nos mostraran las diferentes alarmas de nuestras bombas centrifugas, así como sus respectivas alarmas, también las alarmas de los tanques con referencia a los niveles de las mismas.

### 3.5.3 Ventana de Alarmas y Fallos del Sistema SCADA

Para la parte de fallas y alarmas de nuestro sistema se dividió en dos partes: una para la parte de protección eléctrica de las bombas centrifugas dada por el E3 Plus, y otra para la parte de los sensores de nivel, flujo, comunicación entre los dispositivos red DeviceNet.

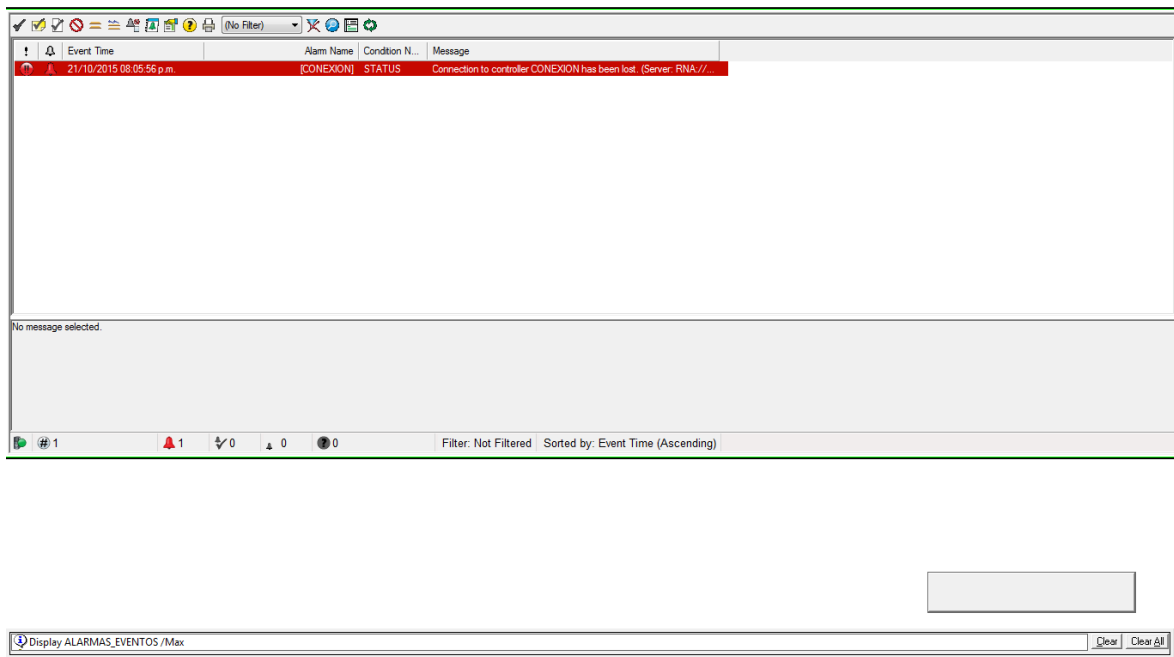


Figura 3.54: Ventana de alarmas y fallas del proceso.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchagua, 2015)

### 3.6 SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA

Ziegler y Nichols propusieron una serie de reglas para afinar controladores PID con base a una respuesta experimental. Existen diversos métodos para ajustar los parámetros de los controladores PID, que se podrían resumir en los siguientes:

- Métodos en lazo cerrado.
- Métodos en lazo abierto.

Para nuestra aplicación nosotros usaremos el método de lazo abierto, primero se realiza un ensayo en lazo abierto, introduciendo un escalón en la señal de control (salida del controlador que actúa sobre el elemento final de control) y se registra el transitorio de la variable medida o controlada (Curva de Respuesta).

Se obtiene experimentalmente la respuesta de la planta a una entrada escalón y si la respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo tal que se forma una “S”, puede obtenerse los parámetros del controlador PID utilizando el primer método. En la figura 2 se observa la respuesta en forma de “S”. Esta respuesta se caracteriza con el

tiempo de atraso y la constante de tiempo. Y se puede aproximar por un sistema de primero orden con atraso de transporte.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

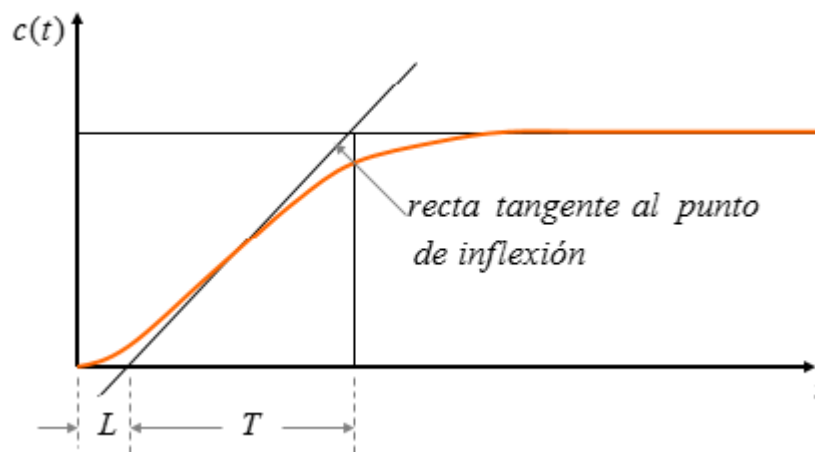


Figura 3.55: Curva experimental en forma de “S”.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Definimos nuestras variables del sistema:

**Variable controlada:** nuestra variable de control sería el flujo, por ser el elemento a controlar para que nuestros hidrociclones puedan trabajar correctamente.

**Variable Manipulada:** Sería nuestro actuador en este caso sería la electrobomba.

Para la sintonización del lazo de control de flujo, generaremos una función rampa, la cual hará que la variable manipulada aumente y esta a su vez haga que el elemento final de control varíe.

Para este caso se contará con un variador de velocidad que controla a la bomba, varía su entrada de voltaje de 0-10V, con lo que se obtiene una variación del motor.

En donde se obtendrá valores de flujo, y veremos donde el sistema es lineal, para poder aplicar puntos de consigna dentro de este rango de valores.

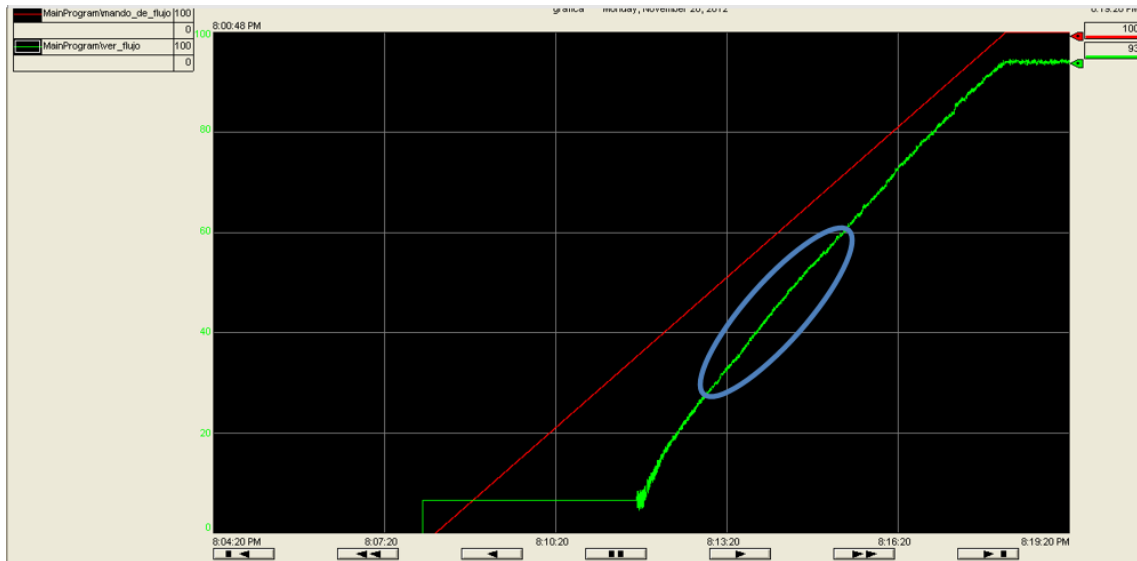


Figura 3.56: Rampa del sistema.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

De la gráfica observamos que la zona lineal esta aproximadamente entre los valores de 30%-60%; por esto nuestro punto de consigna (SP), siempre estará dentro de este rango de valores de presión. Luego llevamos la forma manual (Sistema en lazo abierto) nuestra variable de proceso(VP) haciendo variar la entrada del variador dentro de la zona lineal, generando en este punto un escalón unitario en la salida del controlador.

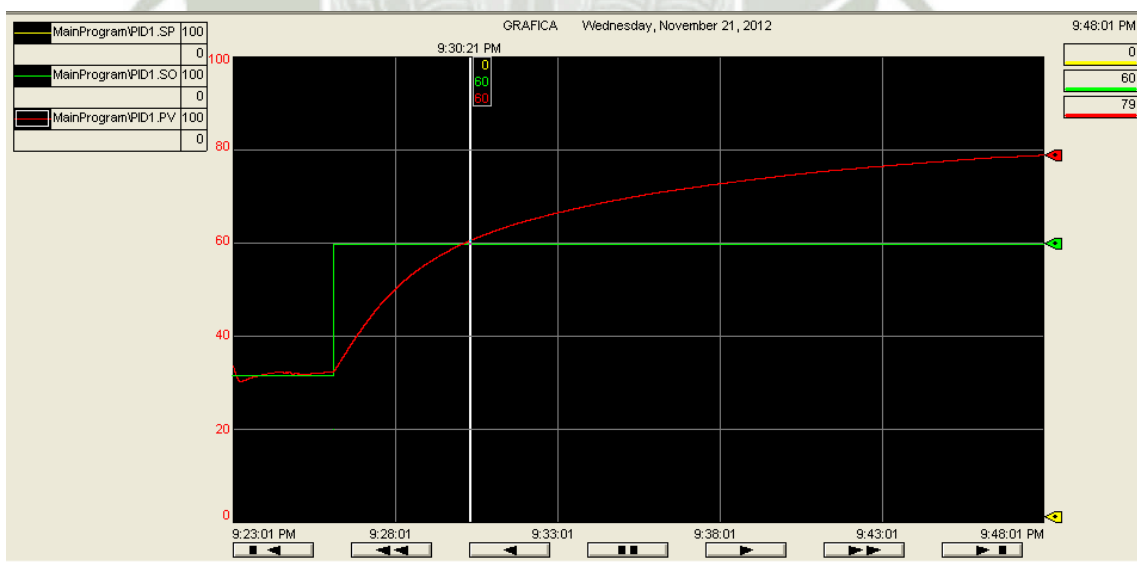


Figura 3.57: Rampa del sistema en respuesta al escalón.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

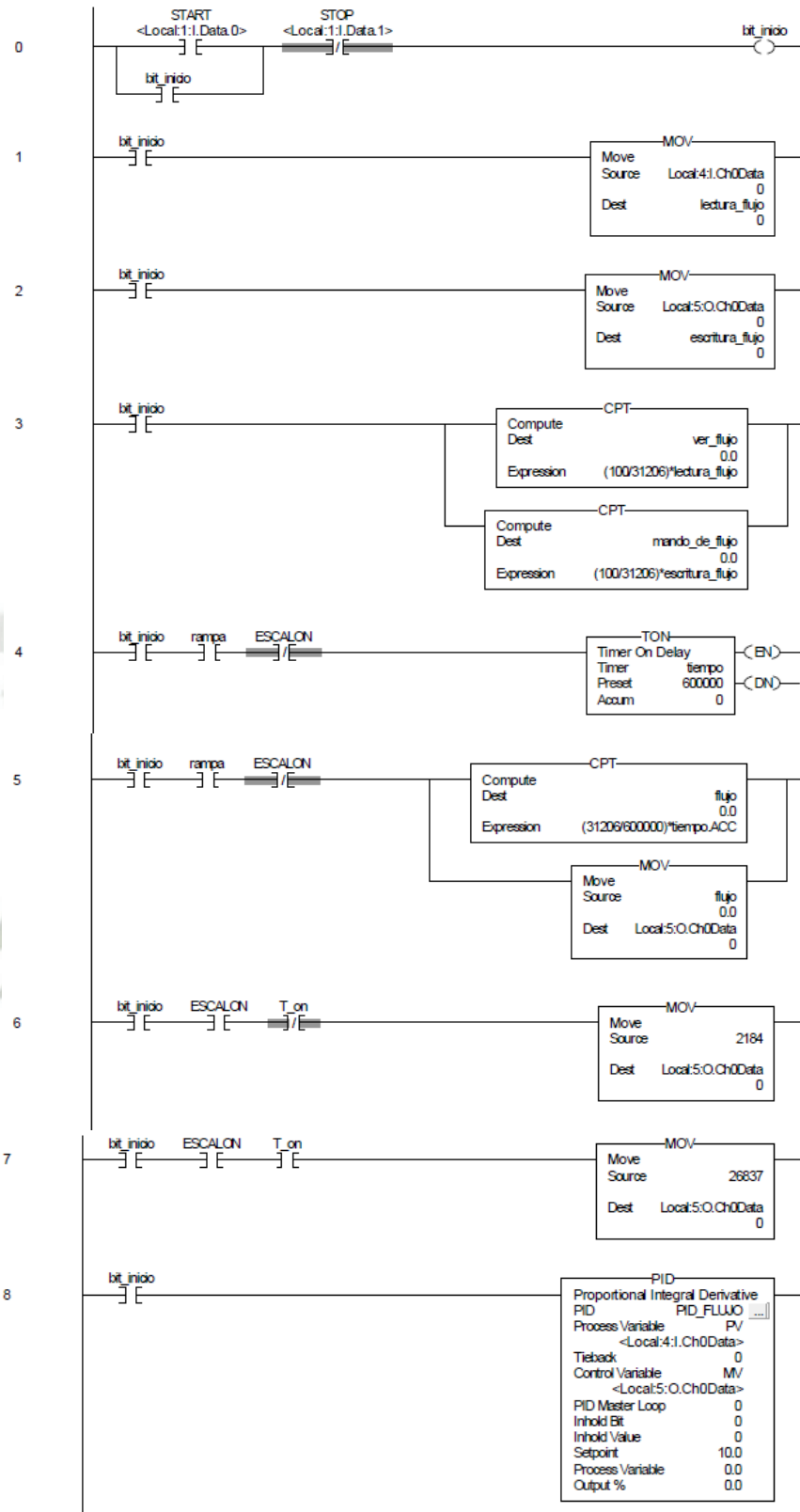


Figura 3.58: Programación para sintonización.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Se observa en la siguiente figura en color rojo la respuesta de nuestro sistema, es decir la variable controlada (La señal que ira hacia el variador de velocidad). En la línea de color verde se muestra la variable del proceso y su respuesta frente al set-point fijado que en nuestra imagen es de color amarillo.

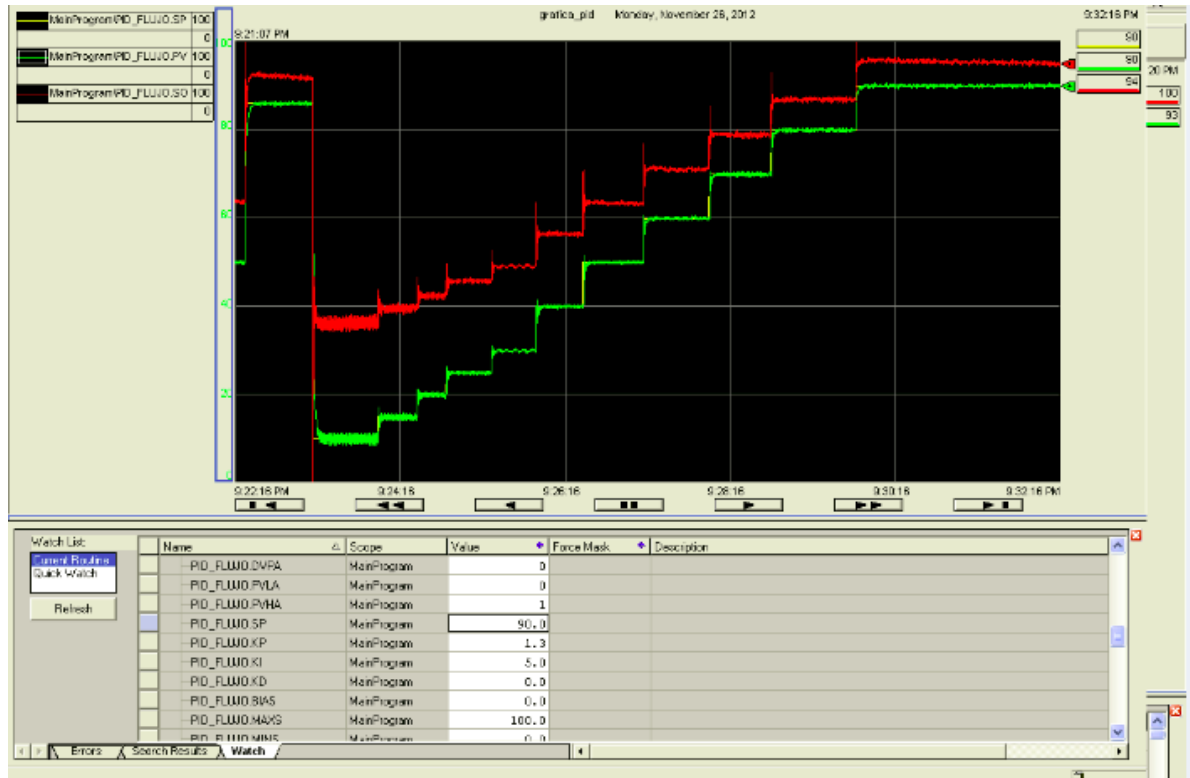


Figura 3.59: Respuesta del sistema sintonizado.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Como resultado de nuestro proceso de sintonización, obtenemos los siguientes valores para cada variable:

$$Kp = 1.3, \quad T_i = 0.26, \quad T_d = 0.065.$$

### 3.7 DESARROLLO DE PRUEBAS

Una vez fabricado y comprado cada uno de los equipos necesarios para la implementación de nuestro sistema de reutilización de agua de relaves se procedió a realizar las pruebas para probar el correcto funcionamiento de cada componente.

Debido a que nuestros hidrociclones fueron fabricados en base al datasheet de un fabricante reconocido es que nos vemos en la necesidad de probar el correcto funcionamiento de los mismos los cuales requieren un flujo de entrada que puede variar de  $3.5\text{m}^3/\text{h}$  a  $7.5\text{m}^3/\text{h}$ , como lo mencionamos en la sección 3.3, para lo cual se determinó utilizar una bomba centrífuga de 2HP para alimentar a un nido de hidrociclones compuesto por cuatro hidrociclones.

Al realizar la medición del flujo de entrada al nido de hidrociclones se obtiene el valor de  $22.11\text{m}^3/\text{h}$  como se observa en la siguiente figura, por lo cual obtenemos un flujo de entrada en cada hidrociclón de alrededor de  $5.5\text{m}^3/\text{h}$ , este valor es considerado aceptable dentro los parámetros fijados por el fabricante de acuerdo a su hoja de datos.



Figura 3.60: Medición de flujo de entrada a nido de hidrociclones.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Una vez realizada la prueba de funcionamiento de los hidrociclones de forma manual, se procedió a energizar todo el sistema de reutilización de agua de relaves esto incluye el sistema de control y la supervisión scada utilizando el protocolo DeviceNet.



Figura 3.61: Tanque lleno de relave para la prueba de hidrociclones.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Teniendo en cuenta el testeo del flujo del material el cual nos sirvió como realimentación del sistema de control PID que se programó y se cargó en el PLC, este valor de flujo se cargó en el PLC para usar la herramienta de Rockwell Automation de Autotuning PID.



Figura 3.62: Funcionamiento correcto de los hidrociclones.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Teniendo en cuenta lo mencionado en la sección 1.7 la concentración del relave va entre 20% a 50% de sólidos, en nuestro caso tenemos como material de prueba la sustancia(relave) al 30% de concentración de solidos como se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.63: Concentración de muestra de relave.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

En la En el primer tanque se depositó el relave con una concentración de solidos al 30% como se mencionó en el párrafo anterior, este relave será impulsado por la bomba centrifuga hacia el primer nido de hidrociclones. En la siguiente imagen se muestra como se encuentra el tanque al sacar una muestra manualmente.



Figura 3.64: Concentración de arena en el primer tanque.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

En la primera etapa de los Hidrociclones (en el overflow) se tiene la separación de la arena y el agua en un primer nivel, se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.65: Concentración de arena en el primer nido de hidrociclones.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Pasando al segundo nido de Hidrociclones (en el overflow) podemos notar de forma muy sobresaliente que la concentración de arena es muy pobre lo cual nos podemos asegurar que en la parte de underflow de los nidos secundarios tenemos una mínima concentración de arena.



Figura 3.66: Concentración de arena de la segunda etapa de hidrociclones.

Fuente: (Elaboración Propia: Walter Huracchua, 2015)

Teniendo finalmente en el OVERFLOW una mínima concentración de arena para luego de este sistema poder tratarla en un siguiente proceso



Figura 3.67: Concentración final del sistema.  
(2° nido de hidrociclones OVERFLOW)

Como resultado de nuestro proceso tenemos las siguientes concentraciones en las dos etapas de filtrado. Empezamos con un relave a una concentración del 30%, al pasar la primera etapa de filtrado el primero overflow tiene una concentración de 8% y para finalizar tenemos en la segunda etapa de filtrado el segundo overflow con una concentración del 3% de sólidos disueltos.



Figura 3.68: Niveles de concentración en las distintas etapas.  
(2° nido de hidrociclones OVERFLOW)

## CONCLUSIONES

### **PRIMERA: Desarrollo de un sistema de reutilización de relave.**

Se desarrolló e implementó un sistema capaz de realizar la separación del relave en la parte sólida y líquida, obteniendo como resultado final una concentración de 3% de sólidos en la muestra. La muestra original contenía una concentración de 30% de sólidos, se puede afirmar que nuestro sistema funciona adecuadamente para la aplicación en mención teniendo especial consideración en la variable del flujo de entrada en los hidrociclones, pues éstas son vitales para el correcto funcionamiento de nuestro sistema.

### **SEGUNDA: Implementación de una red DeviceNet.**

La integración de las señales para poder realizar la supervisión del proceso de nuestro proyecto de tesis se dio a través del protocolo DeviceNet el cual nos permitió recoger la información proveniente de los equipos que intervienen en el proceso, monitorear el estado en el que se encuentra y verificar los correctos rangos de funcionamiento de cada equipo.

### **TERCERA: Sistema de supervisión de campo utilizando SCADA.**

La integración de señales analógicas y discretas provenientes de los instrumentos de medición se realizó utilizando la plataforma Factory Talk de Allen Bradley que permitió poder supervisar el proceso de una manera más sencilla y comprensible para el operador.

### **CUARTA: Sintonización de un sistema PID de control.**

A través de una sintonización experimental utilizando el método de Ziegler y Nichols a lazo abierto, se realizó la sintonización teórica de nuestro sistema, que se puede observar en la figura 3.59. donde se observa que la respuesta del sistema es aceptable.

### **QUINTA: Sistema de protección de motores eléctricos de inducción.**

A través del uso de equipos de protección como son los relés E3 Plus, arrancadores DNY-41R y el uso de interruptores termomagnéticos se desarrolló un sistema de

protección de los motores y de los demás equipos, controlando y supervisando que las corrientes se encuentren dentro de los valores permitidos de operación de los equipos, además de la protección de falla a tierra.

**SEXTA: Implementación del proyecto de tesis.**

El proyecto de tesis tiene como alcance implementar un sistema que parte desde un tanque de almacenamiento de relave pasando por un proceso de filtrado que en nuestra aplicación vienen a ser los hidrociclones hasta llegar a una separación de la parte sólida y líquida de la muestra de relave. Este punto se cumplió tal como se había propuesto.

**SÉPTIMA: Formación de Pregrado.**

La formación de pregrado de la carrera de Ingeniería Electrónica fue de vital importancia para el desarrollo de la presente tesis, ya que, para la elaboración del programa de control, la selección de la instrumentación usada y la supervisión SCADA es necesario tener conocimientos avanzados de las áreas en mención.

**OCTAVA: Dimensionamiento real.**

La presente tesis como parte de control y supervisión SCADA tiene la capacidad de funcionar en aplicaciones reales sin la necesidad de realizar cambios importantes, al contrario de la parte mecánica que, si habría que realizar un nuevo cálculo con los valores de flujo reales en una minera, además de las potencias y caudales requeridos por los hidrociclones.

## RECOMENDACIONES

### **PRIMERA: Desarrollo de un sistema de reutilización de relave.**

Para el mejorar el sistema se puede agregar una válvula modulante en la tubería que alimenta al nido de hidrociclones para regular el flujo con respecto a la capacidad de la bomba centrífuga que alimenta al nido de hidrociclones.

### **SEGUNDA: Implementación de una red DeviceNet.**

La red DeviceNet funcionó adecuadamente durante las pruebas, se recomienda la protección del cable de esfuerzos mecánicas o de perturbaciones(ruidos), una correcta acción a seguir es aislarlos separar los cables de control o señales de los cables de fuerza, esto para que no se cree ruido o interferencia en las señales.

### **TERCERA: Sistema de supervisión de campo utilizando SCADA.**

Además de la supervisión SCADA se puede implementar botones de control de campo para su mejor manejo, para un proyecto de mayores dimensiones además de una supervisión SCADA se recomienda la implementar botoneras de control manual como una medida de control en caso de que la red se caiga.

### **CUARTA: Sintonización de un sistema PID de control.**

Para la sintonización PID se recomienda hacer el uso de variadores de velocidad que permitan variar el flujo bombeado hacia los hidrociclones, cabe mencionar que también es necesario cambiar las bombas a trifásicas y no monofásicas como las usadas en el presente proyecto.

### **QUINTA: Sistema de protección de motores eléctricos de inducción.**

Se utilizó equipos especiales para la protección de motores eléctricos, los cuales pueden mostrar un mejor desempeño al utilizar motores trifásicos donde se podrá utilizar las protecciones de desfasaje, desbalance de cargas, falla a tierra, etc.

**SEXTA: Implementación del proyecto de tesis.**

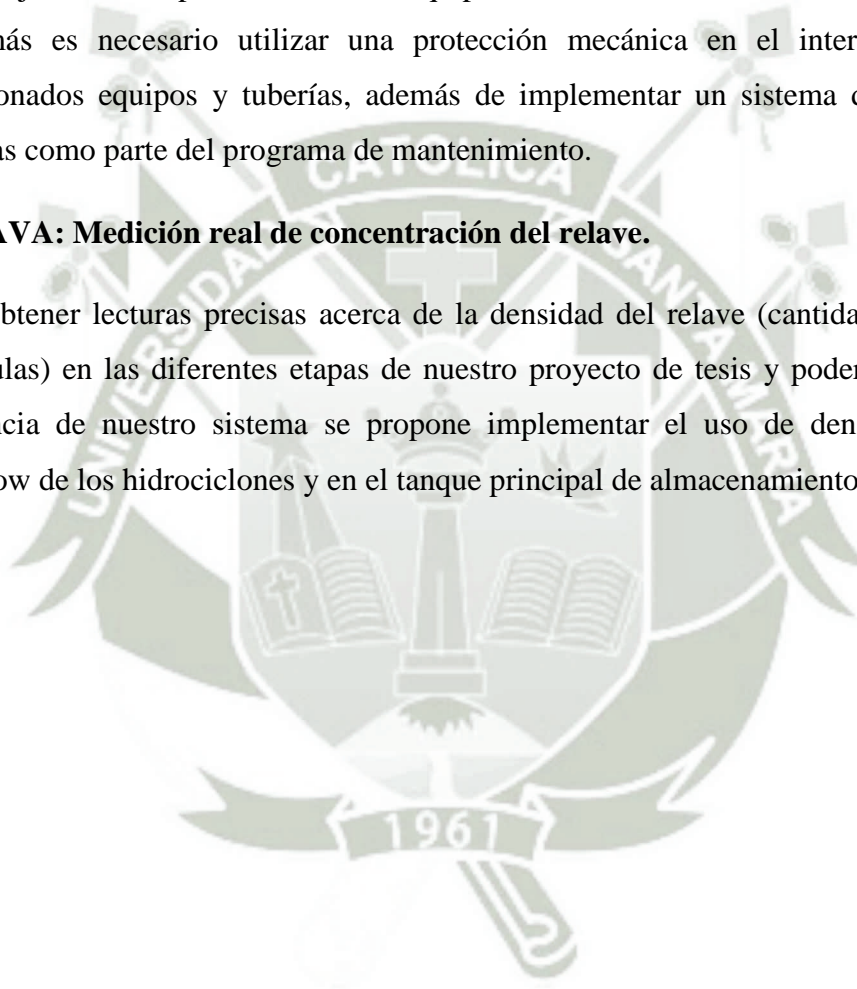
Para la implementación de un proyecto donde se maneje relaves o un material que pueda desgastar el interior de las tuberías y equipos se recomienda utilizar equipos capaces de soportar estas exigencias, una correcta aplicación es el uso de tuberías y equipos enjebados interiormente, esto aumentará el tiempo de vida de los equipos.

**SÉPTIMA: Tiempo de vida de los equipos.**

Para mejorar el tiempo de vida de los equipos como bombas, hidrociclones, flujómetros y demás es necesario utilizar una protección mecánica en el interior de los ya mencionados equipos y tuberías, además de implementar un sistema de limpieza de tuberías como parte del programa de mantenimiento.

**OCTAVA: Medición real de concentración del relave.**

Para obtener lecturas precisas acerca de la densidad del relave (cantidad de sólidos y partículas) en las diferentes etapas de nuestro proyecto de tesis y poder determinar la eficiencia de nuestro sistema se propone implementar el uso de densímetros en el overflow de los hidrociclones y en el tanque principal de almacenamiento.



## BIBLIOGRAFÍA

- Avila, E. C. (2009). Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua. *Naciones Unidas - CEPAL*.
- Bradley, A. (2004). Relé de sobrecarga de estado sólido E3 y E3 Plus. *Manual del usuario*.
- Bradley, A. (2013). Manual del usuario de los controladores CompactLogix 1769.
- Bravo Galvéz, A. C. (---). *Manejo de Relaves y Recuperación de Agua*. Arequipa: ---.
- Bullón, J. P. (2012). *Tratamiento de agua en la industria minero metalúrgica*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos91/tratamiento-aguas-industria-minero-metalurgica/tratamiento-aguas-industria-minero-metalurgica3.shtml>
- Capacitación, D. d. (2011). Teoría de redes. En *Curso Redes Control Net - Device Net. TUNNING*. Obtenido de <https://elj0na.files.wordpress.com/2011/10/curso-redes-control-device-net.pdf>
- Cleiser Aurelio Garcia Saldaña, D. T. (s.f.). Los relaves mineros y su efecto en el ambiente y la salud. *Universidad Peruna Unión - 4to CONACIN*.
- Comisión Chilena del Cobre. (2012). *Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2011*. Chile: Ministerio de Minería.
- Dr. Helmut Trawinski. (s.f.). *Aplicaciones y Funcionamiento Práctico de los Hidrociclones*.
- Elaboración Propia: Walter Huracchahua. (2015). *Recuperacion de Agua de Relaves*. Arequipa: ---.
- Equipamentos Industriales SMAR. (-- de -- de 2015). [websupport@smar.com](mailto:websupport@smar.com). --, --, --. Recuperado el 2015, de [websupport@smar.com](mailto:websupport@smar.com).
- Grupo editorial EDITEC. (2007). Recuperando el agua en relaves. *Minería Chilena*.
- Juan Cuervas R, Fernando Torres F. (2010). *Diseño de Hidrociclón*. Chile: ---.
- Juan Cuevas R., F. T. (2010). *Diseño Hidrociclón*. Universidad de Chile.

Katsuhiko Ogata. (2010). *Ingeniería de Control Moderno*. Madrid: Pearson.

Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. Universidad Nacional de Quilmes.

Mora, K. B. (2013). *Conceptualización del sistema de separación y transporte de fluidos producidos en la zona sur del campo salto*.

Morande, N. A. (2007). Guía técnica de operación y control de depósito de relaves. *Servicio Nacional de Geología y Minería*.

Mular A.L & Bhauppu, R. (1978). *Mineral Processing Plant Desing*. ---: ---.

REGABER. (2015). *Filtro Hidrociclón*. Barcelona: ---.

Roberto Patricio Orellana Araya. (2010). *Modelo, Control y simulador de Planta de Molienda Semiautógena y Molienda Secundaria*. Chile: ---.

Rockwell Automation. (2013). *Manual de usuario de los Controladores*. ---: Publicación de Rockwell.

Rockwell Automation. (2015). ---. ---: ---.

SMAR *Equipamentos Industriais*. (2016). Obtenido de <http://www.smar.com/espanol/devicenet>

Normas APA sexta edición.

## **ANEXOS**

ANEXO 1: FILOSOFIA DE CONTROL

ANEXO 2: PROGRAMACION EN LADDER

ANEXO 3: PLANO DE CONEXIONADO

ANEXO 4: PLANO DE FUERZA

ANEXO 5: PLANO P&ID



# FILOSOFIA DE CONTROL

## 7.1 GENERAL

### 7.1.1 ALCANCE

El presente documento se desarrolla para describir la filosofía de operación y control del Proyecto SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVES PARA SU REUTILIZACIÓN, HACIENDO USO DE PROTOCOLO DEVICENET Y SUPERVISIÓN SCADA; permitiendo dar a conocer los criterios y estrategias de control a emplearse en el sistema de agua relaves desde los tanques de Bombeo y de rebombeo.

### 7.1.2 REFERENCIAS

Para el presente documento, se usaron como referencias los siguientes planos:

Descripción Número

- Diagrama de Flujo del Proceso
- Listado de Señales
- Listado de Alarmas

### 7.1.3 RESUMEN DE COMPONENTES

#### 7.1.3.1 BOMBAS DE LOS NIDOS DE CICLONES

<b>EQUIPO N°</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>DESTINO</b>
B-100	Bomba horizontal de Tank_100	Nido de ciclones N°1
B-102	Bomba horizontal Tank_102	Nido de ciclones N°2

**Tabla 2 Bomba de Pozos**

#### 7.1.3.2 BOMBAS DE REBOMBEO

<b>EQUIPO N°</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>DESTINO</b>
B-101	Bomba horizontal de Tank_101	Tamk_100
B-103	Bomba horizontal Tank_103	Nido de ciclones N°1

**Tabla 3 Bombas de Estaciones de Rebombeo**

## **7.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL**

El Sistema de Control para el SISTEMA DE REUTILIZACIÓN DE AGUA DE RELAVES, se basará en el uso de PLC (Controladores Lógicos Programables); específicamente de tipo modular.

El PLC, se encargará de adquirir señales de variables discretas y analógicas de los tanques y nidos de ciclones.

Todas las señales se conectarán al PLC ya sea de manera discreta, análoga o mediante protocolos industriales (DeviceNet, Ethernet IP); para ser transmitidas mediante red hacia el SCADA de la Estación de Monitoreo, según sea el requerimiento de cada dato.

## **7.3 SISTEMA SCADA**

El sistema cuenta con un SCADA que permite la supervisión y control de las variables del sistema desde la Estación de Operación y Monitoreo; la cual conforma la Estación Maestra (MTU) del Sistema.

Así mismo se cuenta con Estaciones de Bombeo y Rebombeo que, vía la Red DeviceNet, llevan datos hacia la Estación Maestra; conformando éstos las Estaciones Remotas del Sistema (RTU).

La MTU es capaz de recibir todas las señales de variables de campo (discretas y analógicas) provenientes de las RTU; y de acuerdo a la lógica existentes en los PLC's, realizar el monitoreo, control e historización de datos del sistema.

## **7.4 COMUNICACIONES DEL SISTEMA**

El Sistema deberá contar con niveles de comunicación que están relacionados a los niveles de red existentes en la Arquitectura de Red ( )

Así se tiene el Nivel de Comunicación de Sensores y Actuadores de Campo; en el cual se adquieren las señales de las variables físicas del sistema, tanto de los tanques como de las bombas (Nivel, corriente, etc.). En este nivel se puede encontrar conexiones de 0-

10V; así como transmisión de datos vía DeviceNet; además de conexiones de señales discretas.

Nivel de Controladores de Célula, el cual se conforma por la Red ethernet.

Finalmente se llega a distinguir el Nivel de Proceso; en el cual se tiene el Controlador Maestro en la Estación de Monitoreo y Control, que se encarga de gestionar de manera más óptima el tráfico de datos provenientes de la estación remota; de manera que se pueda transmitir datos de monitoreo hacia el SCADA y datos de control hacia la estación remota.

### **7.5 ARQUITECTURA DE MANDO**

La arquitectura del sistema, en términos de mando, tendríamos:

- Lo conforma los controles implementados vía software en las Pantallas de Monitoreo y Control (SCADA) pertenecientes a la Estación de Monitoreo.

### **7.6 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL**

El Sistema de Control Automático, se basa en el Control mediante PLC, de las bombas tanto de los tanques de los nidos de ciclones, y de las de rebombeo.

Para el Caso de los tanques de Bombeo, se tiene un lazo de control realimentado por los sensores de nivel; así, de acuerdo al nivel de esta, el PLC dará la orden de arranque o de paro del motor de la bomba del tanque.

Para el caso de rebombeo hacia el tanque de alimentación del nido de ciclones esta tendrá un control on-off la cual estará controlada por los sensores de nivel alto y bajo (swiches de nivel) de tal manera que el control de arranque o paro de las bombas, se realice de acuerdo a los valores de nivel mencionado.

# FILOSOFÍA Y MODOS DE OPERACIÓN

## 8.1 BOMBAS DE LOS NIDOS DE CICLONES

### 8.1.1 MODO AUTOMÁTICO

Para poder establecer el modo de operación Automático, el selector HAND-OFF-AUTO del SCADA debe estar en la posición de AUTO. Para este modo, el PLC del Tablero de Control de la bomba realizará el control de la misma, teniendo en cuenta el Nivel del tanque; así se considerará:

- Si el nivel del tanque alcanza más del 50% del total del Nivel, la bomba deberá arrancar.
- Si el nivel del tanque alcanza el Nivel Bajo del total del Nivel, la bomba deberá parar.
- Señales de Falla proveniente del Relé E3 Plus.
- Si el nivel del tanque a alimentar alcanza el Nivel Alto del total del Nivel, la bomba deberá parar.

### 8.1.2 MODO MANUAL

Para poder establecer el modo de operación Manual, el selector debe estar en la posición de Manual. En este punto, se podrá seleccionar que bomba se desea arrancar ya sea una de bombeo o de rebombeo.

En este modo el control se realizará desde los botones de Start/ Stop implementados en el SCADA correspondiente, según se haya seleccionado.

En este modo se debe considerar que la operación se realiza de acuerdo a criterios propios del operador.

Para ambos modos, Automático y Manual, se presentarán los siguientes interlocks, los cuales deberán detener las bombas en caso de ser activados:

- Señal de Alarma de Nivel Bajo en el tanque.
- Señal de switch de Nivel Bajo Activado.

- Señal de Alarma de Nivel Alto en el Tanque de Rebombear correspondiente.
- Señal de Pérdida de Comunicación del Controlador.
- Señal de Falla Eléctrica del motor.
- Señal de Temperatura Muy Alta en el Motor (si es que tuviera).
- Señal proveniente de la Parada de Emergencia.

## **8.2 BOMBAS DE REBOMBEO**

Para el caso de rebombear, se definirán modos de operación comunes.

### **8.2.1 MODO AUTOMÁTICO**

Para poder establecer el modo de operación Automático, el selector HAND-OFF-AUTO ubicado en el SCADA debe estar en la posición de AUTO.

Con el modo automático seleccionado, el PLC realiza el control de la bomba, para lo cual considera:

- Si en el tanque hay agua la bomba arranca hasta vaciarla totalmente.
- Si luego de haber transcurrido un tiempo “T” de haber arrancado la bomba del nido de hidrociclones, la bomba arranca.
- Si el nivel del tanque de rebombear alcanza el Nivel Bajo del total del Nivel, la bomba deberá parar.

La secuencia anterior considera un funcionamiento normal; es decir, considerando las bombas sin fallas y operativas.

### **8.2.2 MODO MANUAL**

Para poder establecer el modo de operación Manual, el selector debe estar en la posición de Manual. En este punto, se podrá seleccionar que bomba se desea arrancar ya sea una de bombeo o de rebombear.

En este modo el control se realizará desde los botones de Start/ Stop implementados en el SCADA correspondiente, según se haya seleccionado.

En este modo se debe considerar que la operación se realiza de acuerdo a criterios propios del operador.

### 8.3 ENCLAVAMIENTOS

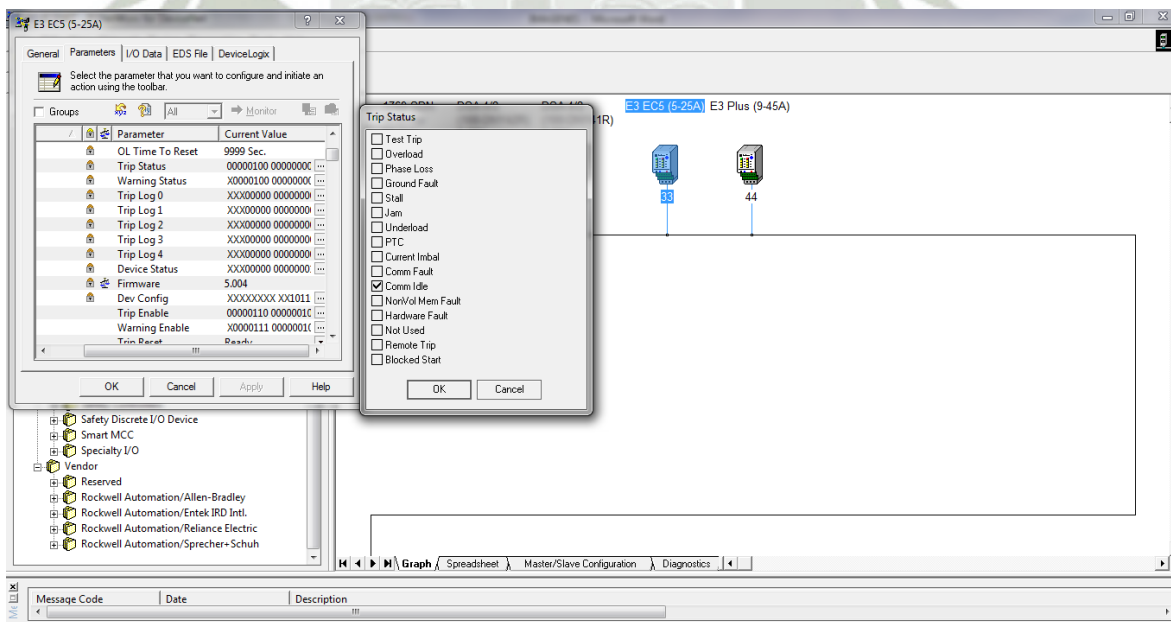
Los enclavamientos se hicieron para poder ver si el tanque se vació totalmente o se llenó, así como también para poder supervisar si existe liquido en ellos haciendo uso de los sensores de nivel de los nidos de los hidrociclones.

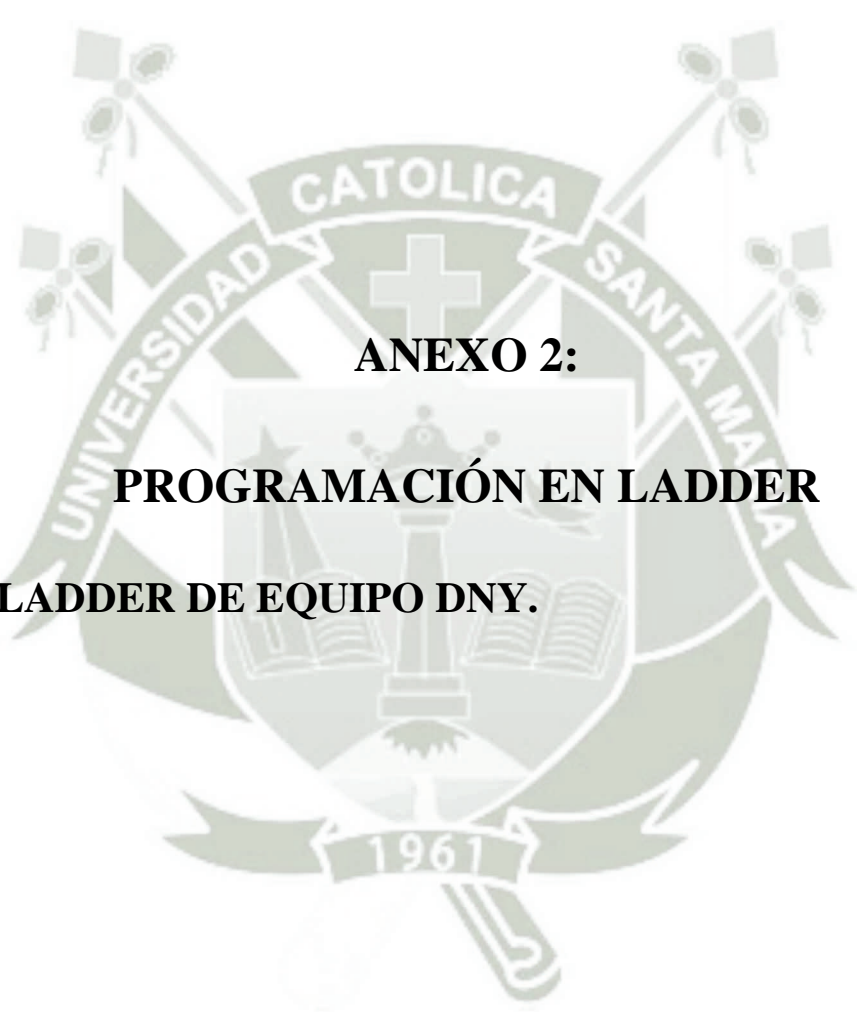
EQUIPO	NIDO DE CICLONES	DESCRIPCIÓN DE LA ALARMA	VALORES DE SETEO	OBSERVACIÓN
LSL_101	NIDO 1	Alarma de nivel bajo	LSH_101	Verificación de vaciado del tanque
LSH_101	NIDO 1	Alarma de nivel alto	LSL_101	Verificación de llenado del tanque
LSL_103	NIDO 2	Alarma de nivel bajo	LSH_103	Verificación de vaciado del tanque
LSH_103	NIDO 2	Alarma de nivel alto	LSL_103	Verificación de llenado del tanque

Tabla 4 Enclavamientos del nivel de los nidos de ciclones.

### 8.4 ALARMAS

Par tener detalle del Listado de Alarmas, se deberá referenciar al Listado de Alarmas que nos ofrecen los E3plus.





**ANEXO 2:**  
**PROGRAMACIÓN EN LADDER**  
**A. LADDER DE EQUIPO DNY.**

Logic - Ladder Diagram

SISTEMA HIDROCICLONES:CM DNY42R

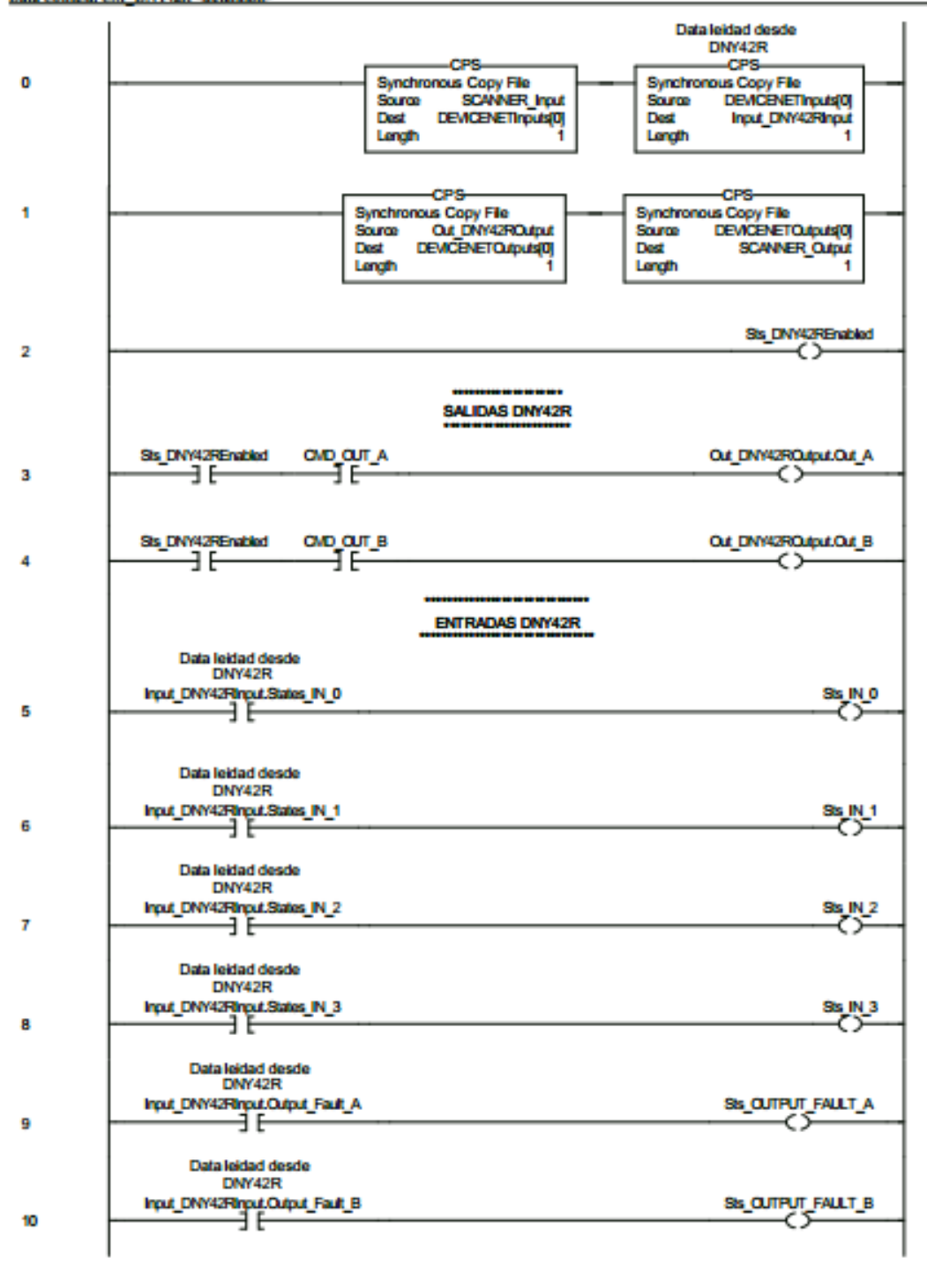
Total number of rungs in routine: 12

Data Contest: CM\_DNY42R <definition>

Page 1

07/06/2015 08:54:48 a.m.

C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram

SISTEMA\_HIDROCICLONES:CM\_DNY42R

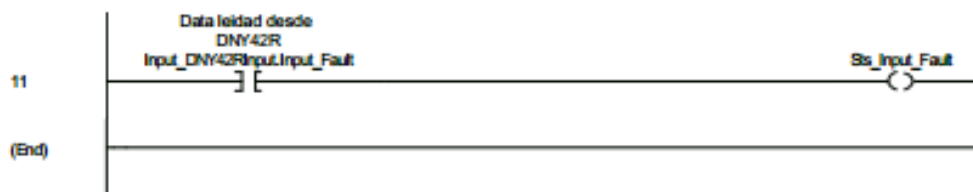
Total number of rungs in routine: 12

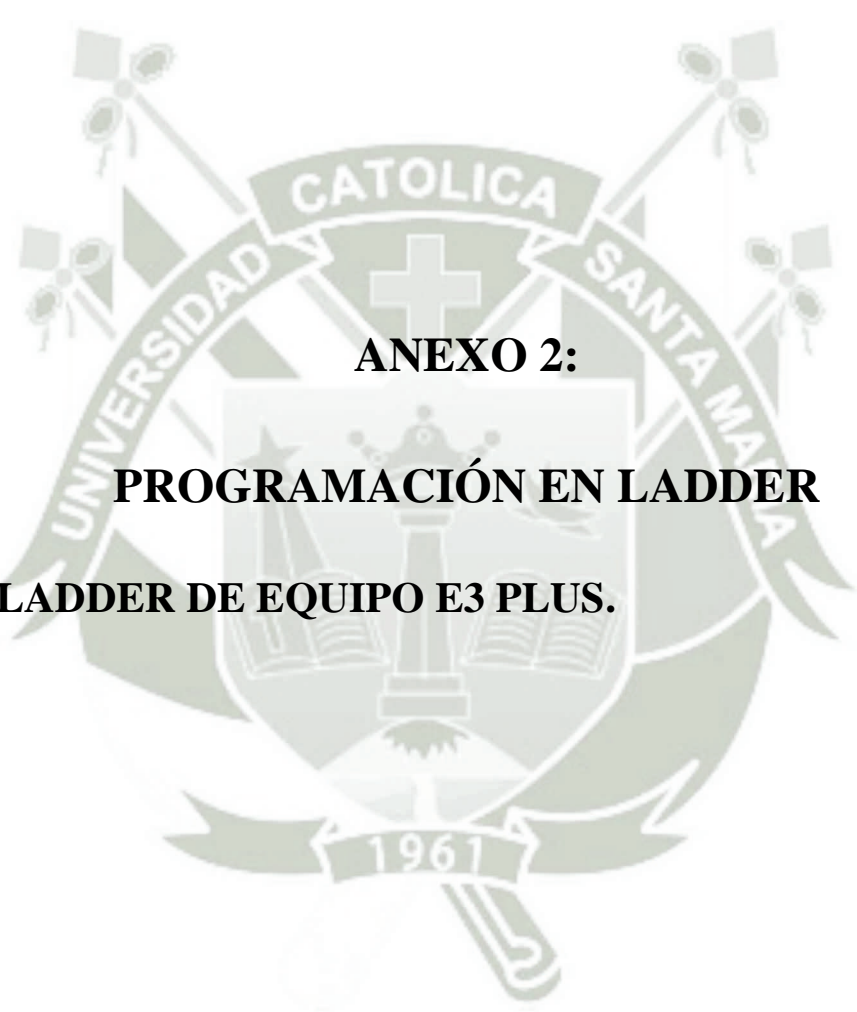
Data Context: CM\_DNY42R <definition>

Page 2

07/06/2015 08:54:48 a.m.

C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD





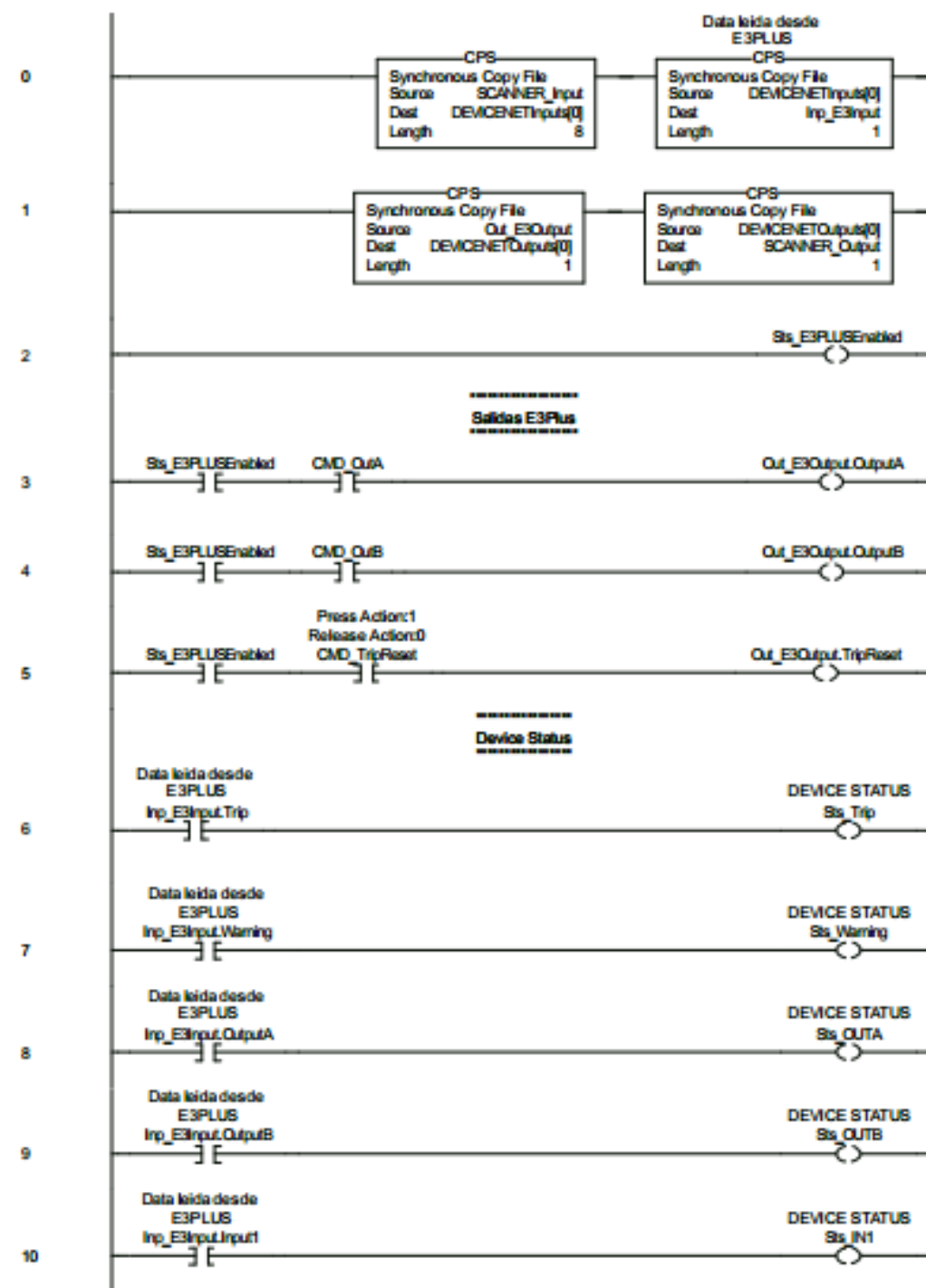
**ANEXO 2:**  
**PROGRAMACIÓN EN LADDER**  
**B. LADDER DE EQUIPO E3 PLUS.**

Logic - Ladder Diagram

SISTEMA HIDROCICLONES:CM E3PLUS  
Total number of rungs in routine: 57  
Data Context: CM\_E3PLUS <definición>

Page 1  
07/06/2015 08:53:04 a.m.

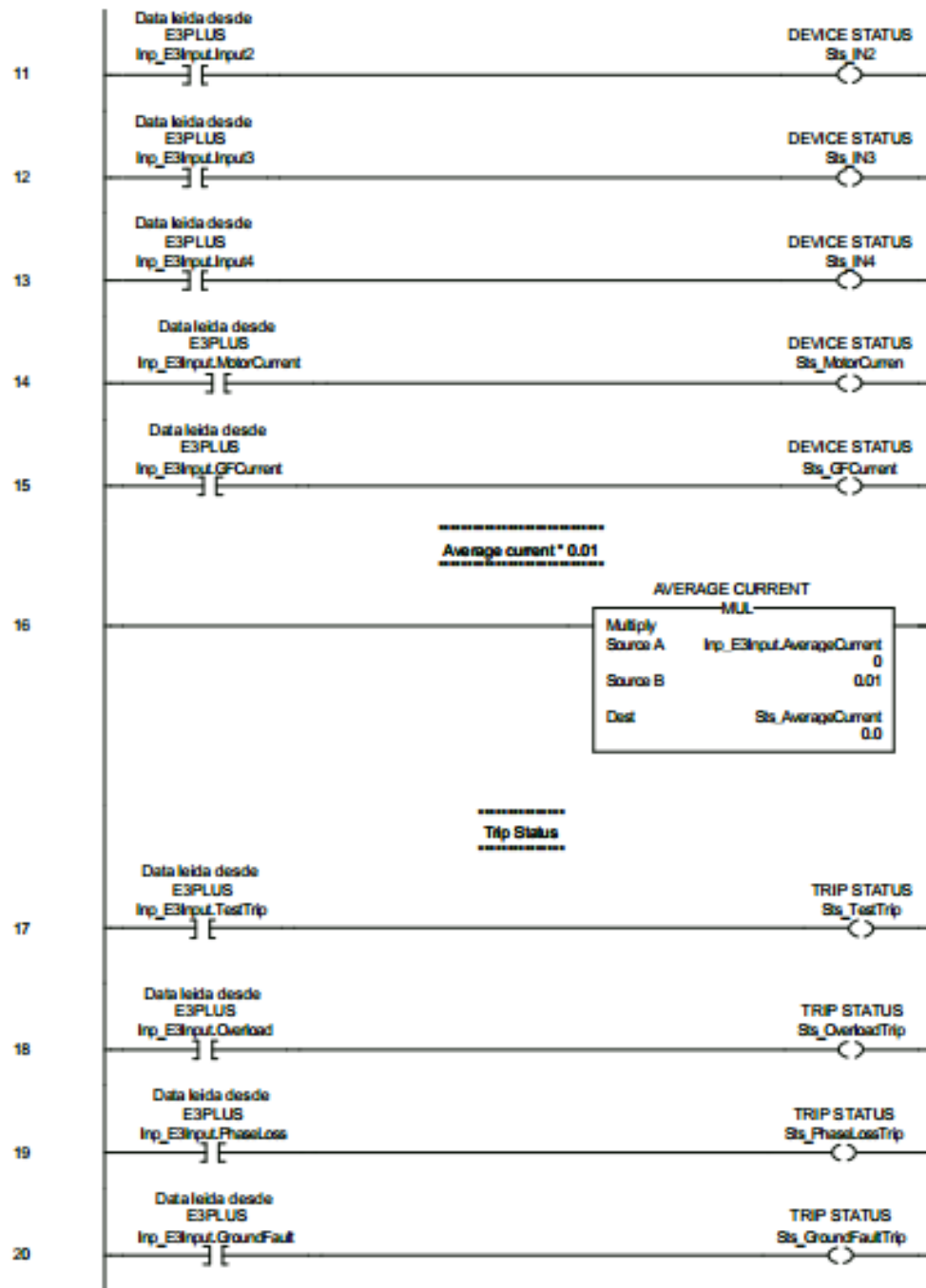
C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram  
SISTEMA\_HIDROCICLONES:CM\_E3PLUS  
Total number of rungs in routine: 57  
Data Context: CM\_E3PLUS <definition>

Page 2  
07/06/2015 08:53:05 a.m.  
C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram

SISTEMA\_HIDROCICLONES-CM\_E3PLUS

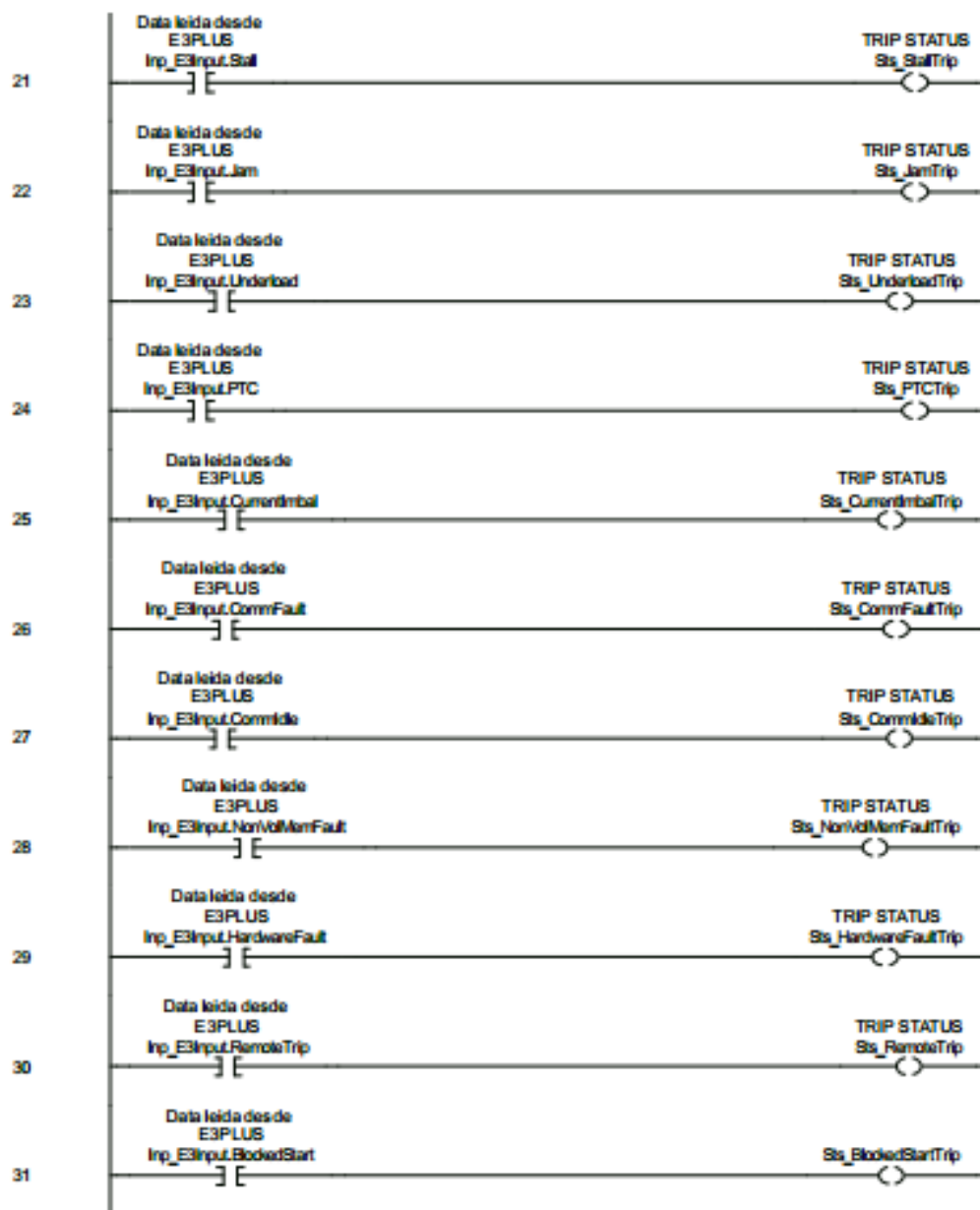
Total number of rungs in routine: 57

Data Context: CM\_E3PLUS <definition>

Page 3

07/06/2015 08:53:05 a.m.

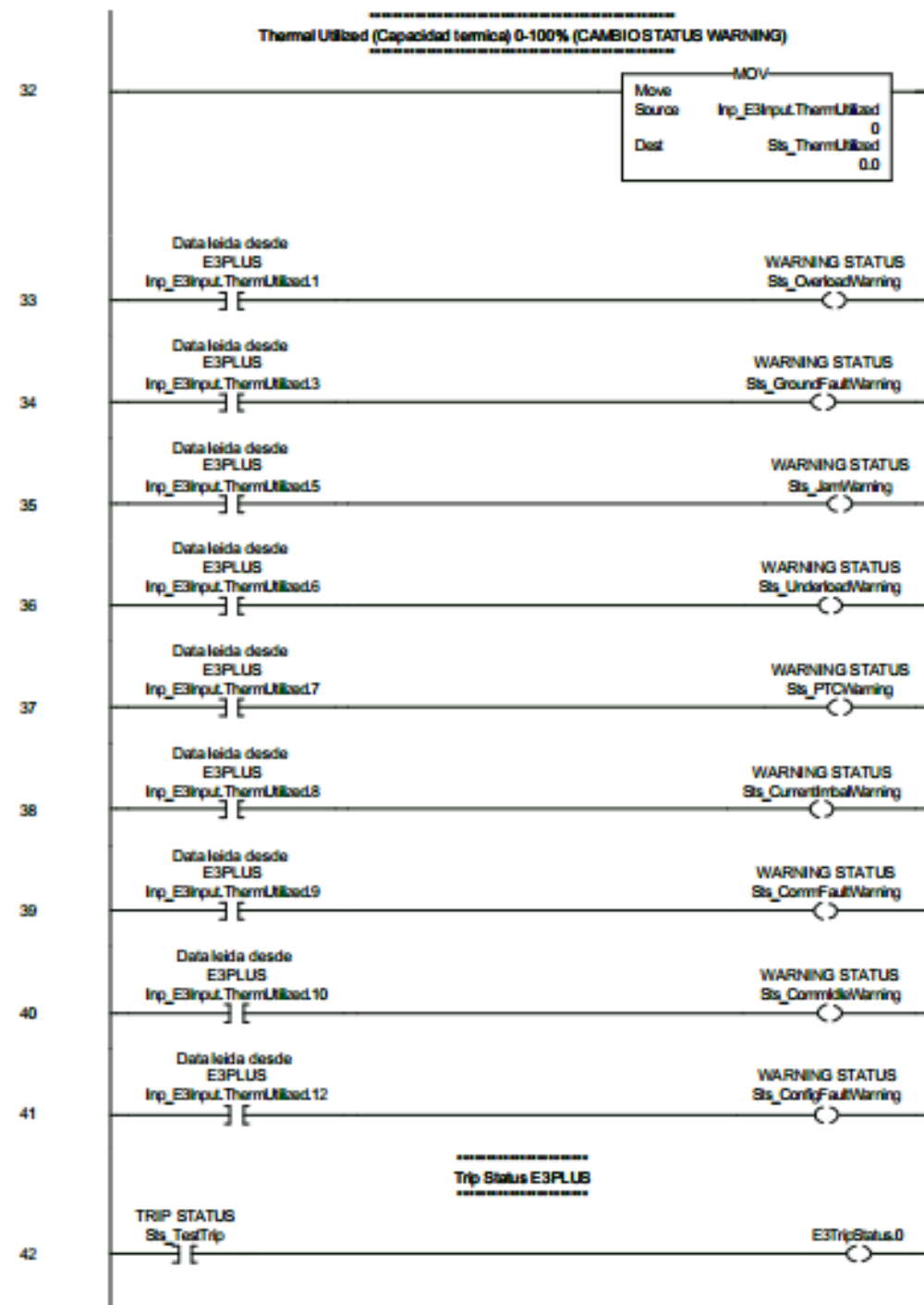
CAU\cvs\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram  
SISTEMA\_HIDROCICLONES:CM\_E3PLUS  
Total number of rungs in routine: 57  
Data Context: CM\_E3PLUS <definition>

Page 4  
07/06/2015 08:53:05 a.m.  
C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram

SISTEMA\_HIDROCICLONES.CM\_E3PLUS

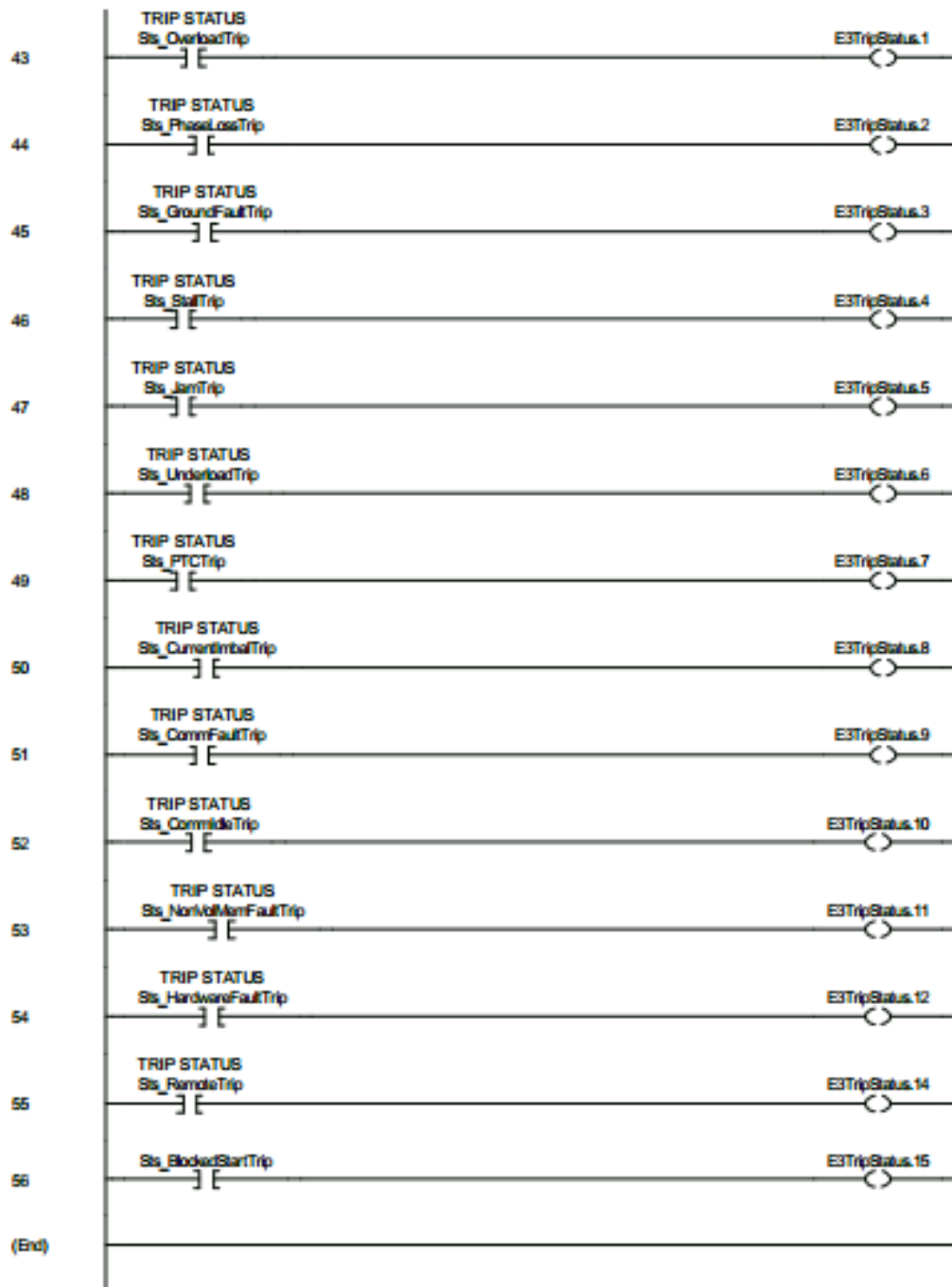
Total number of rungs in routine: 57

Data Context: CM\_E3PLUS <definition>

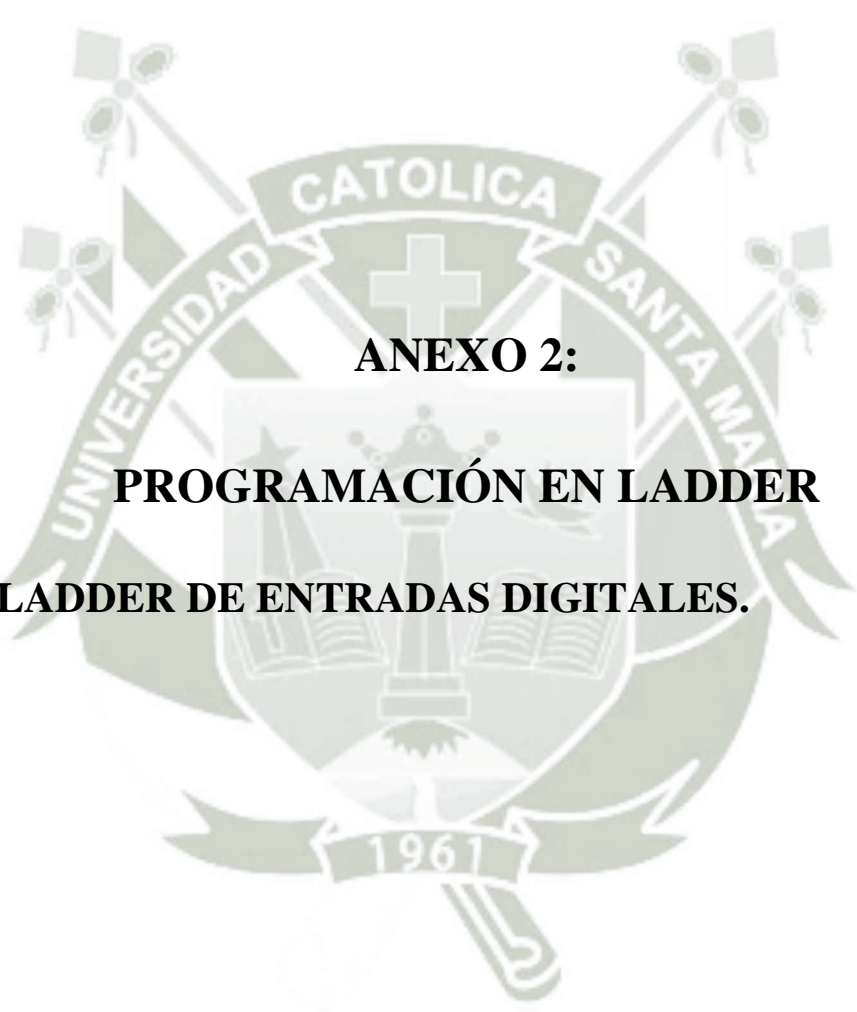
Page 5

07/06/2015 08:53:05 a.m.

CAUsers\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



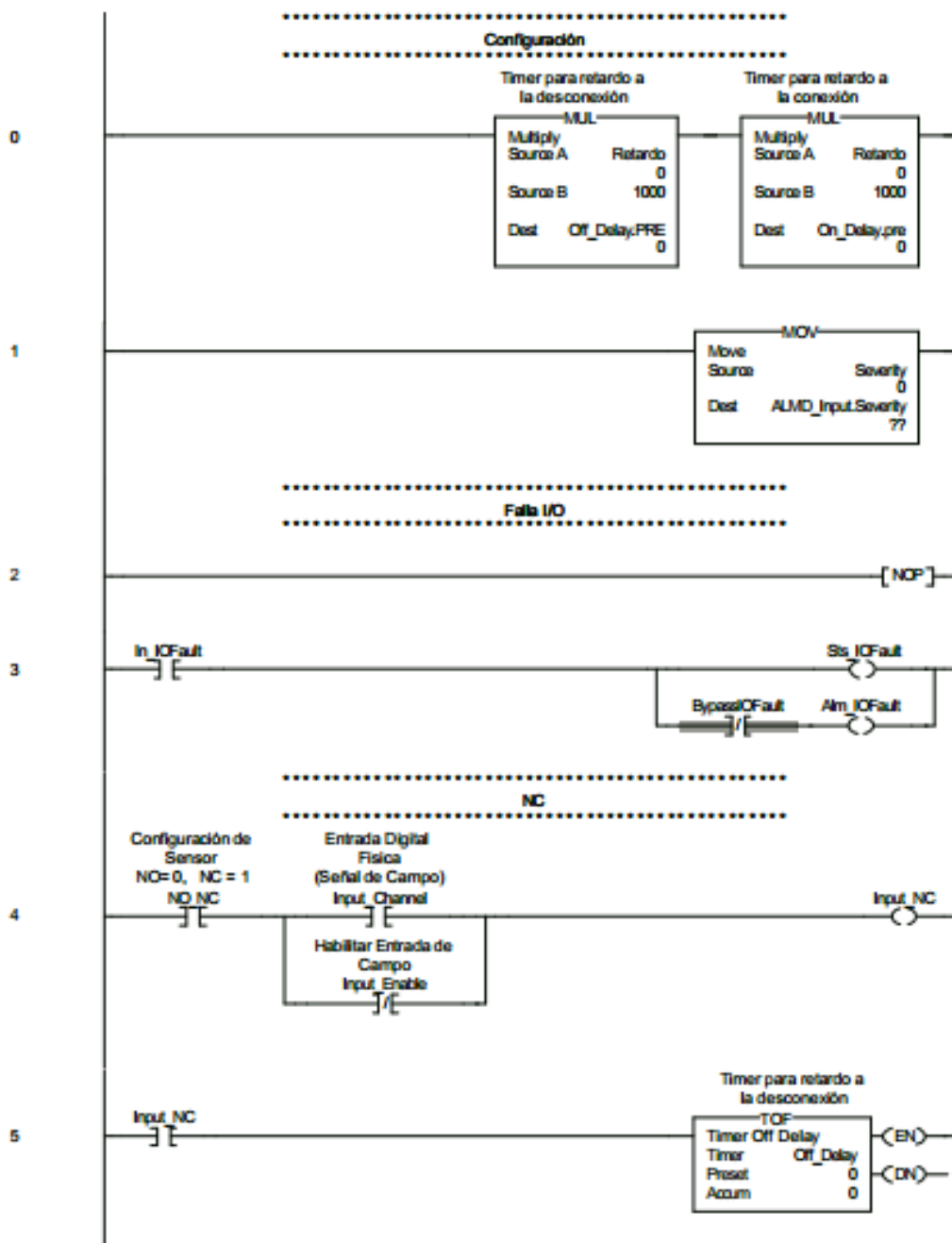
RSLogic 5000



**ANEXO 2:**  
**PROGRAMACIÓN EN LADDER**  
**C.LADDER DE ENTRADAS DIGITALES.**

Logic - Ladder Diagram  
SISTEMA HIDROCICLONES,CM DI  
Total number of rungs in routine: 21  
Data Contest: CM\_DI<definition>

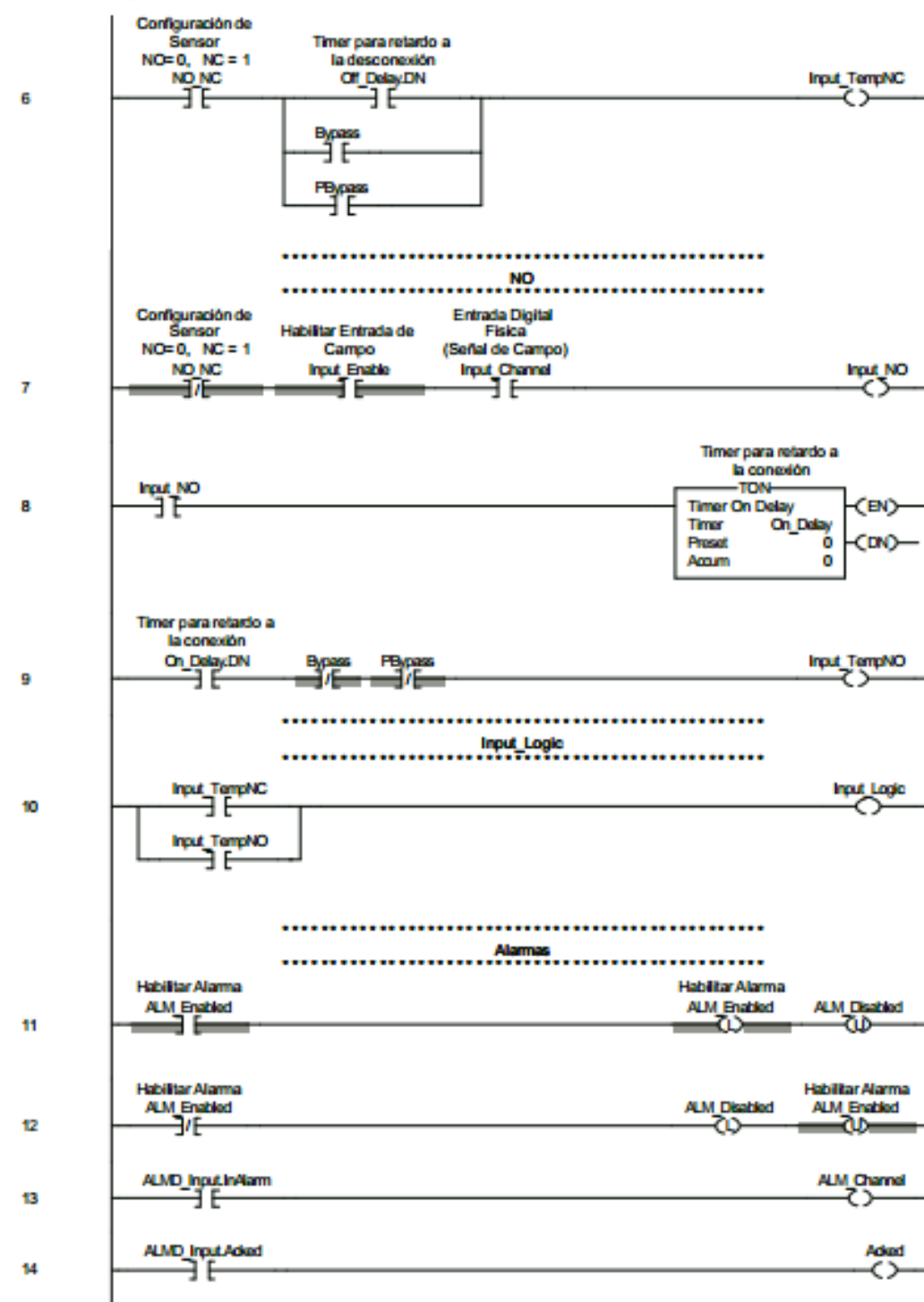
Page 1  
07/06/2015 08:55:54 a.m.  
C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram  
SISTEMA\_HIDROCICLONES:CM\_DI  
Total number of rungs in routine: 21  
Data Contest: CM\_DI<definition>

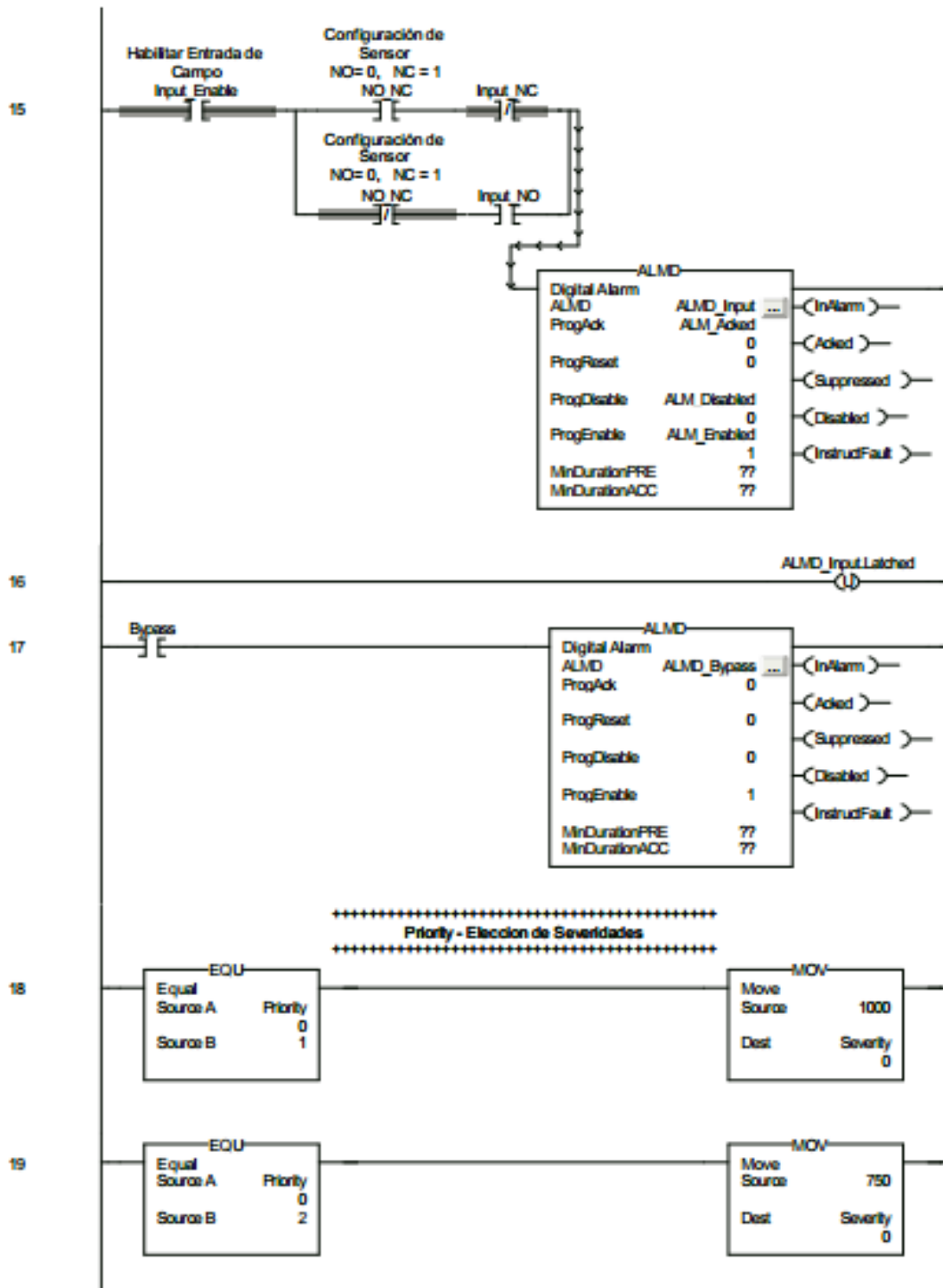
Page 2  
07/06/2015 08:55:55 a.m.  
CAUsers\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram  
SISTEMA\_HIDROCICLONES:CM\_DI  
Total number of rungs in routine: 21  
Data Contest: CM\_DI <definition>

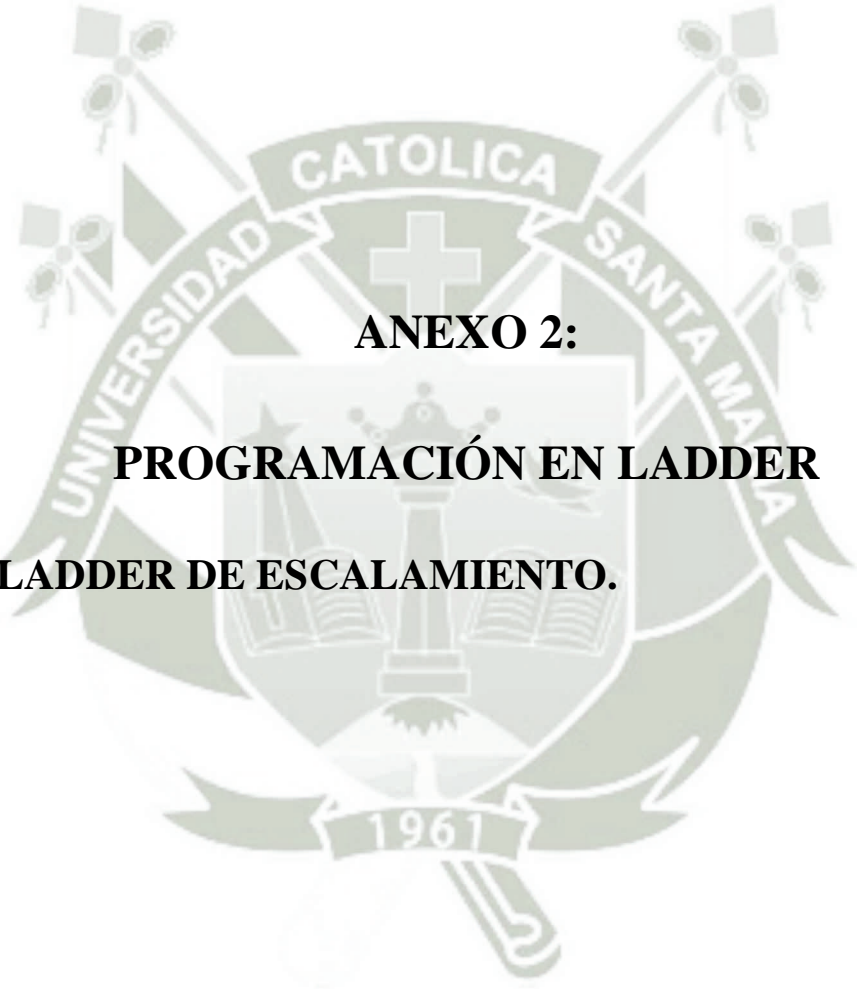
Page 3  
07/06/2015 08:55:55 a.m.  
CAU\en\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD



Logic - Ladder Diagram  
SISTEMA\_HIDROCICLONES:CM\_DI  
Total number of rungs in routine: 21  
Data Contest: CM\_DI<definition>

Page 4  
07/06/2015 08:55:56 a.m.  
CAUsers\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD





**ANEXO 2:**  
**PROGRAMACIÓN EN LADDER**  
**D. LADDER DE ESCALAMIENTO.**

Logic - Function Block Diagram

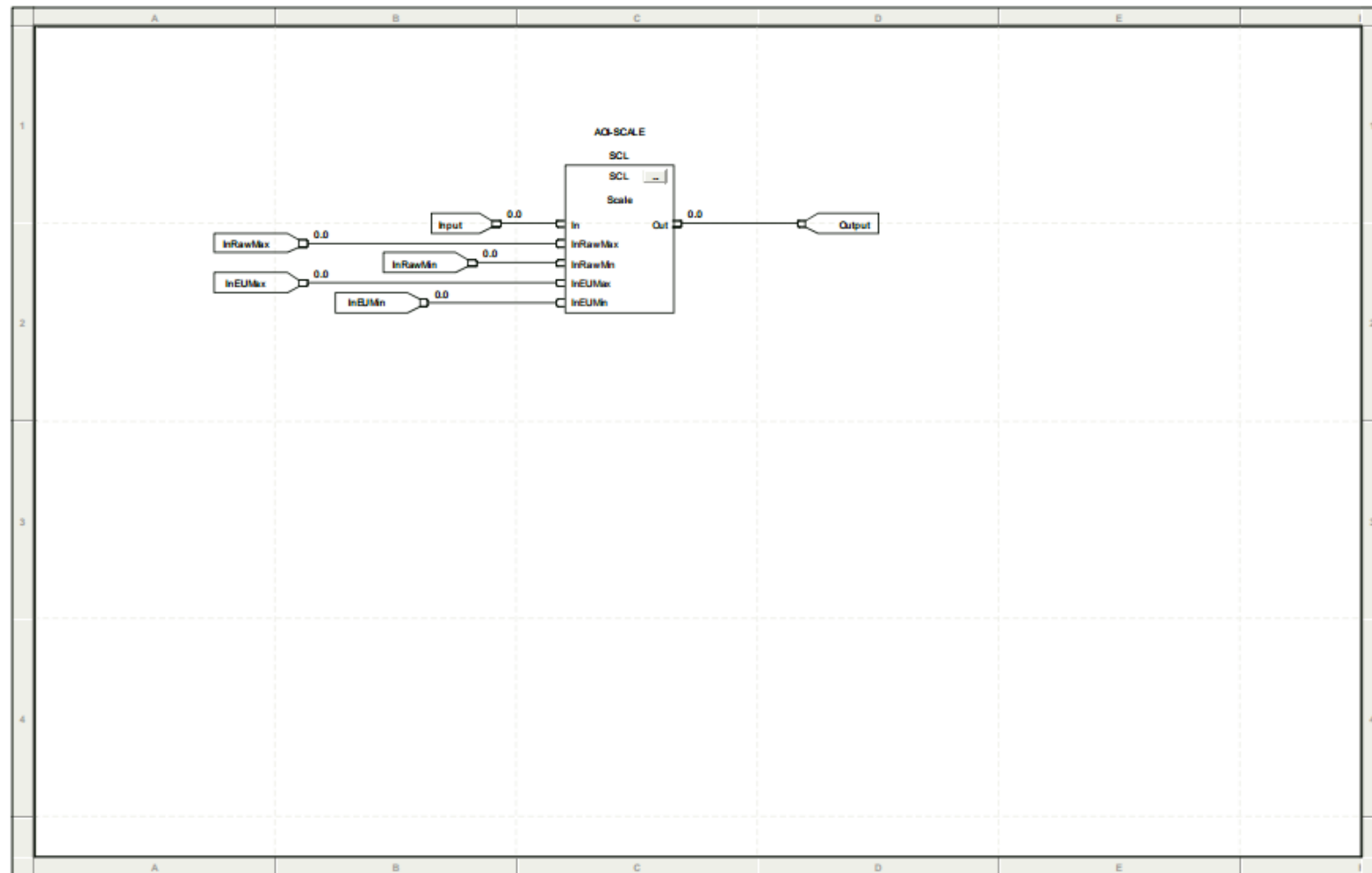
SISTEMA HIDROCICLONES:AOI\_SCALE

1 of 1 total sheets in routine

Data Context: AOI\_SCALE <definition>

14/06/2015 01:04:07 p.m.

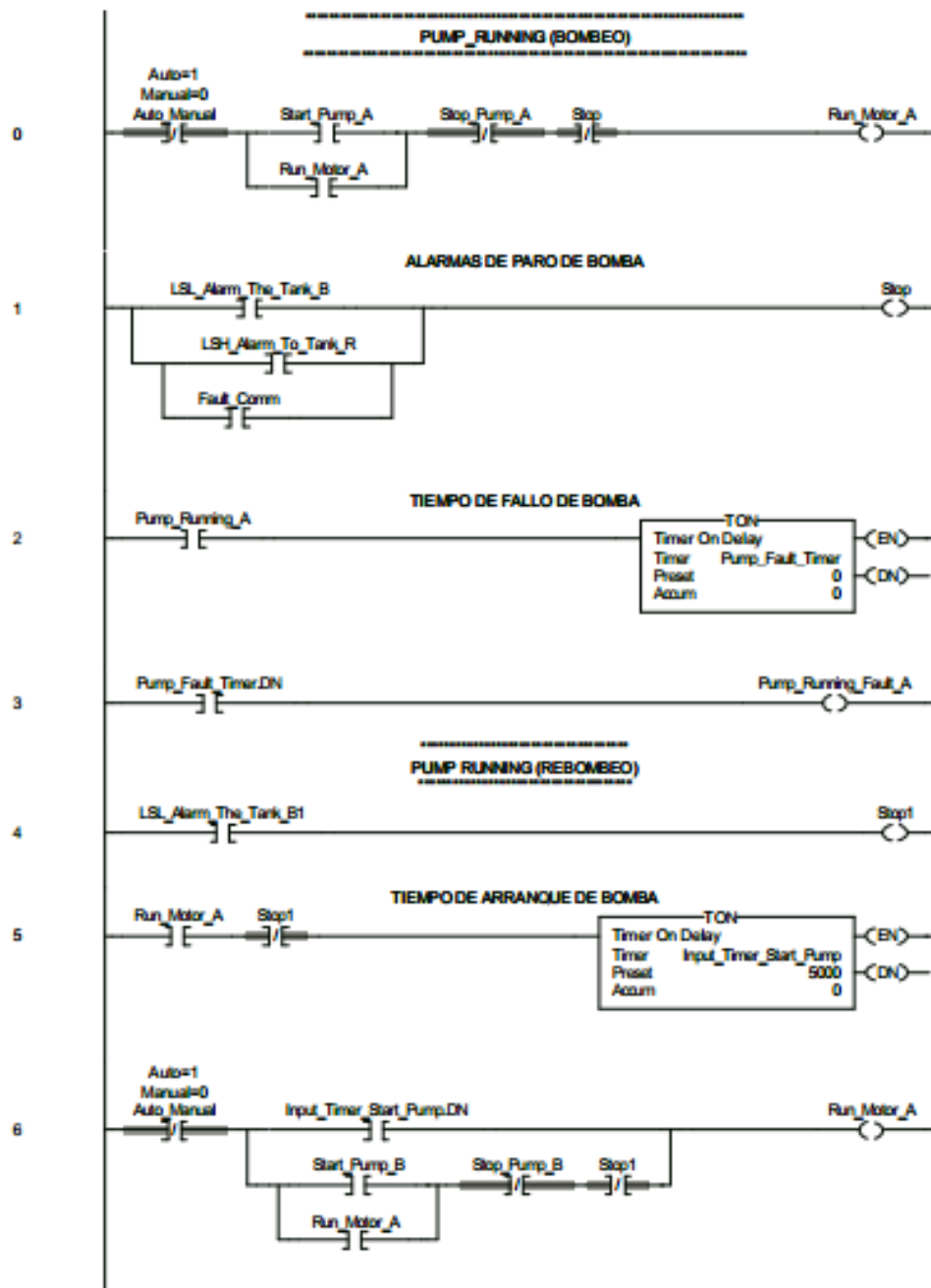
C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD





**ANEXO 2:**  
**PROGRAMACIÓN EN LADDER**  
**E. LADDER DE ARRANQUE DE BOMBA.**

Logic - Ladder Diagram  
 SISTEMA\_HIDROCCIONES:START\_PUMP  
 Total number of rungs in routine: 7  
 Data Context: START\_PUMP <Definition>  
 C:\Users\usuario\Desktop\HIDROCCIONES\SISTEMA\_HIDROCCIONES.ACD Page 1  
 07/06/2015 08:55:28 a.m.



RSLogix 5000

Logic - Ladder Diagram

SISTEMA\_HIDROCICLONES/START\_PUMP

Total number of rungs in routine: 7

Data Context: START\_PUMP <definition>

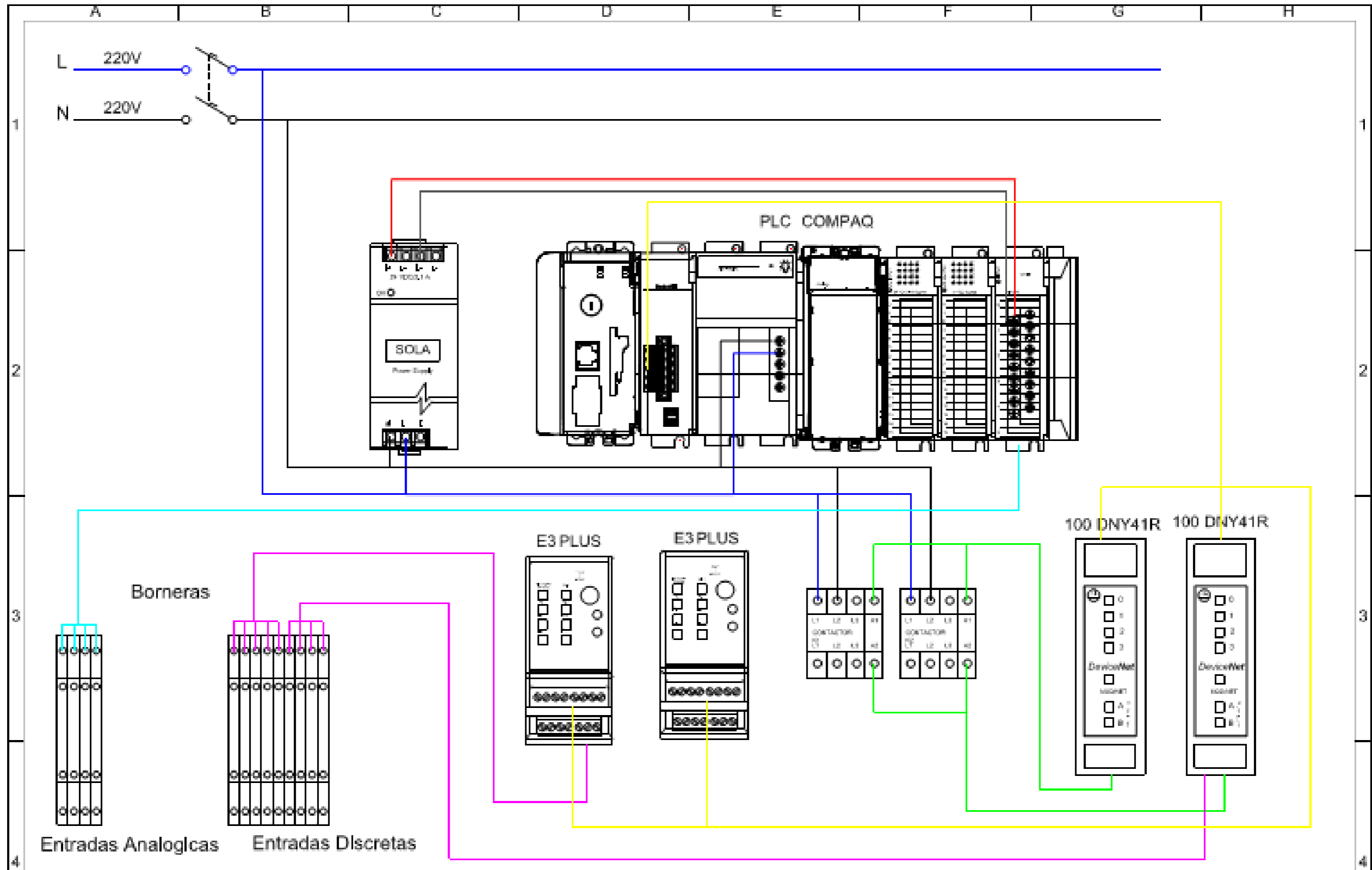
Page 2

07/06/2015 08:55:29 a.m.

C:\Users\mauario\Desktop\HIDROCICLONES\SISTEMA\_HIDROCICLONES.ACD







UNIVERSIDAD CATÓLICA  
SANTA MARÍA  
AREQUIPA - PERÚ

\*SERVICIO DE DESARROLLO DE SOFTWARE PARA SU RELACION, INGENIERIA  
CON PROYECTO DE INVESTIGACION Y SUPERVISION SCADA\*

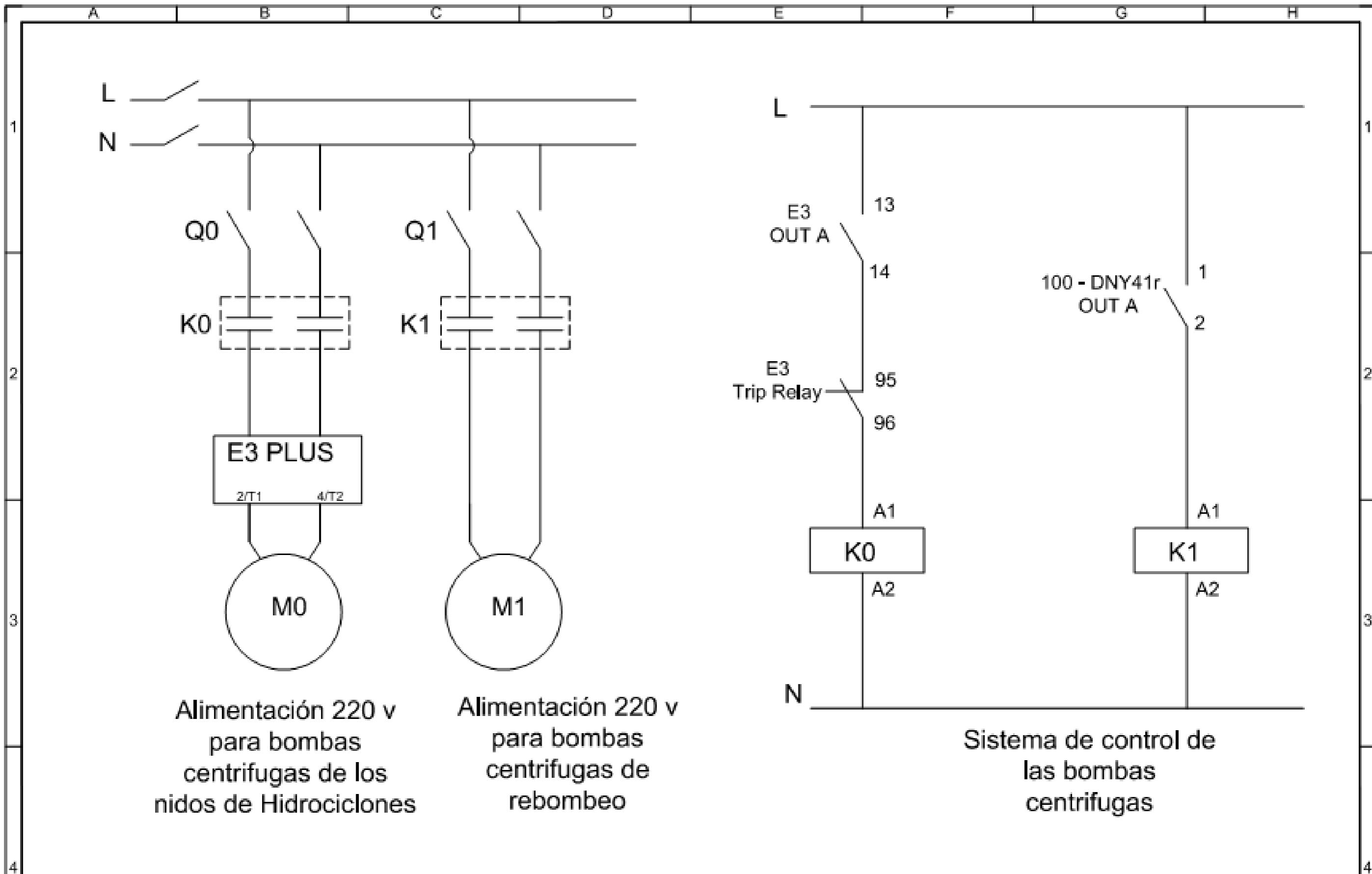
CONEXIONADO DE  
INSTRUMENTOS

Modelo y Diseño  
BURACCAHUA LLAMBOCA WALTER MIGUEL

Fecha	30-01-2015	Nº de Diagrama	002
Utilizado en CD de Trabajo ESTES/PAB/02.dwg			

NOTA:  
ESTE PLANO Y LA INFORMACION CONTENIDA EN EL SON  
PROPIEDAD EXCLUSIVA DEL PROGRAMA DE INGENIERIA  
ELECTRONICA DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA SANTA  
MARIA. EL USO Y/O APLICACION DEL MISMO REQUIERE  
AUTORIZACION DEL INGENIERO A CARGO.





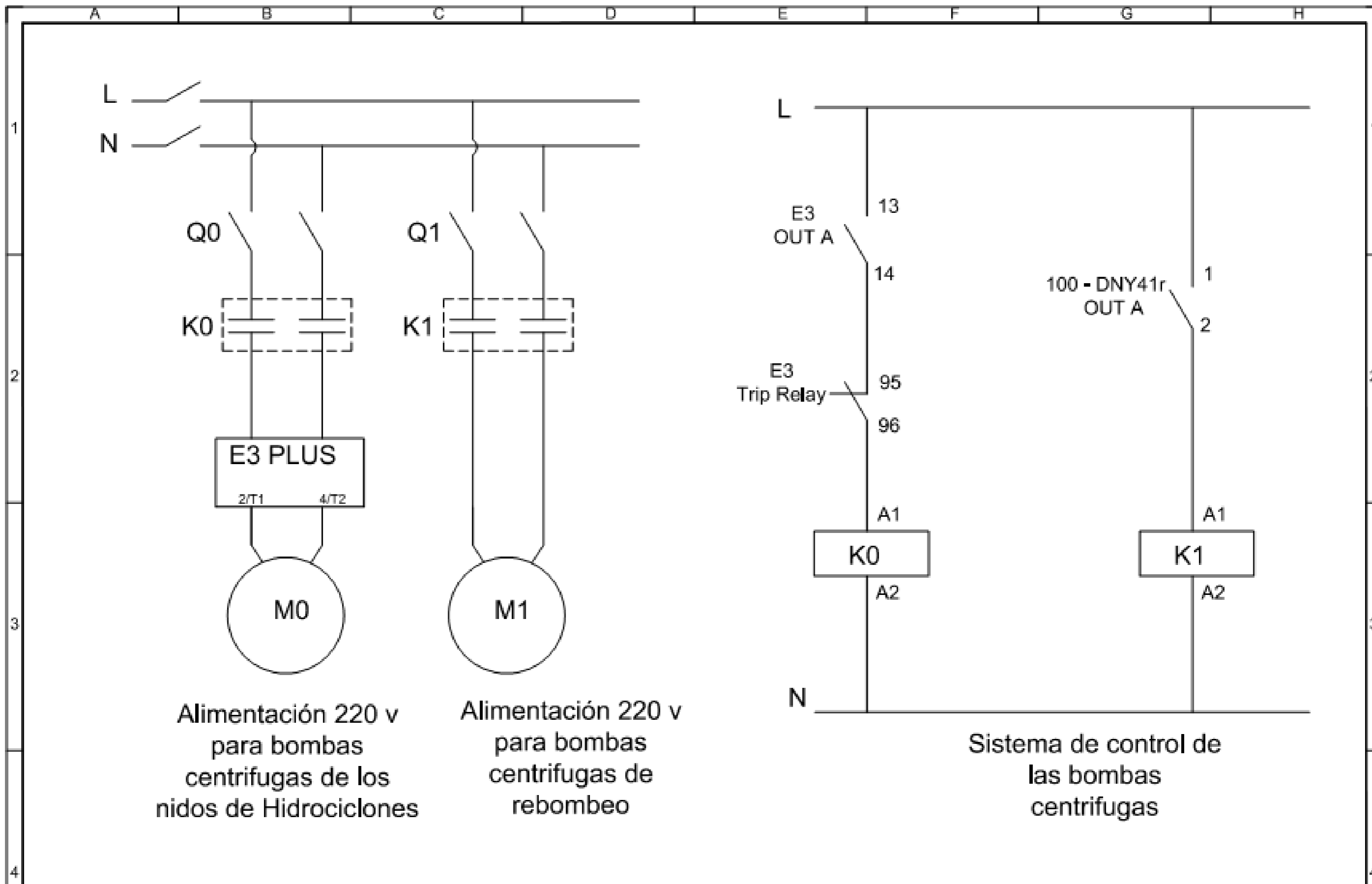
**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
SANTA MARÍA**  
AREQUIPA - PERÚ

\* SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVES PARA SU REUTILIZACIÓN, HACIENDO USO DE PROTOCOLO DEVICENET Y SUPERVISIÓN SCADA.  
**CONEXIONADO DE FUERZA 220V**

Diseño Y Dibujo  
BURACCAHUA LLAMOCCA WALTER MIGUEL  
Fecha 30-01-2015 N° de Diagrama 003  
Ubicación en CD de Tesis  
E:\TESIS\2015\01\03\Walter

NOTA:  
ESTE PLANO Y LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN EL SON PROPIEDAD EXCLUSIVA DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA. EL USO Y/O APLICACIÓN DEL MISMO REQUIERE AUTORIZACIÓN DEL INGENIERO A CARGO DE ESTA.

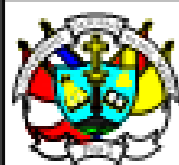




Alimentación 220 v  
para bombas  
centrifugas de los  
nidos de Hidrociclones

Alimentación 220 v  
para bombas  
centrifugas de  
rebombeo

Sistema de control de  
las bombas  
centrifugas



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
SANTA MARÍA

AREQUIPA - PERÚ

"SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE RELAVES PARA SU  
REUTILIZACIÓN, HACIENDO USO DE PROTOCOLO DEVICENET Y  
SUPERVISIÓN SCADA"

CONEXIONADO DE FUERZA 220V

Diseño Y Dibujo

HURACCAHUA LLAMOCCA WALTER MIGUEL

Fecha

30-01-2015

Nº de Diagrama

003

Ubicación en CD de Tesis

ESTUDIOS/003

NOTA:

ESTE PLANO Y LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN EL SON  
PROPIEDAD EXCLUSIVA DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA  
MARÍA. EL USO Y/O APLICACIÓN DEL MISMO REQUIERE  
AUTORIZACIÓN DEL INGENIERO A CARGO DE ÉSTA.