

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



**“CONTROL ADAPTATIVO Y MONITOREO DE UN
SISTEMA DE MOLIENDA CON REDES INDUSTRIALES”**

Tesis Presentada por el Bachiller:

HURTADO URRUTIA, Eduardo Antonio

Para optar 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

CONTROL ADAPTATIVO Y MONITOREO DE UN SISTEMA
DE MOLIENDA CON REDES INDUSTRIALES.

AUTOR:

HURTADO URRUTIA, EDUARDO ANTONIO

PRESIDENTE: MSc. ING. VICTOR H. RIVERA CHAVEZ.

VOCAL: ING. HENRY ZEGARRA GAGO.

SECRETARIO: ING. DIANA VALDIVIESO HERRERA.

AREQUIPA-PERÚ
2016

Dedicación a:

Mi familia, Karylú y María Julia por ser mi voluntad y apoyo incondicional en todo momento.

Mis padres, Antonio y Silvana por su gran esfuerzo y ánimo durante mi formación personal y académica.

A Dios, por mantenerme sano y alimentar mis ganas y voluntad día a día.

Eduardo A. Hurtado Urrutia

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: “CONTROL ADAPTATIVO Y MONITOREO DE UN SISTEMA DE MOLIENDA CON REDES INDUSTRIALES”, 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.

CONTENIDO

RESUMEN	15
ABSTRACT.....	17
INTRODUCCIÓN	19
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	22
1.1 Descripción del problema	23
1.2 Objetivos	25
1.2.1 Objetivo principal	25
1.2.2 Objetivos secundarios	25
1.3. Hipótesis.....	26
1.3.1. Hipótesis principal	26
1.3.2. Hipótesis secundaria	26
1.4. Variables	26
1.4.1 Variable independiente	26
1.4.2. Variable dependiente	26
1.5. Antecedentes de la investigación	27
CAPITULO II. BASES TEÓRICAS - CONTROL E INSTRUM.	29
2.1. Control adaptativo	30
2.1.1. Controladores adaptativos con modelo de referencia (MRAC).....	34
2.2. ¿Por qué utilizar control adaptativo?	34
2.3. El problema del control adaptativo.....	35
2.4. Autoajuste y ajuste por tabla de controladores	36
2.5. Control PID	39
2.6. Método de la respuesta transitoria.....	40
2.6.1. Método de respuesta en escalón de Ziegler - Nichols	42
2.6.2. Caracterización de la respuesta en escalón	43
2.7. Redes industriales	44
2.7.1. Profibus DP.....	48
2.7.2. Devicenet	50
2.8. Indicadores	54
Capitulo III. BASES TEÓRICAS - MECÁNICO.	55
3.1. Molienda	56
3.1.1. Concepto	56
3.1.2. Movimiento de la carga de molinos.....	57
3.1.3. Partes principales de un molino	59

3.1.4 Factores que afectan la eficiencia de la molienda.....	60
3.1.5 Volumen de llenado de molino.....	61
3.1.6 Circuitos de molienda y clasificación.....	62
3.1.7 Circuito cerrado de molienda y clasificación.....	63
3.2. Molino de bolas.....	64
3.2.1 Operación.....	65
3.2.2 Eficiencia del molino.....	67
3.2.3 Parámetros del molino.....	68
3.2.4 Capacidad y consumo de energía.....	70
3.2.5 Molino de bolas Marcy.....	71
3.2.6 Clasificadores en húmedo.....	71
3.2.7 Hidrociclones.....	72
Capítulo IV. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	76
4.1. Diseño control e instrumentación.....	77
4.1.1 Filosofía de control.....	77
4.1.2 Selección de software, equipos y medios físicos.....	80
4.1.3 Modelamiento lógico-teórico.....	82
4.2. Diseño mecánico - eléctrico.....	86
4.2.1 Cálculo de potencia de motor de molino de bolas.....	86
4.2.2 Selección del reductor de velocidad.....	87
4.2.3 Expresión Dawn para el dimensionamiento del molino.....	88
4.2.4 Cálculo de velocidad del molino.....	89
4.2.5 Volumen de carga y peso de la bola.....	91
Capítulo V. INST. ELÉCT, CONFIG. Y PROGRAMACIÓN.....	94
5.1. Panel fotográfico.....	95
5.2. Descripción de componentes.....	98
5.3. Segmentación del procedimiento de configuración y programación.....	100
5.4. Configuración y programación de PLC Siemens s&-1200.....	100
5.5. Configuración y programación de PLC Allen Bradley CompactLogix.....	112
5.6. Configuración de servidor OPC KEPSERVER-EX.....	117
5.6.1. KEPSERVER-EX Siemens.....	118
5.6.2. KEPSERVER-EX Allen Bradley.....	123
5.7. Config. de sistema de monitoreo y entorno gráfico en INTOUCH.....	126
Capítulo VI. EXP. E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	130
6.1. Segmentación del procedimiento experimental.....	131
6.1.1. Verificación de entradas y salidas de campo y PLC.....	131

6.1.2. Respuesta de planta a señal tipo rampa en lazo abierto	132
6.1.3. Respuesta de planta a señales tipo escalón	137
6.1.3.1. Análisis a respuesta transitoria zona 1	137
6.1.3.2. Análisis a respuesta transitoria zona 2	139
6.1.3.3. Análisis a respuesta transitoria zona 3	141
6.1.3.4. Análisis a respuesta transitoria zona 4	144
6.1.3.5. Análisis a respuesta transitoria zona 5	146
6.1.4. Cálculo de parámetro de control PID según Ziegler-Nichols	149
6.1.5. Afinamiento de parámetros por método experimental	150
6.1.6. Resultados de muestreo	153
Conclusiones	161
Recomendaciones	163
Bibliografía y enlaces electrónicos.....	165
Anexos	167
Anexo 1 Programa de control Ladder Rockwell Hidrociclón	167
Anexo 2 Programa de control Ladder Siemens Molino	169
Anexo 3 Lista y planos E&I	177
Anexo 4 Presupuesto de proyecto.....	187

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Tratamiento de cobre por sulfuros</i>	20
<i>Figura 1.1.1: Diagrama general de proceso de molienda por molinos de bolas</i>	25
<i>Figura 2.1.1: Esquema general de un control adaptativo</i>	31
<i>Figura 2.1.2: Sistema de control adaptativo de bucle abierto</i>	32
<i>Figura 2.1.1.1: Modelo de sistema MRAC</i>	34
<i>Figura 2.6.1: Respuesta de un proceso (planta) a una señal escalón</i>	41
<i>Figura 2.6.2.1: Método del área para la determinación de L y T</i>	44
<i>Figura 2.7.1: Topología y cableado convencional – bus de campo</i>	46
<i>Figura 2.7.2: Comparativa entre buses y protocolos de campo comerciales</i>	47
<i>Figura 2.7.1.1: Diagrama lógico de una red PROFIBUS convencional</i>	48
<i>Figura 2.7.2.1: Clasificación de redes industriales por nivel</i>	51
<i>Figura 2.7.2.2: Ejemplo de una red DEVICENET convencional</i>	52
<i>Figura 3.1.2.1: Movimiento de medios de molienda</i>	57
<i>Figura 3.1.5.1: Diagrama DH, h y L</i>	61
<i>Figura 3.1.7.1: Circuito cerrado de molienda convencional</i>	64
<i>Figura 3.2.1: Corte transversal de un molino de bolas</i>	65
<i>Figura 3.2.7.1: Diagrama básico de un hidrociclón</i>	73
<i>Figura 3.2.7.2: Hidrociclones en circuitos de molienda cerrados</i>	75
<i>Figura 4.1.3.1 Diagrama de bloques de un sistema realimentado</i>	83
<i>Figura 4.1.3.2: Diagrama de bloques de sistema de molienda con control adaptativo</i>	84
<i>Figura 4.1.3.3: Típica respuesta escalón a una planta de primer orden en lazo abierto</i>	86

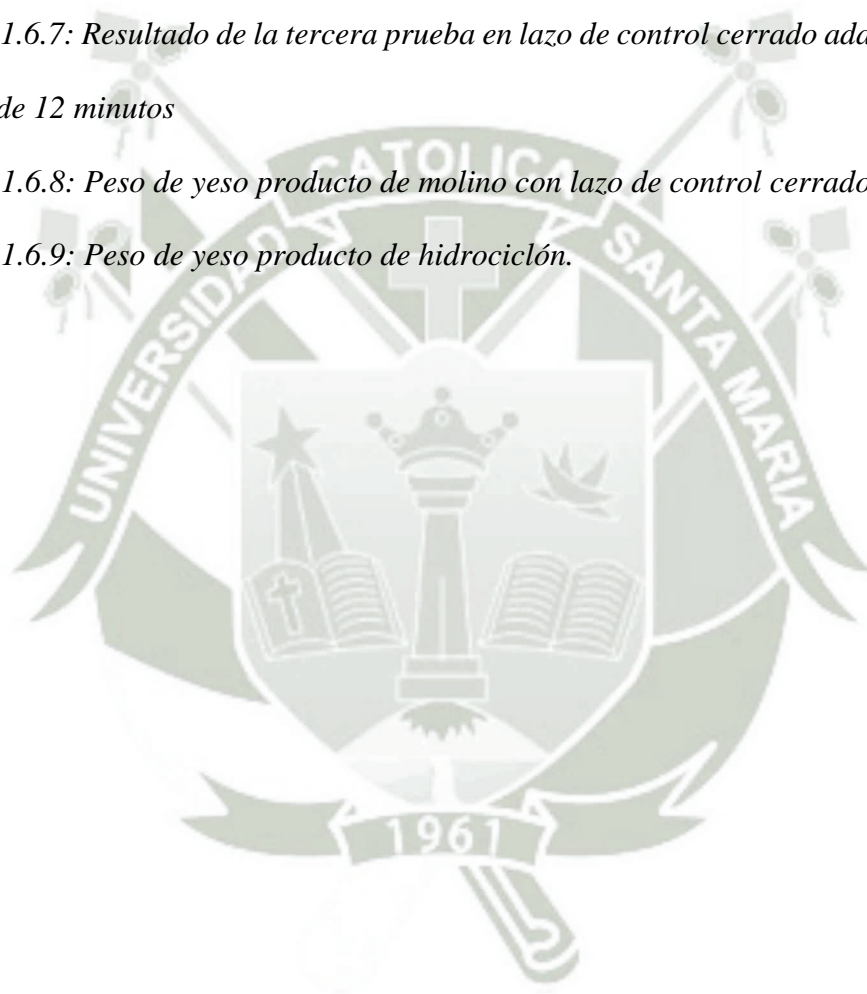
<i>Figura 4.2.1.1: Vista lateral de molino de bolas</i>	87
<i>Figura 4.2.2.1: Vista Frontal de Molino de Bolas</i>	88
<i>Figura 4.2.3.1: Vista Superior de Molino de Bolas</i>	89
<i>Figura 4.2.4.1: Vista Isométrica de Molino de Bolas</i>	91
<i>Figura 4.2.4.2. Porcentaje de llenado de villas ideal en molino de bolas</i>	93
<i>Figura 5.1.1. Tablero de control descentralizado 0310-DCS-0001.</i>	95
<i>Figura 5.1.2. Tablero remoto de instrumentación 0310-JBD-0001.</i>	96
<i>Figura 5.1.3. Variador Profibus 0310-VDF-0001 y motor 0310-ML-0001-M1.</i>	97
<i>Figura 5.1.4. Instrumentos de campo y motor de alimentación de mineral.</i>	97
<i>Figura 5.1.5. Bomba de sistema de hidrociclón 0310-PP-0001 con motor 0310-PP-0001-M1.</i>	98
<i>Figura 5.4.1. Ubicación de aplicación TIA PORTAL V13 en escritorio de VM.</i>	101
<i>Figura 5.4.2. Creación de nuevo proyecto en TIA PORTAL V13.</i>	102
<i>Figura 5.4.3. Ventana de Project View en TIA PORTAL V13</i>	103
<i>Figura 5.4.4. Selección de PLC y procesador en TIA PORTAL V13.</i>	104
<i>Figura 5.4.5. Configuración de dirección IP en puerto Profinet.</i>	104
<i>Figura 5.4.6. Selección de firmware de módulo de comunicación Profibus maestro.</i>	105
<i>Figura 5.4.7. Selección de variador Micromaster 420.</i>	106
<i>Figura 5.4.8. Configuración topológica entre módulo de comunicación Profibus maestro y variador Micromaster 420.</i>	106
<i>Figura 5.4.9. Selección de tipo de comunicación entre módulo de comunicación Profibus y variador</i>	107
<i>Figura 5.4.10. Direccionamiento de parámetros y palabras de mando y monitoreo de variador Micromaster 420.</i>	107

<i>Figura 5.4.11. Procedimiento de compilación y descarga en TIA PORTAL V13</i>	108
<i>Figura 5.4.13. Ladder escritura de palabras de mando en variador.</i>	111
<i>Figura 5.5.1. Ventana de apertura de RSLINX</i>	112
<i>Figura 5.5.2. Configuración de Driver de comunicación en RSLINX</i>	112
<i>Figura 5.5.3. Dispositivos conectados vía Ethernet a nuestra PC</i>	113
<i>Figura 5.5.4. Ventana de apertura de RSLOGIX5000.</i>	113
<i>Figura 5.5.5. Apertura de nuevo proyecto y configuración de módulo de comunicación Devicenet en RSLOGIX5000</i>	114
<i>Figura 5.5.6. Ventana de apertura de RSNETWORX for Devicenet</i>	115
<i>Figura 5.5.7. Procedimiento de escaneo de dispositivos en RSNETWORX.</i>	115
<i>Figura 5.5.8. Configuración de parámetros de relé E3PLUS en RSNETWORX</i>	116
<i>Figura 5.5.9. Direccionamiento de entradas y salidas de relé E3PLUS en módulo de comunicación Devicenet.</i>	116
<i>Figura 5.6.1.1. Ingreso de usuario y contraseña en KEPSERVER-EX.</i>	118
<i>Figura 5.6.1.2. Configuración de canal en KEPSERVER-EX para un dispositivo Siemens con adaptador PROFINET.</i>	119
<i>Figura 5.6.1.3. Configuración de dispositivo en KEPSERVER-EX para un PLC Siemens S7-1200.</i>	121
<i>Figura 5.6.1.4. Creación de TAG para cada variable necesaria en panel de operador.</i>	122
<i>Figura 5.6.1.5. Verificación del enlace en cada uno de los TAG creados en KEPSERVER-EX.</i>	122
<i>Figura 5.6.2.1. Configuración de canal para Allen Bradley Ethernet Driver en KEPSERVER-EX</i>	123

<i>Figura 5.6.2.2. Configuración de dispositivo CompactLogix en KEPSEVER-EX</i>	124
<i>Figura 5.6.2.3. Configuración y prueba de TAG creados en KEPSEVER-EX.</i>	125
<i>Figura 5.7.1. Ventana de creación de proyecto INTOUCH.</i>	126
<i>Figura 5.7.2. Ventana de diálogo para creación de enlaces OPC en INTOUCH.</i>	127
<i>Figura 5.7.3. Ventana de creación de enlaces OPC entre INTOUCH y KEPSEVER-EX.</i>	127
<i>Figura 5.7.4. Ventana de creación de TAG en INTOUCH.</i>	128
<i>Figura 5.7.5. Ventana de entorno de monitoreo en INTOUCH</i>	129
<i>Figura 6.1.2.1. Señal de excitación tipo rampa y respuesta de variable de control en lazo abierto</i>	133
<i>Figura 6.1.2.2. Línea de tendencia y zonas de confort para evaluación de parámetros de control PID</i>	134
<i>Figura 6.1.2.3. Líneas de tendencia escaladas para análisis.</i>	135
<i>Figura 6.1.3.1.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 1</i>	137
<i>Figura 6.1.3.1.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 15%.</i>	138
<i>Figura 6.1.3.1.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 1 escalada</i>	138
<i>Figura 6.1.3.1.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 1</i>	139
<i>Figura 6.1.3.2.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 2</i>	139
<i>Figura 6.1.3.2.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 46%.</i>	140
<i>Figura 6.1.3.2.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 2 escalada.</i>	140
<i>Figura 6.1.3.2.4. Lín. tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 2.</i>	141
<i>Figura 6.1.3.3.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 3</i>	142

<i>Figura 6.1.3.3.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 63%.</i>	142
<i>Figura 6.1.3.3.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 3 escalada.</i>	143
<i>Figura 6.1.3.3.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 3.</i>	143
<i>Figura 6.1.3.4.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 4</i>	144
<i>Figura 6.1.3.4.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 90%.</i>	145
<i>Figura 6.1.3.4.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 4 escalada.</i>	145
<i>Figura 6.1.3.4.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 4.</i>	146
<i>Figura 6.1.3.5.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 5</i>	147
<i>Figura 6.1.3.5.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 100%.</i>	147
<i>Figura 6.1.3.5.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 5 escalada.</i>	148
<i>Figura 6.1.3.5.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 5.</i>	148
<i>Figura 6.1.5.1: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 13 RPM.</i>	151
<i>Figura 6.1.5.2: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 25 RPM.</i>	151
<i>Figura 6.1.5.3: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 30 RPM.</i>	151
<i>Figura 6.1.5.4: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 40 RPM.</i>	152
<i>Figura 6.1.5.5: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 62 RPM.</i>	152
<i>Figura 6.1.6.1: Peso de yeso ingresado a molino.</i>	153
<i>Figura 6.1.6.2: Resultado de la primera prueba en lazo de control cerrado clásico con un spam de 3 minutos</i>	154
<i>Figura 6.1.6.3: Resultado de la segunda prueba en lazo de control cerrado clásico con un spam de 12 minutos</i>	155

<i>Figura 6.1.6.4: Resultado de la tercera prueba en lazo de control cerrado clásico con un spam de 12 minutos</i>	155
<i>Figura 6.1.6.5: Resultado de la primera prueba en lazo de control cerrado adaptativo con un spam de 3 minutos</i>	156
<i>Figura 6.1.6.6: Resultado de la segunda prueba en lazo de control cerrado adaptativo con un spam de 12 minutos</i>	156
<i>Figura 6.1.6.7: Resultado de la tercera prueba en lazo de control cerrado adaptativo con un spam de 12 minutos</i>	157
<i>Figura 6.1.6.8: Peso de yeso producto de molino con lazo de control cerrado.</i>	158
<i>Figura 6.1.6.9: Peso de yeso producto de hidrociclón.</i>	159



INDICE DE TABLAS

<i>Tabla: 2.6.1.1: Parámetros establecidos por Ziegler y Nichols.</i>	42
<i>Tabla 2.7.2.1. Criterios de diseño físico de una red DEVICENET.</i>	54
<i>Tabla 3.2.5.1: Rendimiento ilustrativo de un molino Marcy de bolas.</i>	71
<i>Tabla 4.1.2.1. Comparativa DEVICENET PROFIBUS</i>	81
<i>Tabla 4.1.2.2. Equipos utilizados en la implementación de la planta</i>	82
<i>Tabla 4.1.2.3. Cables utilizados en la implementación de la planta.</i>	82
<i>Tabla 4.1.3.1. Premisas lógicas de modelamiento de planta.</i>	85
<i>Tabla 4.2.1.1 Datos de motor</i>	87
<i>Tabla 5.4.1. Variables de proceso requeridas para programación en TP.</i>	111
<i>Tabla 5.5.1. Variables de proceso req. para programación en RSDLOGIX5000</i>	117
<i>Tabla 6.1.4.1: Constantes exp. obtenidas de análisis en estado estacionario.</i>	149
<i>Tabla 6.1.4.2: Formulas de parámetros de sintonización Ziegler – Nichols.</i>	149
<i>Tabla 6.1.4.3: Resultados de parámetros de sintonización Ziegler - Nichols.</i>	150
<i>Tabla 6.1.5.1: Resultados experimentales de sintonización auto-tunning.</i>	150
<i>Tabla 6.1.5.2: Resultados experimentales de parámetros de sintonización obtenidos por observación.</i>	153
<i>Tabla 6.1.6.1: Parámetros tomados en cuenta para el funcionamiento de planta.</i>	153
<i>Tabla 6.1.6.2: Resultados de producto obtenido en pruebas realizadas.</i>	158
<i>Tabla 6.1.6.3: Resultados de consumo de energía eléctrica obtenido en pruebas</i>	159

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar una estrategia de control en el sistema de molienda para procesos mineros, utilizando control adaptativo.

El sistema de molienda tradicional presenta muchas perturbaciones que afectan a la calidad del producto final.

El control adaptativo que se propone, solucionará los problemas de sobrecargas de los molinos, consumo de energía del molino, tener flexibilidad para diferentes procesos de producción (cuando la demanda sea mayor), no tener perturbaciones.

Además se diseñará e implementará un módulo prototipo donde se realizarán varias pruebas para demostrar que el uso de un control avanzado aplicado a los procesos de molienda en las industrias es muy efectivo para mejorar la producción y el ahorro de energía. Además se está integrando los dispositivos de control (PLC's S7 1200, Compact Logic, sensores y actuadores) a través de una red Profibus, Devicenet y Ethernet, de tal manera que se reduce significativamente el cableado de los dispositivos y mejora el intercambio de información entre Controladores, sensores y actuadores.

El proyecto está orientado, a mejorar la producción y reducir los costos de operación, y es por eso que toda la información que exista en este proceso será almacenada y monitoreada por un sistema SCADA y una base de datos KeepServer, estos últimos, serán de gran ayuda para elaborar planes de mantenimientos preventivos.

La tesis está conformada por 6 capítulos: en el Capítulo 1, se realiza el planteamiento metodológico para analizar el problema, identificar las variables dependientes, independientes e indicadores presentes en el proceso de molienda. En los capítulos 2 y 3, desarrollaremos el marco teórico siguiendo la premisa de causa y efecto analizados en el capítulo anterior, lo cual nos permitirá sintetizar y recabar la información en temas que

son los más relevantes para la ejecución del proyecto; además nos servirán como pilares teórica para el sustento de este trabajo. En el Capítulo 4, se desarrollará el diseño del módulo prototipo de molienda como también la evidencia de construcción, aquí se tocarán dos aspectos el diseño mecánico, diseño automatización y el diseño eléctrico. En el capítulo 5 se detallarán los pasos para la implementación eléctrica, configuración y programación de nuestra planta. En el Capítulo 6, finalmente realizaremos el proceso experimental e interpretaremos los resultados obtenidos.



ABSTRACT

This research has the goal to develop a control strategy in the milling system for mining processes, using adaptive control.

The traditional grinding system features many disturbances affecting the quality of the final product.

The proposed adaptive control, solve the problems of overloads mills, mill power consumption, flexibility to different production processes (when demand is greater), no disturbances.

It was also designed and implemented a prototype module where several tests will be performed to demonstrate that the use of advanced control processes applied to milling industries is very effective in improving production and energy savings. Besides being integrated control devices (1200 S7 PLCs, Logic Compact, sensors and actuators) via a Profibus, DeviceNet and Ethernet , which significantly reduces the wiring devices and improved information exchange between controllers , sensors and actuators.

The project aims to improve production and reduce operating costs, and that is why all the information that exists in this process will be stored and monitored by a SCADA and data base KeepServer these past, will be of great help to develop plans for preventive maintenance.

The thesis consists of 6 chapters: Chapter 1, the methodological approach is performed to analyze the problem, identify dependent and independent variables indicators present in the milling process. Chapters 2 and 3, we will develop the theoretical framework following the premise of cause and effect analyzed in the previous chapter, which will allow us to gather and synthesize information on topics that are most relevant to the

project; We will also serve as a theoretical pillars to sustain this work. In Chapter 4, the design of the prototype module grinding as evidence construction will take place, here two aspects will perform the mechanical design, automation and electrical design. In Chapter 5 detailing the steps for electrical implementation, configuration and programming of our plant. In Chapter 6, finally we will process and interpret the experimental results.



INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos extractivos más importantes en nuestro país se halla la minería, siendo uno de los términos más usados el de “mena”, el cual se refiere al material con valor económico que es enviado a la planta de procesamiento. A su vez este término se subdivide en mena de “baja ley” que no es enviado a la planta en primera instancia, pero es almacenado y la mena de “alta ley” que se procesa inmediatamente.

La calidad del mineral es expresada según su concentración del metal de interés. En minas de cobre, esto se expresa en porcentaje de cobre (%Cu) contenido o ‘ley’.

Hoy en día existen varios procedimientos para la obtención de minerales; en especial para el cobre. Los dos más importantes son los siguientes.

- Sulfuros (minerales profundos): Flotación – Concentración.
- Óxidos (minerales en superficie): Lixiviación.

El tratamiento por sulfuros se descompone en las siguientes etapas las cuales se pueden apreciar en la figura 1.1.

- Minado.
- Carguío o acarreo.
- Chancado primario.
- Traslado (generalmente por faja transportadora).
- Apilamiento.
- Molienda.
- Flotación; de aquí el residuo se dispone generalmente en una presa de relaves.
- Transporte por minero-ducto.
- Filtrado.

- Almacenamiento en puerto.
- Embarque final.



Figura 1.1: Tratamiento de cobre por sulfuros.

Fuente: www.antamina.com

Este proyecto se enfocará en la etapa de molienda; específicamente en los molinos de bolas de la molienda terciaria.

La molienda es la última etapa del proceso de conminación, en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión ya sea en seco o como una suspensión en agua pulpa.

La molienda se realiza en molinos que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como "medios de molienda", los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la conminación de las partículas de mena.

En el proceso de molienda partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño a 10 - 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

Por el contrario, una sub-molienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para separación química obteniéndose una recuperación y una razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración y una sobre-molienda innecesaria reduce el tamaño de partícula del constituyente mayoritario (generalmente la ganga) y el tamaño de partícula del componente minoritario (generalmente el mineral valioso) por debajo del tamaño requerido lo cual hace el proceso de separación deficiente y consume mucha energía en el proceso; es importante destacar que la molienda es la operación que mayor cantidad de energía eléctrica requiere.



CAPITULO I. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Hoy en día, fecha en que se redacta este documento, luego de una época de bonanza, se está presentando, en la minería en general, un fenómeno de caída del precio de minerales, en especial del cobre. De ello se puede desprender que la demanda en la producción de cobre también tiene una variación, acorde con las exigencias del mercado.

Como se mencionó anteriormente la obtención del cobre pasa por varios procesos y cada uno debe ser analizado primero por separado y luego en conjunto. Para el desarrollo de este proyecto nos enfocaremos en el último equipo del área de molienda, el molino de bolas conocido por su nombre en inglés Ball Mill. Este elemento, además de ser utilizado en la industria de la minería, también tiene aplicación en la industria de cementos y en la industria farmacéutica ya que de él se obtiene el material procesable con valor económico aceptable.

Al presentarse la variación en la demanda del cobre, el proceso de variación de velocidad en los motores de cada molino de bolas debe ser parametrizado de manera óptima. Hoy en día este proceso es semiautomático, sujeto a un operador el cual vigila desde un panel de control el proceso. Esto, como se supone, le resta capacidad al proceso; el cual no solo debe ser observado desde el punto de vista técnico (ya sea condiciones de trabajo, tiempo de mantenimiento o fallas en componentes de campo), sino desde una instancia superior con poder de decisión que analiza factores tales como la posible tendencia de la demanda en la

producción de mineral, el ahorro en recursos energéticos (en este caso consumo de energía eléctrica), entre otros.

La decisión de usar control adaptativo aplicado a un sistema de molienda ha sido adoptada porque en este proceso puede apreciarse dos factores muy importantes:

- El requerimiento de trabajo de los equipos sea realizado según la demanda de producción de mineral.
- La necesidad de ahorro de energía ya que se trata del proceso que más energía consume en la obtención de concentrado de cobre.

Adicionalmente se debe tomar en cuenta el tema de mantenimiento y parada de estos equipos rotatorios, los cuales deben ser programados y no pueden ser continuos, ya que esto atrofiaría el molino reduciendo así su ciclo de vida y un consumo mayor de energía en cada arranque.

En la figura 1.1.1 observamos un molino de bolas con Tag C-3320-ML-101 el cual trabaja con un ingreso de mineral tipo slurry (las siglas SLC en el tag de la línea de mineral lo sugieren así), este término aplica para cualquier combinación de entre sólido y líquido para este caso hablamos de mineral húmedo. El molino gira gracias a un motor eléctrico; que para nuestra aplicación será controlado por un variador, se tomarán en cuenta también las señales de protección necesarias como lo son la temperatura y las revoluciones por minuto, todos estos parámetros serán vigilados de acuerdo a las especificaciones del fabricante; así mismo se

cuenta con rociadores de agua industrial tanto a la entrada como a la salida del molino (las siglas WR en las líneas a la entrada y salida del molino así lo sugieren).

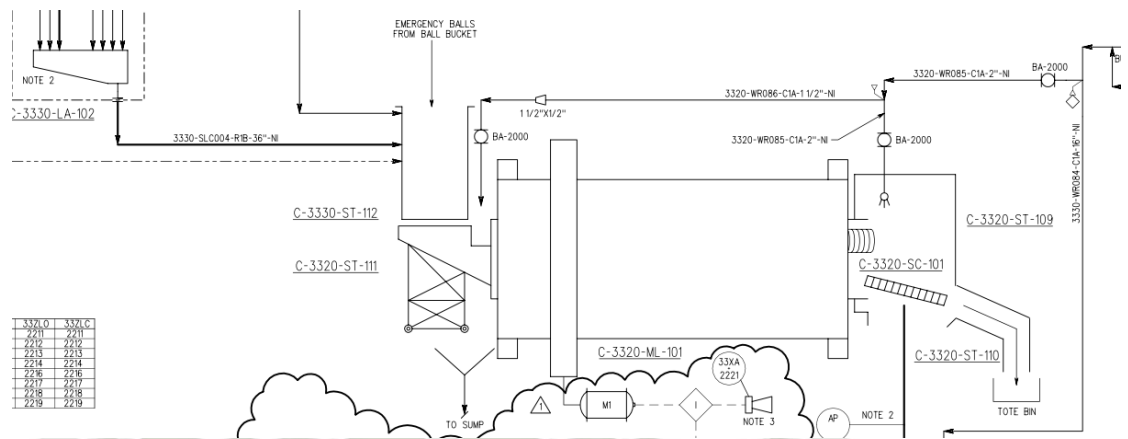


Figura 1.1.1: Diagrama general de proceso de molienda por molinos de bolas

Fuente: Plano P&ID Proyecto CV 1 SMCV

Después de este proceso viene una etapa de separación de producto, normalmente realizada en hidrociclones.

1.2 OBJETIVOS.

- 1.2.1 Objetivo principal.

Obtener un punto de operación óptimo en el proceso de molienda a partir del uso de control adaptativo.

- 1.2.2 Objetivos secundarios.

Diseñar, implementar y sintonizar el sistema de molienda y separación de producto usando un control con SP variable.

Implementar el proceso haciendo uso de buses de campo DEVICENET y PROFIBUS.

1.3 HIPÓTESIS

- 1.3.1. Hipótesis principal.

El control en lazo cerrado de tipo adaptativo ayudará a producir una cantidad de mineral superior a la de un control en lazo cerrado clásico de acuerdo con la demanda del mercado, optimizando el consumo de energía eléctrica.

- 1.3.2. Hipótesis secundaria.

Es viable la combinación de varias marcas y de distintos buses de campo para la integración del proceso dentro de sistema de control descentralizado.

1.4 VARIABLES

- 1.4.1 Variable independiente

Sistema de control para la variación de velocidad de giro de un molino de bolas de acuerdo a la producción requerida.

- 1.4.2. Variable dependiente

Sistema de alimentación de mena mineral hacia un molino de bolas.

Sistema de separación de producto por hidrociclones.

1.5 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

- Área 0370 “Planta de molibdeno”, Las Bambas.

Dentro de las instalaciones de la planta de molibdeno, se halla un molino de la marca ISAMIL, el cual dada la baja cantidad de molibdeno a comparación de cobre que se obtiene de la mena debe presentar un sistema de control racionalizado. La ingeniería y desarrollo del proyecto estuvo a cargo de la empresa BECHTEL OVERSEAS CORPORATION.

- Proyecto “Upgrade Underflow Header Booster Pump” SMCV.

De la bomba principal de este proyecto depende el crecimiento del dique de relaves, como es de suponer el crecimiento de este dique no es constante y depende del nivel del relave que contiene, por lo cual en su automatización se incluye el control adaptativo. La ingeniería y desarrollo del proyecto estuvo a cargo de la empresa GMI S.A.

- Proyecto “New Pipeline From Barges to Tk-007 and Tk-008 and Disable Booster Station N°2”

En la parte posterior del área de relaves se halla un área en donde se almacena por diferencia de densidades el agua industrial que se puede recuperar del relave; de esta área se obtiene el 15 del agua industrial recuperada de la planta concentradora; el bombeo se realiza de manera controlada, ya que el recorrido de las tuberías cuesta arriba es de longitud considerable y el nivel de agua a bombear no siempre es el máximo; por ello también dentro de su

automatización se considera en control adaptativo. La ingeniería y desarrollo del proyecto estuvo a cargo de la empresa GMI S.A.

- Tesis: “Sistema SCADA en Intouch para la Supervisión y Control de Procesos, con la Integración de Dispositivos de Control en una Red de Comunicación Industrial, Mediante el Interfaz OPC Server”, Autor: Ortega Cervantes, Hugo Rolando, año 2011.

Conclusiones:

- Es posible la integración de equipos de distintos fabricantes en un mismo proceso.
- El protocolo ethernet es por excelencia usado a nivel administrativo dentro de las topologías de red.



CAPITULO II. BASES TEÓRICAS (CONTROL E INSTRUMENTACIÓN)

2.1 CONTROL ADAPTATIVO.

El término adaptativo significa cambiar el comportamiento conforme a nuevas circunstancias. Un regulador adaptativo es un regulador que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a las perturbaciones.

Según el libro “Control Adaptativo y Robusto” – Francisco Rodríguez Rubio y Manuel Jesús López Sánchez – Universidad de Seville 1996, existen muchas definiciones de control adaptativo, siendo unas de las más aceptadas, que control adaptativo es un tipo especial de control no lineal en el que el estado del proceso puede ser separado en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferente velocidad. La escala lenta corresponde a los cambios de los parámetros y por consiguiente a la velocidad con la cual los parámetros del regulador son modificados, y la escala rápida que corresponde a la dinámica del bucle ordinario de realimentación.

El esquema básico de control adaptativo puede observarse en la figura 2.1.1, esta compuesto por un bucle principal de realimentación negativa, en el que actúa al igual que en los sistemas convencionales un regulador y de otro bucle en el que se mide un cierto nivel de funcionamiento, el cual es comparado con el índice deseado y se procesa el error en un mecanismo de adaptación que ajusta los parámetros del regulador y en algunos casos actúa directamente sobre la señal de control. También puede existir un tercer bucle dedicado a supervisar la marcha de los dos bucles anteriores, en orden a asegurar la estabilidad del sistema y mejorar la actuación en conjunto.

El mecanismo de adaptación presenta una solución en tiempo real al problema de diseño para sistemas con parámetros conocidos, aunque como veremos más adelante, puede ir a tiempo de muestreo superior al correspondiente al regulador e identificador.

La característica fundamental que distingue a los sistemas adaptativos es la presencia de un bucle de control en el que se compara un índice de funcionamiento.

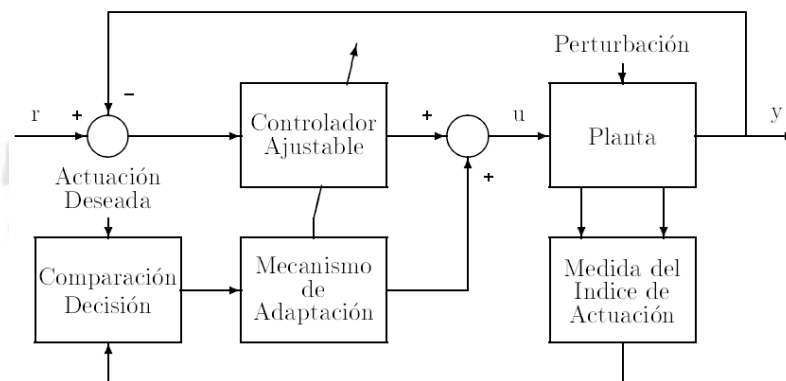


Figura 2.1.1: Esquema general de un control adaptativo

Fuente: "Control Adaptativo y Robusto" – Francisco Rodríguez Rubio y Manuel Jesús López Sánchez – Universidad de Sevilla 1996

Existen muchos tipos de controladores que proporcionan buenas características de regulación en presencia de cambios de los parámetros del sistema y que según la definición anterior no son realmente adaptativos, puesto que la adaptación se realiza en un bucle abierto.

Un ejemplo muy utilizado de control adaptativo en bucle abierto es el denominado cambio por tabla. Consiste en la modificación de los parámetros del controlador a partir de una tabla que ha sido calculada previamente para distintos puntos de funcionamiento, en

función de una variable auxiliar. Un caso típico es el control de vuelo de un avión, cuyo regulador puede ser cambiado en función de la altura de éste.

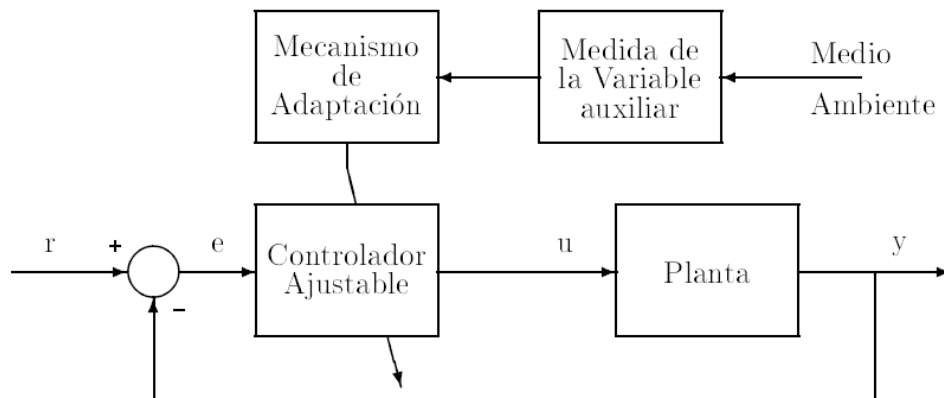


Figura 2.1.2: Sistema de control adaptativo de bucle abierto

Fuente: "Control Adaptativo y Robusto" – Francisco Rodríguez Rubio y Manuel Jesús López Sánchez – Universidad de Sevilla 1996

En la figura 2.1.2 se presenta esquemáticamente este tipo de controladores. Se supone que existe una fuerte relación entre la variable auxiliar y la dinámica de los parámetros del sistema. Este tipo de adaptación tiene la ventaja de que el controlador puede ser cambiado muy rápidamente, dependiendo de la rapidez con la que la variable auxiliar refleje el cambio de la dinámica del proceso, siendo muy importante la elección de dicha variable. Sin embargo, estos reguladores consumen mucho tiempo en la realización de la tabla de parámetros, presentando así algunos problemas en la conmutación de unos parámetros a otros.

Según sean diseñados los bloques descritos anteriormente, podemos tener uno u otro tipo de control adaptativo, pudiéndose dividir principalmente en dos grupos:

- Controladores adaptativos con modelo de referencia (MRAC).

- Reguladores autoajustables (STR).

Según el libro “Control Adaptativo y Robusto” – Francisco Rodríguez Rubio y Manuel Jesús López Sánchez – Universidad de Seville 1996, MRAC y STR pueden ser considerados como una aproximación a la solución del problema de control adaptativo. La hipótesis que justifica la aproximación es que, para cualquier juego de valores posibles de los parámetros de la planta y las perturbaciones, existe un controlador lineal con la complejidad fijada, tal que el conjunto de controlador y planta tienen características pre-especificadas.

- Los controladores adaptativos con modelo de referencia, intentan alcanzar para una señal de entrada definida, un comportamiento en bucle cerrado dado por un modelo de referencia.
- Los reguladores adaptativos autoajustables, tratan de alcanzar un control óptimo, sujeto a un tipo de controlador y a obtener información del proceso.

Estas dos técnicas han sido desarrolladas separadamente durante varios años, pudiéndose demostrar su equivalencia en muchos casos. Las ventajas de MRAC están en su rápida adaptación para una entrada definida y en la simplicidad de tratamiento de la estabilidad utilizando la teoría de estabilidad de sistemas no lineales, sin embargo, no se adapta convenientemente si la señal de entrada al sistema tiene poca riqueza. El STR tiene la ventaja de que se adapta para cualquier caso y en particular para perturbaciones no medibles, teniendo al mismo tiempo una estructura modular, lo que hace posible la programación por bloques, siendo fácil de realizar en distintos reguladores.

- 2.1.1. Controladores adaptativos con modelo de referencia (MRAC).

Los sistemas adaptativos con modelo de referencia fueron diseñados primeramente para sistemas continuos por minimización de un índice de actuación, siendo dicho índice la integral del error al cuadrado (Hang 1973). Esta regla de diseño fue propuesta por Whitaker del MIT (1958), denominándose por ello como la regla del MIT.

En cuanto a las configuraciones posibles con modelo de referencia, la más usual es utilizar un modelo en paralelo figura 2.1.1.1, aunque son posibles otras configuraciones, como modelo serie, serie-paralelo, etc.

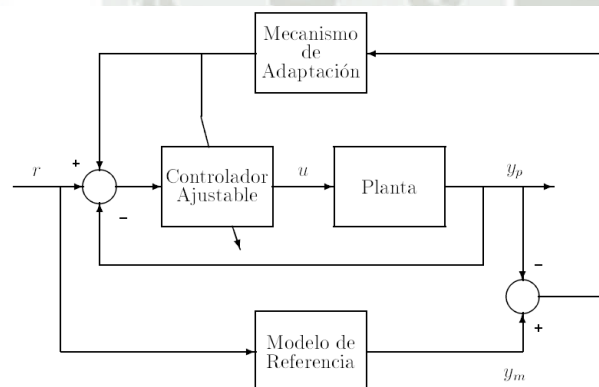


Figura 2.1.1.1: Modelo de sistema MRAC

Fuente: bining.us.es

2.2. ¿POR QUÉ UTILIZAR CONTROL ADAPTATIVO?

Dado que un controlador adaptativo es un sistema no lineal en el que es necesario ajustar una serie de parámetros, es importante explorar bajo qué circunstancias es insuficiente utilizar un controlador fijo y será necesario un control adaptativo.

Un controlador convencional está pensado para resolver problemas (la mayor parte de veces lineales), cuyos parámetros permaneces constantes. Esto es una buena aproximación en la mayor parte de los casos, cuando se pretende regular un sistema en un punto fijo de operación. Cuando existen perturbaciones, si éstas son pequeñas, dicha aproximación continúa siendo suficiente para obtener un buen control. Sin embargo, la aproximación en torno a un punto de funcionamiento no suele seguir siendo buena. Si el punto de funcionamiento cambia.

Se verá en nuestra aplicación, cuando es suficiente un regulador fijo o cuando es necesario el control adaptativo. En general no es inmediato decidir el tipo de control que se necesitará. Es necesario estudiar cada caso en particular antes de decidirse por el tipo de control a aplicar.

2.3. EL PROBLEMA DEL CONTROL ADAPTATIVO.

Los ejemplos de la sección anterior muestran porqué es necesario utilizar el control adaptativo. Ellos ponen de manifiesto que los procesos industriales son bastante complejos y la variación de los parámetros no puede determinarse desde un primer momento. Por lo tanto, puede ser ventajoso emplear esfuerzo en desarrollar controladores más inteligentes. Un controlador más complejo puede utilizarse para diferentes procesos y por lo tanto el mayor costo del desarrollo puede compartirse entre las diversas aplicaciones. Sin embargo, es muy importante recordar que la utilización de un controlador adaptativo no sustituye el buen conocimiento del proceso que es necesario para elegir las especificaciones, la estructura del controlador y el método de diseño.

Como se ha visto en los párrafos precedentes, un controlador adaptativo debe contener:

- Una ley de control con parámetros ajustables.
- Caracterización de la respuesta del sistema en bucle cerrado (modelo de referencia o especificaciones para el diseño).
- Procedimiento de diseño.
- Actualización de parámetros basados en las medidas.
- Realización de la ley de control.

Estas partes son un poco diferentes para los distintos esquemas de control adaptativo, pero tienen muchos factores comunes.

Existe hoy en día una separación entre la teoría y la práctica en control adaptativo. En teoría es posible manejar situaciones idealizadas. En la práctica se utilizan algoritmos bastante complejos, que introducen reglas concretas para manejar las posibles dificultades encontradas durante el análisis o con la experiencia de la aplicación.

El hecho de que haya variaciones significativas en la respuesta de bucle abierto no significa necesariamente que sea necesario un controlador adaptativo.

- 2.4. AUTOAJUSTE Y AJUSTE POR TABLA DE CONTROLADORES.

Los esquemas de control adaptativo como STR necesitan de información a priori acerca de la dinámica del proceso. Es importante conocer las escalas de tiempo, las cuales son

críticas para determinar los intervalos de muestreo y filtros. La importancia de la información a priori también apareció en conexión con los intentos de desarrollar técnicas para ajuste automático de reguladores PID. Tales reguladores son usados para sistemas de control con un amplio rango de constantes de tiempo.

Desde el punto de vista del usuario sería ideal disponer de una función mediante la cual el regulador pudiera ser ejecutado. Aunque los esquemas adaptativos convencionales parecen ser herramientas ideales para el ajuste automático, resultaron inadecuadas porque requerían conocimiento previo de las escalas de tiempo.

Los reguladores simples como PID, con dos o más parámetros pueden ser ajustados manualmente si no hay demasiada interacción entre los diferentes parámetros, pero el ajuste manual no es posible para reguladores más complejos.

Tradicionalmente, el ajuste de tales reguladores ha tomado la vía de la modelización o identificación y diseño del regulador. Esto requiere un consumo de tiempo elevado, además de ser un procedimiento costoso, que solo puede ser aplicado a sistemas críticos en tamaño o en importancia o a sistemas que van a ser manufacturados en iguales cantidades.

Como se comentó en párrafos anteriores otra alternativa a los sistemas de control adaptativo son los controladores ajustables por tabla (tipo MRAC). En muchas situaciones se sabe como cambia la dinámica de un proceso con las condiciones de operación del mismo. Una fuente de cambio en la dinámica pueden ser las no linealidades

que se presentan, es entonces posible cambiar los parámetros del controlador observando las condiciones de operación del proceso.

Esta idea recibe el nombre de ajuste por tabla (en terminología inglesa, gain scheduling) y consiste en una realimentación no lineal que cambia los parámetros en función de las condiciones de operación de una manera previamente programada.

La idea de relacionar los parámetros del controlador a variables auxiliares no es reciente, pero el hardware necesario para implementarlo fácilmente no ha estado disponible hasta hace poco tiempo. El ajuste por tabla es muy costoso, sobre todo llevarlo de una manera analógica, sin embargo es más accesible de implementar en sistemas controlados por computadoras con un software adecuado.

Esta técnica es muy buena para compensar las variaciones de los parámetros del proceso o de no linealidades conocidas. Es un método muy adecuado para manejar variaciones de parámetros en sistemas de control de vuelo.

A continuación se van a comentar algunas de las técnicas de ajuste de controladores que puede utilizarse para obtener aproximaciones de los procesos dinámicos. Los métodos pueden utilizarse para ajuste automático de reguladores del tipo PID o como preajuste de algoritmos de control adaptativos más sofisticados. Así mismo se comentará la técnica de ajuste por tabla y se observarán algunos ejemplos.

- 2.5. CONTROL PID.

Muchos problemas de control pueden ser manejados muy bien mediante controladores PID. Este algoritmo es muy conocido y es un estándar para el control de procesos. La versión académica del algoritmo es:

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

Fórmula 2.5.1

Donde “ u ” es una variable de control, “ e ” el error definido como $e = r - y$. Donde r es el valor de referencia, e “ y ” la salida del proceso. Los algoritmos utilizados actualmente contienen varias modificaciones. Es práctica estándar dejar que la acción derivada solo opere sobre variables de salida. Puede ser ventajoso dejar la parte proporcional actuar solo una fracción del valor de referencia. La acción derivada es sustituida por una aproximación que reduce la ganancia en alta frecuencia. La acción integral también se modifica para que no mantenga la integración cuando la variable de control se sature. Se toman precauciones para que no se produzcan transitorios cuando el regulador se conmute de un control manual a un control automático o cuando los parámetros se cambian. Una versión razonable del regulador PID puede ser descrita por:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t)$$

Fórmula 2.5.2

Donde

$$P(t) = K_c(u_c(t) - by(t))$$

Fórmula 2.5.3

Reemplazando 2.5.3 y 2.5.1 en 2.5.2

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \frac{K_c}{T_i}(u_c(t) - y(t)) + \frac{1}{T_t}(v(t) - u(t)) \\ \frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} + D &= -K_c T_d \frac{dy}{dt} \end{aligned}$$

Fórmula 2.5.4

El último término de la expresión dI/dt se introduce para mantener la integral limitada cuando la variable de salida se satura. La variable v es una señal de seguimiento, la cual es igual a la salida saturada del actuador, y el parámetro T_t es una constante de tiempo para la acción de seguimiento. Los parámetros esenciales para ser ajustados son K_c , T_d y T_i . El parámetro N puede ser fijo; un valor típico es $N = 10$. La constante de tiempo de seguimiento es típicamente una fracción del tiempo de integración.

- 2.6. MÉTODOS DE RESPUESTA TRANSITORIA.

Varios métodos sencillos de ajuste para controladores PID están basados en experimentos de respuesta transitoria. Muchos procesos industriales tienen una respuesta ante entrada en escalón del tipo mostrado en la figura 2.6.1. En la cual la respuesta escalón es monótona después de un tiempo inicial.

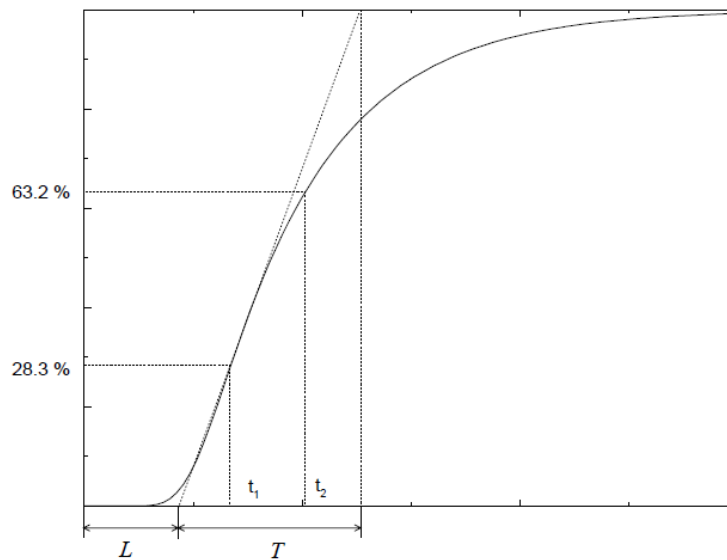


Figura 2.6.1: Respuesta de un proceso (planta) a una señal escalón

Fuente: prof.usb.ve

Un sistema con una respuesta escalón de este tipo puede ser aproximado por la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{k}{1 + Ts} e^{-sL}$$

Fórmula 2.6.1

Donde k es la ganancia estática, L el tiempo aparente de retraso, T es la constante de tiempo aparente y a es el punto de corte de la tangente con el eje de ordenadas. Hay que hacer notar que la distancia desde el origen al corte de la prolongación de la recta tangente a la curva (a) cumple la relación.

$$a = k \frac{L}{T}$$

Fórmula 2.6.2

2.6.1 Método de respuesta en escalón de Ziegler – Nichols

Una manera simple de determinar los parámetros de un regulador PID basada en los datos de respuesta en escalón fue desarrollada por Ziegler y Nichols y publicada en 1942. El método usa sólo dos de los parámetros reseñados anteriormente, a y L .

Los parámetros del regulador se dan en la siguiente tabla.

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	1/a		
PI	0.9a	3L	
PID	1.2/a	2L	L/2

Tabla: 2.6.1.1: Parámetros establecidos por Ziegler y Nichols

Fuente: www.instrumentacionycontrol.net

La regla de Ziegler-Nichols fue desarrollada a partir de simulaciones empíricas de muchos sistemas diferentes. La regla tiene el inconveniente de que se obtienen sistemas en bucle cerrado que están pobremente amortiguados. Sistemas con mejor amortiguamiento pueden obtenerse por modificación de los valores numéricos de la tabla.

Mediante el uso de parámetros adicionales es posible determinar si la regla de Ziegler-Nichols es aplicable. Si la constante de tiempo T está determinada, una regla empírica es establecer que la regla de Ziegler-Nichols es aplicable si $0.1 < L/T < 1$.

Para valores grandes de L/T es ventajoso usar leyes de control que compensan el tiempo muerto. Para valores pequeños de L/T , puede obtenerse un procedimiento mejorado con compensadores de alto-orden. Es también posible usar reglas de ajuste más sofisticadas basadas en los tres parámetros.

2.6.2. Caracterización de la respuesta en escalón

Los parámetros K , L y T pueden ser determinados a partir de una construcción gráfica tal como la indicada en la tabla 2.6.1.1. Tal método es difícil de automatizar. El parámetro k puede ser obtenido de la relación de cambios estáticos de entrada y salida en régimen permanente. Hay un método simple basado en mediciones de área para determinar L y T (figura 2.6.2.1). Determinando el área A_0 y A_1 se tiene:

$$T + L = \frac{A_0}{k}$$
$$y$$
$$T = \frac{eA_1}{k}$$

Donde e es la base del logaritmo natural. Los inconvenientes esenciales al método son que puede ser difícil conocer el tamaño del escalón en la señal de control y

determinar si se ha alcanzado el régimen permanente. El escalón debería ser del tamaño suficiente como para que la respuesta del sistema sufra variaciones, y no demasiado grande como para provocar perturbaciones.

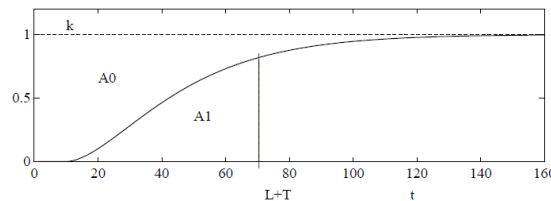


Figura 2.6.2.1: Método del área para la determinación de L y T

Fuente: “Control Adaptativo y Robusto” – Francisco Rodríguez Rubio y Manuel Jesús López Sánchez – Universidad de Seville 1996

Refinamiento de línea

Si se obtiene un ajuste razonable del regulador, el amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema en bucle cerrado pueden determinarse a partir de la respuesta transitoria en bucle cerrado, pudiéndose mejorar el ajuste del regulador.

2.7 REDES INDUSTRIALES

Hasta el siglo XX, el desarrollo tecnológico había venido de la mano de la revolución industrial en la que los sistemas mecánicos eran piezas clave para la industria y el desarrollo de los procesos industriales. Pero es en el siglo XX cuando los sistemas de automatización surgen con más fuerza, potenciados por los sistemas eléctricos basados en relés electromagnéticos en la primera mitad del siglo, y de los sistemas electrónicos de estado sólido en su segunda mitad. Así, además de sus objetivos iniciales, el concepto de

automatización se extiende a la mejora de producción y calidad, disminución de riesgos laborales, disminución de costes, etc. La aparición de los autómatas programables marcó un cambio en la industria de ensamblaje y líneas de producción. El concepto de línea de producción automatizada apareció entonces como un hecho real. Este pequeño dispositivo permitió que los procesos industriales fuesen desde entonces más eficientes, precisos, y lo que es más importante, reprogramables, eliminando el gran costo que se producía al reemplazar el complejo sistema de control basado en relés y contactores, tanto por tamaño como por vida útil.

Las comunicaciones entre estos dispositivos deben poseer unas características particulares para responder a las necesidades de intercomunicación en tiempo real. Además, deben resistir un ambiente hostil donde existe gran cantidad de ruido electromagnético y condiciones ambientales duras. En el uso de comunicaciones industriales se pueden separar dos áreas principales: una comunicación a nivel de campo, y una comunicación hacia el SCADA. En ambos casos la transmisión de datos se realiza en tiempo real o, por lo menos, con una demora que no es significativa respecto de los tiempos del proceso, pudiendo ser crítico para el nivel de campo. Según el entorno donde van a ser instaladas, dentro de un ámbito industrial, existen varios tipos de redes, dentro de los cuales se hallan los buses de campo.

Un bus de campo es, en líneas generales, “un sistema de dispositivos de campo (sensores y actuadores) y dispositivos de control, que comparten un bus digital serie bidireccional para transmitir informaciones entre ellos, sustituyendo a la convencional transmisión analógica punto a punto”. Permiten sustituir el cableado entre sensores- actuadores y los correspondientes elementos de control. Este tipo de buses debe ser de bajo coste, de

tiempos de respuesta mínimos, permitir la transmisión serie sobre un bus digital de datos con capacidad de interconectar controladores con todo tipo de dispositivos de entrada-salida, sencillos, y permitir controladores esclavos inteligentes.

Las señales de procesos industriales, originadas a pie de máquina, se transmiten normalmente con un extenso cableado punto a punto, incluso haciendo uso de transmisores “inteligentes”. Esto significa que cada sensor o actuador situado en campo se encuentra conectado a los módulos de entrada/salida de los PLCs, utilizando un par de hilos por instrumento. Cuando la distancia entre el instrumento y sistema de control comienza a ser considerable o cuando existen en el proceso un gran número de instrumentos, debemos tener en cuenta los costos de cableado, sobre todo cuando se establece la necesidad de un número extenso de conductores de reserva, de cara a futuras ampliaciones. Por estas razones, en la actualidad se está implantando definitivamente la filosofía de bus de campo. Con este sistema es posible la sustitución de grandes haces de conductores por un simple cable bifilar o fibra óptica, común para todos los sensores y actuadores, con el consiguiente ahorro económico que ello supone. La comunicación de la variable de proceso será totalmente digital.

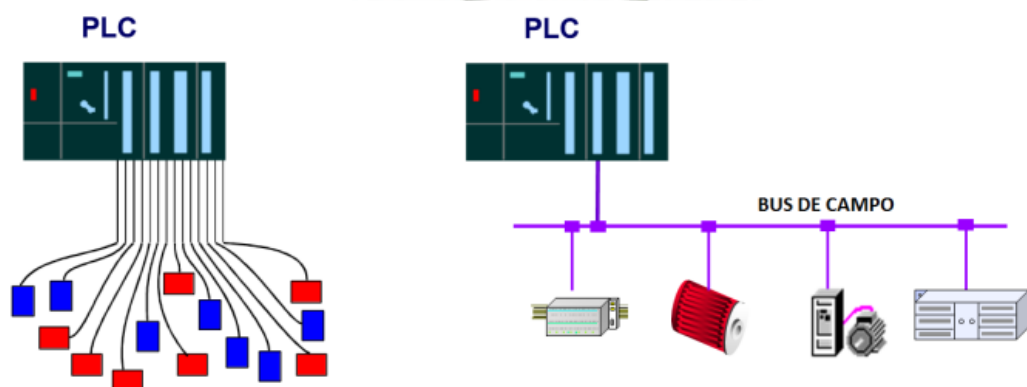


Figura 2.7.1: Topología y cableado convencional – bus de campo

Fuente: www.infopl.net

Inicialmente, los buses de campo están muy poco normalizados, por lo que existe una gran variedad de ellos con diferentes características dependiendo de a qué aplicaciones estén destinados. Lo cierto es que actualmente cabe afirmar que los buses de campo están llegando a un período de madurez, planteándose la convivencia de un número reducido de estándares con posibles soluciones de comunicación entre ellos.

A continuación, una imagen comparativa entre los distintos tipos de buses de campo comerciales:

Comparación de características entre algunos buses y protocolos						
Nombre	Topología	Soporte	Máx dispositivos	Rate Transm. bps	Distancia máx Km	Comunicación
Profibus DP	línea, estrella y anillo	par trenzado fibra óptica	127/segm	Hasta 1.5M y 12M	0.1 segm 24 fibra	Master/Slave peer to peer
Profibus PA	línea, estrella y anillo	par trenzado fibra óptica	14400/segm	31.5K	0.1 segm 24 fibra	Master/Slave peer to peer
Profibus FMS		par trenzado fibra óptica	127/segm	500K		Master/Slave peer to peer
Foundation Fieldbus HSE	estrella	par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	100M	0.1 par 2 fibra	Single/multi master
Foundation Fieldbus H1	estrella o bus	par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	31.25K	1.9 cable	Single/multi master
LonWorks	bus, anillo, lazo, estrella	par trenzado fibra óptica coaxial, radio	32768/dom	500K	2	Master/Slave peer to peer
Interbus-S	segmentado	par trenzado fibra óptica	256 nodos	500K	400/segm 12.8 total	Master/Slave
DeviceNet	trunca/puntual c/bifurcación	par trenzado fibra óptica	2048 nodos	500K	0.5 6 c/repetid	Master/Slave, multi-master, peer to peer
AS-i	bus, anillo, árbol, estrella	par trenzado	31 p/red	167 K	0.1, 0.3 c/rep	Master/Slave
Modbus RTU	línea, estrella, árbol, red con segmentos	par trenzado coaxial radio	250 p/segm	1.2 a 115.2K	0.35	Master/Slave
Ethernet industrial	bus, estrella, mala-cadena	coaxial par trenzado fibra óptica	400 p/segm	10, 100M	0.1 100 mono c/switch	Master/Slave peer to peer
HART		par trenzado	15 p/segm	1.2K		Master/Slave

Figura 2.7.2: Comparativa entre buses y protocolos de campo comerciales

Fuente: www.microbyte.cl

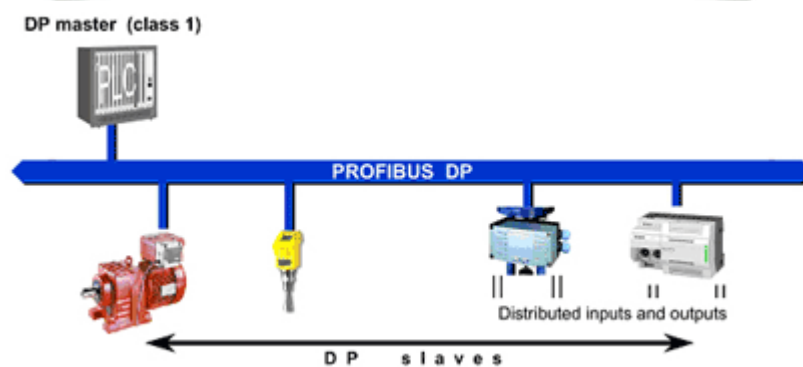
Dentro de nuestro proyecto incluiremos las siguientes redes industriales de campo:

- Profibus DP.
- DEVICENET

2.7.1 Profibus DP

PROFIBUS es un estándar de comunicaciones para buses de campo. Deriva de las palabras PROcess Field BUS.

La versión más utilizada es PROFIBUS DP (Periferia Distribuida; Decentralized Peripherals), y fue desarrollada en 1993.



*Figura 2.7.1.1: Diagrama lógico de una red PROFIBUS convencional
Fuente: automatizacion.bligoo.com*

PROFIBUS DP tiene, conforme al estándar, cinco diferentes tecnologías de transmisión, que son identificadas como:

- RS-485.
- MBP.
- RS-485 IS.
- MBP IS.
- Fibra óptica.

RS-485 utiliza un par de cobre trenzado apantallado, y permite velocidades entre 9.6 kbps y 12 Mbps. Hasta 32 estaciones, o más si se utilizan repetidores.

MBP (Manchester Coding y Bus Powered) es transmisión sincrónica con una velocidad fija de 31.25 Kbps.

Las versiones *IS* son intrínsecamente seguras, utilizadas en zonas clasificadas.

Fibra óptica incluye versiones de fibra de vidrio multimodo y monomodo, fibra plástica y fibra HCS.

PROFIBUS DP está actualmente disponible en tres versiones:

- DP-V0. Provee las funcionalidades básicas incluyendo transferencia cíclica de datos, diagnóstico de estaciones, módulos y canales, y soporte de interrupciones.
- DP-V1. Agrega comunicación acíclica de datos, orientada a transferencia de parámetros, operación y visualización.
- DP-V2. Permite comunicaciones entre esclavos. Está orientada a tecnología de drives, permitiendo alta velocidad para sincronización entre ejes en aplicaciones complejas.

Desde el punto de vista del control de las comunicaciones, el protocolo PROFIBUS es maestro esclavo, pero permite:

- Aplicaciones mono maestro. Un sólo maestro está activo en el bus, usualmente un PLC. Los demás dispositivos son esclavos. Este esquema es el que permite los ciclos de lectura más cortos.
- Aplicaciones multi maestro. Permite más de un maestro. Pueden ser aplicaciones de sistemas independientes, en que cada maestro tenga sus

propios esclavos. U otro tipo de configuraciones con dispositivos de diagnóstico y otros.

2.7.2 Devicenet

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.

La red DeviceNet está clasificada en el nivel de red llamada devicebus, 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 2.7.2.1).

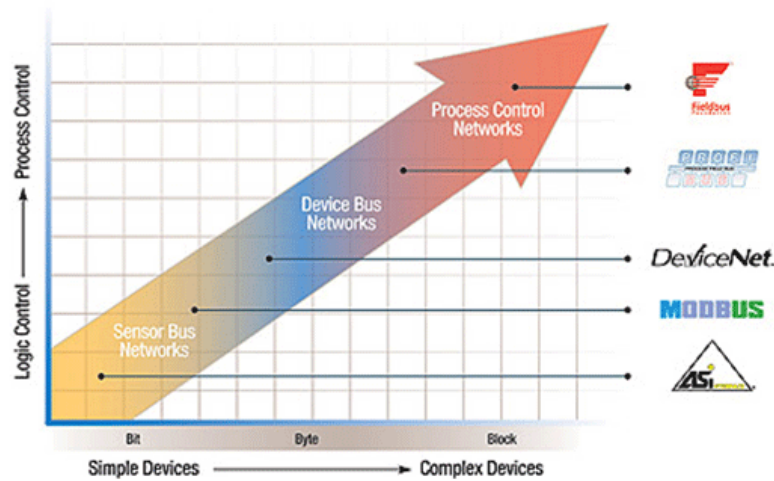


Figura 2.7.2.1: Clasificación de redes industriales por nivel
Fuente: www.smar.com

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.
- 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.

El CAN fue originalmente desarrollado por la BOSCH para el mercado de automóviles europeos para sustituir el cableado costoso por un cable en red de bajo costo en automóviles. Como resultado, el CAN tiene respuesta rápida y confiabilidad alta para aplicaciones principalmente en las áreas automovilística.

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 2.7.2.2.

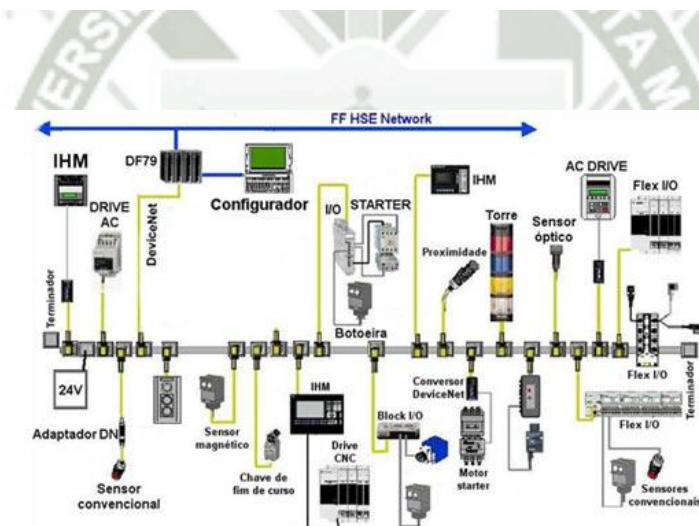


Figura 2.7.2.2: Ejemplo de una red DEVICENET convencional
Fuente: www.smar.com

Dentro de sus características principales destacamos las siguientes:

- Topología basada en bus principal con ramificaciones. El bus principal debe ser hecho con el cable DeviceNet grueso, y las ramificaciones con el cable DeviceNet delgado o plano. Cables similares podrán usarse siempre y

cuando sus características eléctricas y mecánicas sean compatibles con las especificaciones de los cables estándar DeviceNet.

- Permite o uso de repetidores, bridges, ruteadores y gateways.
- Soporta hasta 64 nodos, incluyendo el maestro, direccionados de 0 a 63 (MAC ID).
- Cable de 2 pares: uno para alimentación de 24V y otro para comunicación.
- Capacidad de insertar y cambiar en caliente, sin interrumpir a la red.
- Compatible con equipos alimentados por la red de 24V o como que tengan su propia fuente.
- Uso de conectores abiertos o cerrados.
- Protección contra conexión inversa y corto-circuito.
- Alta capacidad de corriente en la red (hasta 16 A).
- Usa la misma energía de la fuente de alimentación.
- 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.

Para el diseño físico de una red DEVICENET se debe tomar en cuenta lo siguiente:

VELOCIDAD DE DATOS	125 Kbps	250 Kbps	500 Kbps
Longitud del Bus principal con cable grueso ("thick-trunk")	500 m	250 m	100 m
Longitud del Bus principal con cable delgado ("thin-trunk")	100 m	100 m	100 m
Longitud máxima para 1 derivación del bus principal ("maximum-drop")	6 m	6 m	6 m
Longitud de las derivaciones agregadas al bus principal ("cumulative-drop")	156 m	78 m	39 m

*Tabla 2.7.2.1. Criterios de diseño físico de una red DEVICENET.
Fuente: www.smar.com*

2.8 INDICADORES

Los indicadores considerados en este proyecto son los siguientes:

- Tensión con carga en motor principal del molino.
- Intensidad de corriente con carga en motor principal de molino.
- Revoluciones por minuto de molino de bolas.
- Potencia.
- Tensión y corriente en motor de bomba de sistema de hidrociclones.
- Estatus de entradas y salidas digitales de proceso.



CAPITULO III. BASES TEÓRICAS (MECÁNICO)

3.1. MOLIENDA

3.1.1. Concepto

La molienda es la última etapa del proceso de conminución, en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión, ya sea en seco o como una suspensión en agua, también llamado pulpa. La molienda se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como “medios de molienda”, los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la conminución de las partículas de la mena.

En el proceso de molienda partículas de 5 a 250 mm son reducidas de tamaño a 10 – 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

El propósito de la operación de molienda es ejercer el control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón frecuentemente se dice que la molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

Por supuesto, una sub.molienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para la separación económica obteniéndose una recuperación y una razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración.

Sobre-molienda innecesaria reduce el tamaño de la partícula del constituyente mayoritario, generalmente la ganga y puede reducir el tamaño de la partícula del

componente minoritario, generalmente del mineral valioso, bajo el tamaño requerido para la separación mas eficiente. Además se pierde mucha energía, que es cara en el proceso. Es importante destacar que la molienda es la operación mas intensiva en energía del procesamiento de mineral.

3.1.2 Movimiento de la carga de molinos.

Una característica distintiva de los molinos rotatorios es el uso de cuerpos de molienda que son grandes y pesados con relación a las partículas de mena pero pequeñas con relación al volumen del molino.

Cuando el molino gira, los medios de molienda son elevados en el lado ascendente del molino hasta que se logra una situación de equilibrio dinámico donde los cuerpos de molienda caen en cascada y en catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos, alrededor de una zona muerta donde ocurre poco movimiento hasta el “pie” de las carga del molino, como se ilustra en la figura 3.1.2.1. Se pueden distinguir tres tipos de movimiento de los medios de molienda en un molino rotatorio:



Figura 3.1.2.1: Movimiento de medios de molienda
Fuente: www.monografias.com

- Rotación alrededor de su propio eje.

- Caída en cascada, donde los medios bajan rodando por la superficie de los otros cuerpos.
- Caída en catarata que corresponde a la caída libre de los medios de molienda sobre el “pie” de la carga.

La magnitud del elevamiento que sufren los medios de molienda depende de la velocidad de rotación del molino y del tipo de revestimiento del molino. A velocidades relativamente bajas o con revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino y la conminución que ocurre es principalmente abrasiva.

Esta caída en cascada produce molienda más fina, con gran producción de polvo y aumento del desgaste del revestimiento. A velocidades mayores los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de aterrizar en el “pie” de la carga. Esta caída en catarata produce conminución por impacto y un producto más grueso con menos desgaste de revestimiento.

La velocidad crítica del molino, es la velocidad mínima a la cual la capa exterior de medios de molienda se adhiere a la superficie interior del cilindro debido a la fuerza centrífuga. A esta velocidad, la fuerza centrífuga es justo balanceada por el peso de los medios de molienda. Normalmente el rango de trabajo es entre 70 y 80% de la velocidad crítica.

Estructuralmente, cada tipo de molino consiste de un casco cilíndrico, con revestimientos renovables y una carga de medios de molienda. El tambor es soportado en muñones huecos fijos a las paredes laterales de modo que puede girar en torno a su eje. El diámetro del molino, determina la presión que puede ejercer el medio en las partículas de mena y, en general mientras mayor es el tamaño de la alimentación mayor necesita ser el diámetro del molino. La longitud del molino, junto con su diámetro determinan el volumen y por consiguiente la capacidad del molino.

La mena normalmente alimenta continuamente a través del muñón de un extremo y el producto sale por el muñón del extremo opuesto.

3.1.3 Partes principales de un molino

- **Casco:** El casco del molino está diseñado para soportar impactos y carga pesada, y está construido de placas de acero forjadas y soldadas. Tiene perforaciones para sacar los pernos que sostienen el revestimiento o forros. Para conectar las cabezas de los muñones tiene grandes bridas de acero generalmente soldados a los extremos de las placas del casco, los cuales tienen perforaciones para apernarse a la cabeza.
- **Extremos:** Los extremos del molino, o cabezas de los muñones pueden ser de fierro fundido gris o modulas para diámetros menores a 1m. Cabezas mas grandes se construyen de acero fundido, el cual es relativamente liviano y puede soldarse. Las cabezas son nervadas para reforzarlas.

- **Revestimientos:** Las caras de trabajo internas del molino consisten de revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga.

3.1.4 Factores que afectan la eficiencia de la molienda.

Varios factores afectan la eficiencia del molino de bolas. La densidad de la pulpa de alimentación debería ser lo más alta posible, pero garantizando un flujo fácil a través del molino. Es esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mena; una pulpa demasiado diluída aumenta el contacto metal-metal, aumentando el consumo de acero y disminuyendo la eficiencia. El rango de operación normal de los molinos de bolas es entre 65 a 80 % de sólidos en peso, dependiendo de la mena. La viscosidad de la pulpa aumenta con la fineza de las partículas, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar densidad de pulpa menor.

La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. Luego las bolas deberían ser lo más pequeñas posibles y la carga debería ser distribuida de modo tal que las bolas más grandes sean justo lo suficientemente pesadas para moler la partícula más grande y más dura de la alimentación. Una carga balanceada consistirá de un amplio rango de tamaños de bolas y las bolas nuevas agregadas al molino generalmente son del tamaño más grande requerido. Las bolas muy pequeñas dejan el molino junto con la mena molida y pueden separarse haciendo pasar la descarga por harneros.

3.1.5 Volumen de llenado de molino.

El volumen o nivel de la carga de bolas está relacionado con la dureza del mineral y tonelaje de alimentación que puede tratar el molino para un mismo grade de molienda. Por ejemplo, un aumento del tonelaje a tratar involucra un menor tiempo de residencia, lo que se compensa con mayor carga de bolas, a fin de aumentar la probabilidad de contacto entre bolas y mineral. Lo mismo sucede frente a un mineral que presenta mayor dureza.

La carga de bolas se expresa usualmente como un porcentaje del volumen del molino que es ocupado por las bolas. El cálculo de la fracción o nivel de llenado para un molino en forma cilíndrica puede hacerse una vez que se conoce la altura desde la superficie de la carga hasta el tope del molino. Denominamos “ h ” a esa altura y D al diámetro interno del molino, tal como se muestra en la figura 3.1.5.1.

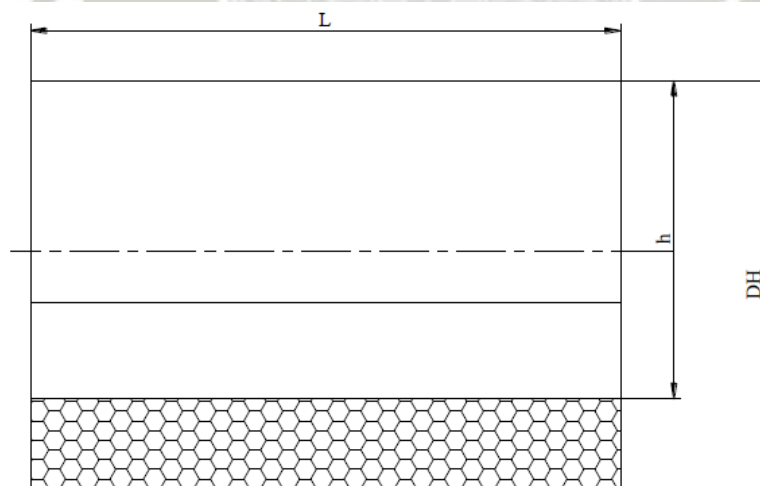


Figura 3.1.5.1: Diagrama DH , h y L

Fuente: Diseño Práctico de un Molino de Bolas – Alcántara V. Juan R.

El volumen del molino ocupado por la carga está dado por el área del segmento achurado multiplicado por el largo interno del molino y la relación matemática con la que se determina el % de llenado de bolas es:

$$\% \text{ carga bolas} = 113 - 126 \frac{h}{D}$$

Donde:

h = Espacio disponible sin carga de bolas.

D = Diámetro del molino.

Normalmente los molinos con descarga por rebalse operan con un volumen aparente de 40 a 42% del volumen total del molino, realizando cargas periódicas y controladas de bolas para recuperar aquellas gastadas durante la operación de molienda.

3.1.6 Circuitos de molienda y clasificación.

Los circuitos de molienda se utilizan para reducir el tamaño de las partículas de mena al tamaño requerido para su beneficio.

La mayoría de las menas sulfatadas se muelen en circuitos húmedos usando una o más etapas de molienda para obtener la liberación de los minerales necesarios para producir un concentrado final que cumpla con los criterios deseados. Para nuestra aplicación se utilizará un sistema de molienda seco.

3.1.7 Circuito cerrado de molienda y clasificación

La molienda en un circuito cerrado es la más común en circuitos de molienda para el procesamiento de minerales. Este tipo de circuito consiste de una o más molinos y clasificadores y producirá en forma eficiente un producto con un tamaño máximo controlado y con un mínimo de material sobre molido.

El material molido que descarga el molino es separado por el clasificador en una fracción fina y una gruesa. El tamaño de la separación es controlado por las condiciones operacionales del hidrociclón.

En la operación en circuito cerrado no se intenta alcanzar toda la reducción de tamaño en una pasada por el molino. Por el contrario, el énfasis se concentra en tratar de sacar el material del circuito tan pronto alcanza el tamaño requerido.

El material retornado al molino por el clasificador se conoce como carga circulante y su peso se expresa como porcentaje del peso de la alimentación nueva al circuito.

La molienda en circuito cerrado disminuye el tiempo de residencia de las partículas en cada paso por el molino y también la proporción de material fino en el molino comparado con la molienda en circuito abierto. La sobre molienda del material se trata de evitar en general para minimizar la producción de partículas excesivamente finas que frecuentemente interfieren con los procesos de recuperación del metal.

La figura 3.1.7.1 ilustra un circuito cerrado convencional en el que la descarga del molino se clasifica y separa en una porción de material fino (rebalse) que corresponde al producto del circuito y otra porción de material grueso (descarga) que es la carga circulante retornada al molino.

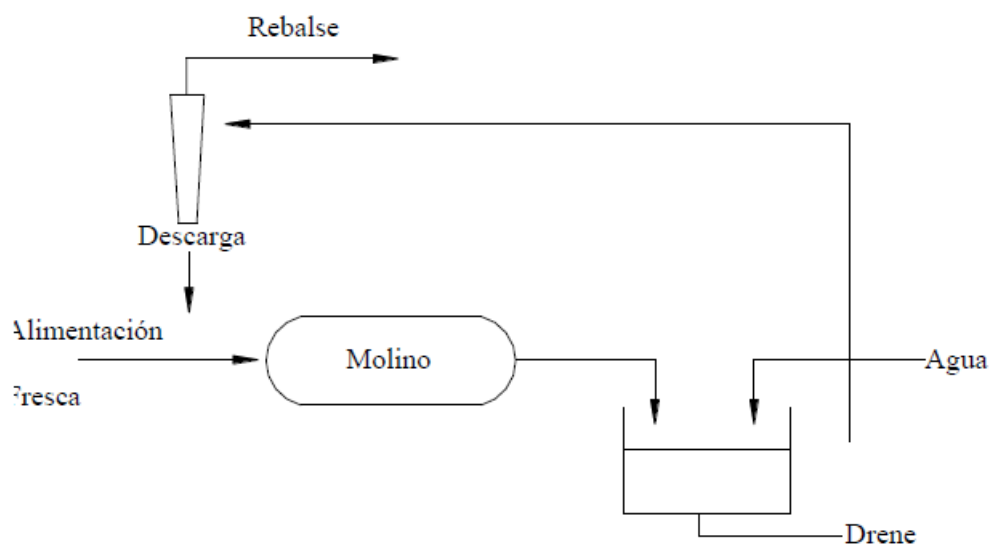


Figura 3.1.7.1: Circuito cerrado de molienda convencional
Fuente: Diseño Práctico de un Molino de Bolas – Alcántara V. Juan R.

3.2 MOLINO DE BOLAS

Los molinos de bolas, de piedras, de varillas, de tubo y de compartimentos tienen una capa cónica o cilíndrica que gira sobre un eje horizontal, y se cargan con un medio de molienda, por ejemplo, bolas de acero, pedernal o porcelana, o bien, con varillas de acero en la figura 3.2.1 presentamos un molino de bolas típico.

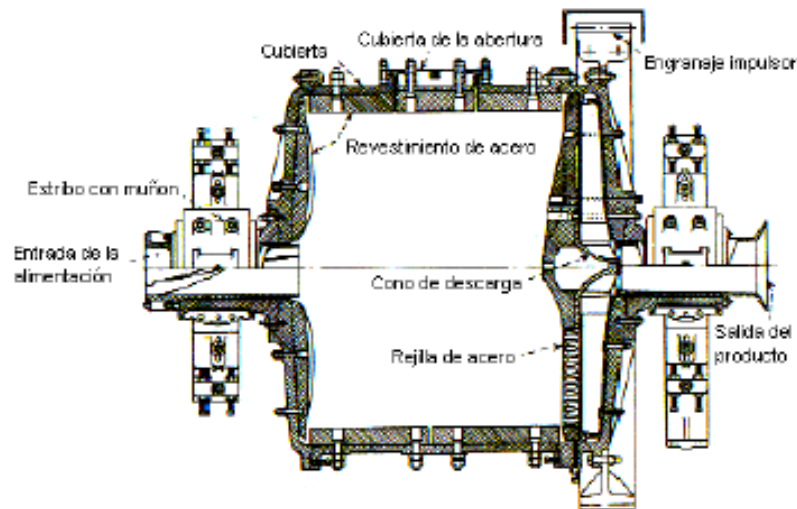


Figura 3.2.1: Corte transversal de un molino de bolas
Fuente: *Diseño Práctico de un Molino de Bolas – Alcántara V. Juan R.*

Las bolas para molienda pueden ser de acero forjado, acero fundido, hierro o porcelana. El tratamiento térmico a que son sometidas las bolas de acero forjado suele proporcionar una característica óptima de desgaste.

3.2.1 Operación

Se dice que los medios de molienda efectúan movimientos de cascada y catarata. El primero de ellos se aplica al rodado de las bolas o piedras de la parte superior hacia la base del montón, y el segundo al lanzamiento de bolas por el aire hasta la punta del montón. La acción de las bolas se ha estudiado y analizado desde este punto de vista.

Estos desarrollos matemáticos rigurosos se basan en hipótesis especulativas sobre la forma de la masa de bolas.

Los factores principales que determinan el tamaño de las bolas de molienda son la finura del material que se está pulverizando y el costo del mantenimiento para

la carda de las bolas. Cualquier material grueso alimentado requiere de una bola mayor que una alimentación fina; se ha propuesto la relación $Dp \frac{2}{b} = KXp$, donde Dp es el diámetro de la bola y Xp es el tamaño de las partículas de alimentación mas gruesas, dándose ambas dimensiones en cm; y K es la constante de molibilidad que varía de 140cm en el caso de la lidita a 90 cm para la dolomita.

La necesidad de una distribución de alimentación calculada según el tamaño de la bola es una cuestión que no se ha aclarado por completo; sin embargo, se han propuesto métodos para calcular una carga de bolas racionada

El criterio que se sigue para comparar la acción de las bolas en molinos de varios tamaños se basa en el concepto de la velocidad crítica. Se trata de la velocidad teórica a la que la fuerza centrífuga ejercida sobre una bola en contacto con la cubierta del molino, a la altura de su trayectoria, es igual a la fuerza ejercida sobre ella debido a la gravedad.

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \text{ Sistema métrico}$$
$$N_c = \frac{76.6}{\sqrt{D}} \text{ Sistema ingles}$$

Formulas 3.2.1.1 y 3.2.1.2

Donde:

N_c = Velocidad crítica en RPM

D = diámetro del molino

Las velocidades reales de los molinos varían de 65 a 80% de su valor crítico. Podría generalizarse que se necesita del 65 al 70% para la molienda fina en húmedo en suspensión viscosa. 70 a 75% para moliendas finas en húmedo, en suspensiones de baja viscosidad y para moliendas en seco de partículas grandes con tamaños de orden de 1.3 cm.

3.2.2 Eficiencia del molino

Los factores de control que se sabe regulan la eficiencia de molienda de minerales, en molinos cilíndricos son como sigue:

1. La velocidad del molino afecta la capacidad, al igual que el desgaste del recubrimiento y de las bolas, en una proporción directa hasta del 85% de la velocidad crítica.
2. La carga de las bolas equivalente al 50% del volumen del molino, da la capacidad máxima.
3. Las bolas de tamaño mínimo capaces de moler el material alimentado, dan una eficiencia máxima.
4. Los recubrimientos ranurados de tipo ondulado son los preferidos entre los usuarios.
5. La eficiencia del clasificador se hace más importante en moliendas de varias etapas.
6. Las cargas circulantes de mayor tamaño tienden a aumentar la producción y reducir la cantidad de material fino no deseable.

7. La descarga de nivel bajo o rejilla incrementa la capacidad de molienda en comparación con la descarga central o por rebosamiento, aunque el desgaste del revestimiento, la rejilla y los medios es mayor.
8. Las razones de sólidos a líquidos en el molino deben estudiarse basándose en la densidad del mineral y la relación volumétrica.

3.2.3 Parámetros del molino.

Las pruebas experimentales representadas en un artículo de Coghill y De Vaney, han hecho que los autores lleguen a las siguientes conclusiones.

1. En la molienda de bolas por lotes y por vía húmeda, con cargas de minerales de 90 a 160 kg, se necesitaros aproximadamente 35 kg de mineral para llenar los intersticios de las bolas en reposo y con velocidades del 30 al 80% de la crítica, la velocidad baja dio el mismo tipo de molienda que la alta. Las cargas grandes de minerales dieron una molienda un poco más selectiva de partículas gruesas que las cargas más ligeras. Se obtuvieron mejores capacidades con cargas ligeras y eficiencias un poco mayores con cargas grandes de minerales.
2. Algunas de las características de molienda en seco en molinos de bolas por lotes fueron diferentes a las que se obtuvieron en moliendas en húmedo. En el trabajo en seco, la eficiencia y la capacidad mejoraron con cargas ligeras de minerales. Se redujeron los requisitos de potencia al disminuir la cantidad de mineral dentro del molino y en la molienda en húmedo aumentó al disminuir dicha cantidad. En moliendas en seco, la velocidad elevada fue más eficiente que la velocidad baja.

3. Al comparar la molienda en húmedo y en seco, las pruebas por pares se realizaron, de tal manera que todas las variables establecidas fueron idénticas, excepto la consistencia de la pulpa. Con un peso intermedio de carga de mineral, la molienda selectiva resultó del mismo grado; con cargas grandes de minerales, la molienda en húmedo fue más selectiva, y con cargas ligeras, la molienda en seco resultó más selectiva.
4. Al comparar la molienda húmeda y seca en molinos de bolas y circuito abierto, la que se hizo en húmedo dio un 39% más de capacidad y un 26% más de eficiencia.
5. El volumen reducido de bolas no fue satisfactorio en el tipo de molinos de rebosamiento o inundación en seco, porque se desarrollaba un exceso de mineral dentro del molino. Cuando se logró prevenir el desarrollo excesivo de mineral simulando un molino de nivel bajo de pulpa, el volumen de bolas pequeño dio buenos resultados.
6. Con un 60% de sólidos, las piedras del mismo tamaño que las bolas efectuaron la misma clase de trabajo que éstas últimas cuando se molió dolomita; pero no se logró una molienda efectiva en el caso de la lidita. Las piedras dieron aproximadamente el 35% de la capacidad y el 81% de la eficiencia que caracterizó a las bolas.
7. Para minerales duros y de dureza intermedia, los tetraedros no dieron buenos resultados como medio para molienda gruesa.
8. Las bolas muy duras resultaron mejores que las bolas ordinarias, sobre todo cuando se trataba de minerales de extrema dureza.
9. La eficiencia de las bolas desgastadas y desechadas, fue aproximadamente 11% menor que la de las bolas esféricas nuevas.

10. Un molino de bolas tan pequeño como de 48 por 91 cm logró duplicar el trabajo de un molino tamaño planta. Los ensayos llevaron a la conclusión de que, si cada una de las variedades de los molinos, grandes o pequeños, se prueba en las mismas condiciones y si se aplica una unidad de trabajo por unidad de mineral, el efecto será el mismo, según indican los productos; dicho de otra manera, se mantendrá la misma relación entre causa y efecto.

3.2.4 Capacidad y consumo de energía

Un método para determinar el tamaño adecuado del molino se basa en la observación de que el volumen de molienda depende de la cantidad de energía consumida, suponiendo que existe una práctica de operación aceptable comparable en cada caso. La energía aplicada a un molino de bolas se determina primordialmente de acuerdo al tamaño del mismo y la carga de bolas. Algunas observaciones teóricas demuestran que la potencia neta requerida para impulsar un molino de bolas es proporcional a $D^{2.5}$, pero este exponente puede ser usado sin ninguna modificación para comparar dos molinos, sólo cuando las condiciones de operación son idénticas. La potencia neta necesaria para impulsar un molino de bolas resultó ser:

$$E = [(1.64L - 1)K + 1][(1.64D)^{2.5} E_2]$$

Fórmula 3.2.4.1

Donde:

L: Longitud interna del molino m.

D: Diámetro interno del molino m.

E2: potencia neta utilizada en un molino de laboratorio de 0.6*0.6m

K: 0.9

3.2.5 Molino de bolas Marcy.

Es, tradicionalmente, un molino de descarga por reja que se emplea para obtener una gran velocidad de carga tratada para una gran carga circulante en la molienda húmeda y seca de minerales. Los datos que aparecen en la siguiente tabla no deben utilizarse para efectuar su diseño, sino simplemente como orientación. El diseño del molino deberá basarse en experimentos pilotos u otras técnicas que se mencionaron con anterioridad.

Tamaño, ft	Carga de lasa bolas, toneladas	hp Por corrida	Velocidad del molino rpm	Capacidad, toneladas/24h (basada en mineral de dureza intermedia)								
				Tamiz No. 8	Tamiz No. 20	Tamiz No. 35	Tamiz No. 48	Tamiz No. 65	Tamiz No. 80	Tamiz No.100	Tamiz No.150	Tamiz No.200
				20 % -200	35 % -200	50 % -200	60 % -200	70 % -200	80 % -200	85 % -200	93 % -200	97 % -200
3 x 2	0.85	5- 7	35	19	15	12	10	8	6 ½	5	4	3
4 x 3	2.73	20- 24	30	80	64	53	45	36	28	22	18	14
5 x 4	5.25	44- 50	27	180	145	120	102	82	63	51	41	32
6 x 4 ½	8.90	85- 95	24	375	300	250	210	170	135	105	85	66
7 x 5	13.10	135-150	22 ½	640	510	425	360	290	225	180	145	113
8 x 5	20.2	220-245	21	1100	885	735	625	500	390	310	250	195
9 x 7	30.0	345-380	20	1800	1450	1200	1020	815	635	505	410	315
10 x 10	56.50	700-750	18	3680	2960	2450	2100	1700	1325	1050	850	655
12 x 12	90.5	1260- 1345	16.4	7125	5725	4750	4070	3290	2570	2035	1650	1275

*Tabla 3.2.5.1: Rendimiento ilustrativo de un molino Marcy de bolas
Fuente: Diseño Práctico de un Molino de Bolas – Alcántara V. Juan R.*

3.2.6 Clasificadores en húmedo

La molienda por vía húmeda en circuito cerrado es la regla en lo que se respecta a operaciones a gran escala, debido a su mayor producción y economía. El clasificador en húmedo mas sencillo es el depósito de asentamiento que se construye de tal modo que los finos no tienen tiempo para asentarse, y son arrastrados en tanto que el producto mas gruesos e dirige al punto de descarga

central. Por ejemplo, se tiene el hidroclasificador Hardinge y el espesador Dorr. Cuando se deseen hacer clasificaciones a un nivel de tamaño de μm , uno de los aparatos eficaces es la centrífuga continua del tipo de la supercentrífuga Sharpless o centrífuga Bird. La separación no está muy bien definida en los sedimentadores y el gran espacio necesario representa una desventaja.

3.2.7 Hidrociclones

Los HIDROCICLONES conocidos también por ciclones, forman una clase importante de equipos destinados principalmente a la separación de suspensiones sólido – líquido. La primera patente del HIDROCICLÓN data de 1891, sin embargo, su utilización industrial recién tuvo inicio después de la segunda guerra mundial en la industria de procesamiento de minerales. Desde entonces, vienen siendo usados industrialmente, de manera diversificada en las industrias química, metalúrgica, petroquímica, textil, y otros.

Los HIDROCICLONES fueron originalmente diseñados para promover la separación sólido-líquido, sin embargo, actualmente son también utilizados para separación de sólido – sólido, líquido – líquido y/o gas – líquido.

La industria minera es el principal usuario de los HIDROCICLONES, siendo aplicado en clasificación de líquidos, espesamiento, ordenamiento de partículas por densidad o tamaño y lavado de sólidos.

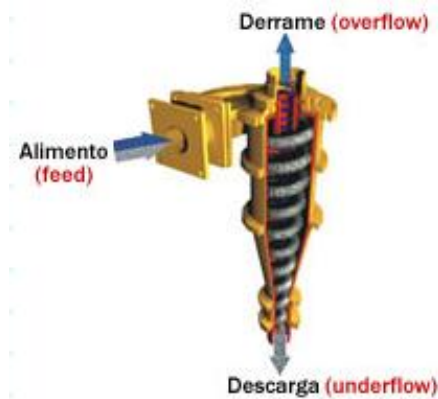


Figura 3.2.7.1: Diagrama básico de un hidrociclón
Fuente: taninos.tripod.com

El HIDROCICLÓN consiste de una parte cónica seguida por una cámara cilíndrica, en la cual existe una entrada tangencial para la suspensión de la alimentación (Feed). La parte superior del hidrociclón presenta un tubo para la salida de la suspensión diluida (overflow) y en la parte inferior existe un orificio de salida de la suspensión concentrada (underflow). El ducto de alimentación se denomina inlet, el tubo de salida de la suspensión diluida se denomina vortex, y el orificio de salida del concentrado se denomina apex, tal como se puede observar en el siguiente esquema de las partes del HIDROCICLÓN.

La suspensión es bombeada bajo presión, y entrando al HIDROCICLÓN a través del tubo de alimentación se genera un movimiento de tipo espiral descendente debido a la forma del equipo y la acción de la fuerza de gravedad. A razón de este movimiento se produce una zona de muy baja presión a lo largo del eje del equipo, por lo que se desarrolla un núcleo de aire en ese lugar. A medida que la sección transversal disminuye en la parte cónica, se superpone una corriente interior que genera un flujo neto ascendente también de tipo espiral a lo largo del eje central del equipo, lo que permite que el flujo encuentre en su camino al vortex que actúa como rebalse.

Las partículas en el seno del fluido se ven afectadas en el sentido radial por dos fuerzas opositoras: una hacia la periferia del equipo debido a la aceleración centrífuga y la otra hacia el interior del equipo debido al arrastre que se mueve a través del HIDROCICLÓN. Consecuentemente, la mayor parte de las partículas finas abandonarán el equipo a través del vortex, y el resto de las partículas, mayoritariamente los gruesos, saldrán a través del apex. En la figura 3.2.7.1 se puede observar la trayectoria de flujos dentro del HIDROCICLÓN.

Básicamente los cuatro parámetros independientes que permiten variar las condiciones de operación son: la densidad de la pulpa, la caída de presión en la alimentación, el diámetro del vortex y el diámetro del apex. El tamaño de corte y la eficiencia de la separación son controlados mediante el ajuste de estos parámetros.

El diámetro del HIDROCICLÓN puede variar desde una pulgada hasta dimensiones que pueden alcanzar las 70 pulgadas. HIDROCICLONES de mayor diámetro producen separaciones gruesas e HIDROCICLONES de menor diámetro producen separaciones finas.

Los HIDROCICLONES tienen mayor aplicación en el circuito de molienda cerrado, que pueden presentar como en los casos de la siguiente figura. El objetivo de la clasificación es hacer más eficiente el proceso de molienda y asegurar que el producto de la operación esté bajo un determinado tamaño, recirculando al molino las partículas más gruesas (figura 3.2.7.2).

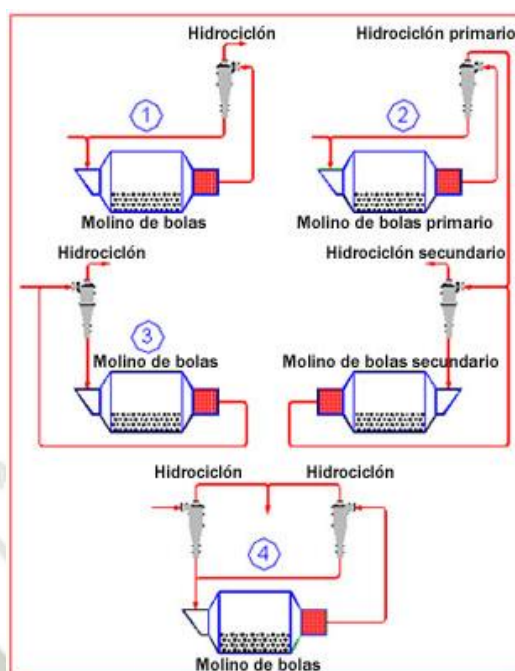


Figura 3.2.7.2: Hidrociclones en circuitos de molienda cerrados
Fuente: taninos.tripod.com



CAPÍTULO IV: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

4.1. DISEÑO CONTROL E INSTRUMENTACIÓN.

4.1.1. Filosofía de control

Dentro de esta sección se describirá como se realizará la actividad de molienda y separación de yeso (mineral) sin incluir los parámetros de configuración.

Para comenzar, se fijará un set point de producto variable (en gramos) para nuestro proceso.

Se depositará 1 kg de yeso sin moler en la tolva de ingreso hacia nuestro molino de bolas, dicha tolva tendrá el TAG 0310-STP-0001, esta tolva descargará en el ingreso al molino el cual se canaliza a través de un tornillo sin fin con TAG 0310-ES-0001 (TAG del motor 0310-ES-0001-M1); este motor es de 24 VDC y controlará el ingreso de yeso (mineral) hacia el molino.

El tipo de control para el motor 0310-ES-0001-M1 será realizado de acuerdo a la duración del tiempo de alimentación; de este semi-proceso de deberán tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Corriente promedio (A).
- Tiempo de activación (seg).

Una vez terminado el recorrido en el tornillo sin fin el yeso (mineral) pasará al molino con TAG 0310-ML-0001, en este lugar se ejecutará el proceso de molienda, este molino será activado por un motor con TAG 0310-ML-0001-M1 el cual será gobernado por un variador 0310-VDF-0001 conectado por medio de una red PROFIBUS DP hacia un PLC Siemens S7-1200 con procesador 1212C

(TAG 0310-PC-0001); este variador monitoreará, protegerá y generará un registro de los siguientes parámetros:

- Voltaje (VAC).
- Corriente consumida (A).
- Número de revoluciones (RPM).
- Tiempo total de operación (seg).

Se obtendrá mediante pruebas en campo el número de revoluciones óptimo para el proceso dependiendo de la carga de yeso y la velocidad crítica del molino, de este parámetro indirectamente se desprenderá la corriente consumida en el punto óptimo.

Por medio de la siguiente fórmula se obtendrá en consumo de energía eléctrica realizado por el molino.

$$P = VI \text{ Formula 4.1.1.1 y } T(h)=T(\text{seg})/3600 \text{ Formula 4.1.1.2}$$

$$CE(\text{kWh})= P(\text{kW}) \times T(h). \text{ Fórmula 4.1.1.3}$$

Reemplazamos 4.1.1.1 y 4.1.1.2 en 4.1.1.3.

$$CE(\text{kWh})= (V(\text{VAC}) \times I(\text{A}) / 1000) \times (T(\text{seg})/3600). \text{ Fórmula 4.1.1.4}$$

Una vez terminado el proceso de molienda el yeso (mineral) será depositado en el tanque 0310-TK-0001 el cual posee dos switches de nivel 0310-LSH-0001 (switch de nivel alto) y 0310-LSL-0001 (switch de nivel bajo), a su vez este tanque está conectado a la bomba de relave (yeso con agua) con TAG 0310-PP-0001 (TAG

de motor 0310-PP-0001-M1), la cual bombeará slurry (yeso con agua) hacia el ciclón 0310-SLC-0001; en donde por diferencia de densidades y fuerza centrífuga se separará overflow (producto) y underflow (residuo que requiere proceso de remolienda).

Este segundo proceso será controlado por el PLC Compact Logix L32E (TAG 0310-PC-0002); el cual mediante un relé de protección de motor E3-PLUS monitoreará, protegerá y generará un registro de los siguientes parámetros.

- Voltaje (VAC).
- Corriente promedio consumida (A).
- Tiempo total de operación (seg).
- Número de fallas por sobrecorriente (TRIP).

Se calculará el consumo de energía eléctrica por medio de la siguiente fórmula:

$$CE(kWh) = P(kW) \times T(h) \text{ Fórmula 4.1.1.1}$$

$$CE(kWh) = (V(VAC) \times I(A) / 1000) \times (T(seg)/3600). \text{ Fórmula 4.1.1.2}$$

Esta segunda parte se trata de un control ON/OFF, la potencia de la bomba es de 0.5HP; la protección en su totalidad la realizará el relé E3-PLUS; se tomarán cuenta las siguientes señales para su protección.

- TRIP (E3-PLUS).
- INPUT 1 (Activación de nivel alto en tanque 0310-TK-0001).
- INPUT 2 (Desactivación de nivel bajo en tanque 0310-TK-0001).
- OUTPUT 1 (Activación de motor 0310-PP-0001-M1)

El overflow obtenido del ciclón será filtrado y pesado en una balanza electrónica; mientras que el underflow será devuelto al tanque 0310-TK-0001.

Se tomarán los siguientes valores para realizar el balance final.

Cantidad de producto obtenido (gramos).

Energía eléctrica consumida (kWh).

Todo el proceso durará 10 minutos.

4.1.2. Selección de software, equipos y medios físicos.

La selección de los equipos se dio de la siguiente manera

1. De acuerdo al título 4.2 “Diseño mecánico eléctrico”, nuestro motor debió ser de 1.8 HP; se refirió la marca Siemens, por ser la que ofrecía una mayor calidad y un costo menor S./1100.00.
2. Así mismo de acuerdo a la teoría de hidro-ciclones se requiere una bomba de 0.5 HP; por ser una bomba de poco uso se tomó en cuenta la marca HIPO cuyo costo fue de S/160.00.
3. Después de esto se decidió la marca de los PLC para los buses de campo a utilizar; se tomaron en cuenta tres buses de campo; PROFIBUS DP para molienda, DEVICENET para el área de hidro-ciclones y se quiso añadir la red industrial Foundation Fieldbus; pero

por motivos de software y licencia no se implementó; a continuación, una comparativa entre ambos buses de campo.

Característica	DEVICENET	PROFIBUS DP
Marca patente/económica	Allen Bradley (exclusiva)	Siemens (económica)
Alimentación necesaria	24 VDC	24 VDC
Long. máx. de cable	500m.	1200m.
Taza de transferencia	125 Kbps.	93.75 Kbps
Cantidad de conductores	4	2
Precio de cable por metro	S/18.00	S/16.00
Precio de conectores	S/24.00	S/105.00
Precio de terminales	S/30.00	Incluido en conector
Conectores necesarios	2	2

Tabla 4.1.2.1. Comparativa DEVICENET PROFIBUS

Fuente: Propia.

4. Dadas las características de la tabla 4.1.2.1 se seleccionó para la molienda el PLC Siemens S7-1200 con procesador 1212c y módulo de comunicación PROFIBUS maestro CM 1243-5 y para el proceso de separación por hidrociclón el PLC Compact Logix con procesador L32E y módulo de comunicación DEVICENET 1769-SDN.
5. Dado el precio y la capacidad de necesaria para el motor de molienda, se seleccionó el variador Micromaster 420 con tarjeta de comunicación Profibus esclavo valorizado en S/1650.00.

Después de evaluar lo anteriormente descrito se utilizará los siguientes equipos:

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	1	PC portátil.
2	1	PLC Allen Bradley, procesador L32E.
3	1	Módulo de comunicación DEVICENET 17769-SDN.
4	1	PLC siemens S7-1200, procesador 1212C.
5	1	Módulo maestro de comunicación PROFIBUS CM 1243-5.
6	1	Switch Ethernet de 4 puertos TP-LINK.
7	1	Variador de velocidad MICROMASTER 420 con adaptador
8	1	Relé de protección de motor E3-PLUS con comunicación

9	1	Motor SIEMENS 1.8 HP 220 VAC trifásico.
10	1	Bomba 0.5 HP 220 VAC monofásico.

*Tabla 4.1.2.2. Equipos utilizados en la implementación de la planta.
Fuente: Propia.*

Los cables a utilizar serán los siguientes:

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	6 m	Cable Profibus 1pr-24 + shield.
2	2 m	Cable DEVICENET 1pr 22 AWG + 1pr 24AWG + Shield.
3	4 m	Cable UTP Cat 5.

*Tabla 4.1.2.3. Cables utilizados en la implementación de la planta.
Fuente: Propia.*

El software a utilizar:

- Windows 7 64 bits (por estabilidad).
- Rockwell Studio V20 o superior.
- TIA PORTAL V13 o superior.
- Office 2007 o superior.

Notas:

- Todo el software anteriormente descrito será simulado máquina virtual.
- Todos los accesorios y conectores deberán ser normados.

4.1.3. Modelamiento lógico-teórico

Para el modelo lógico-teórico de nuestra planta partiremos del modelo básico de un sistema realimentado en bucle cerrado:

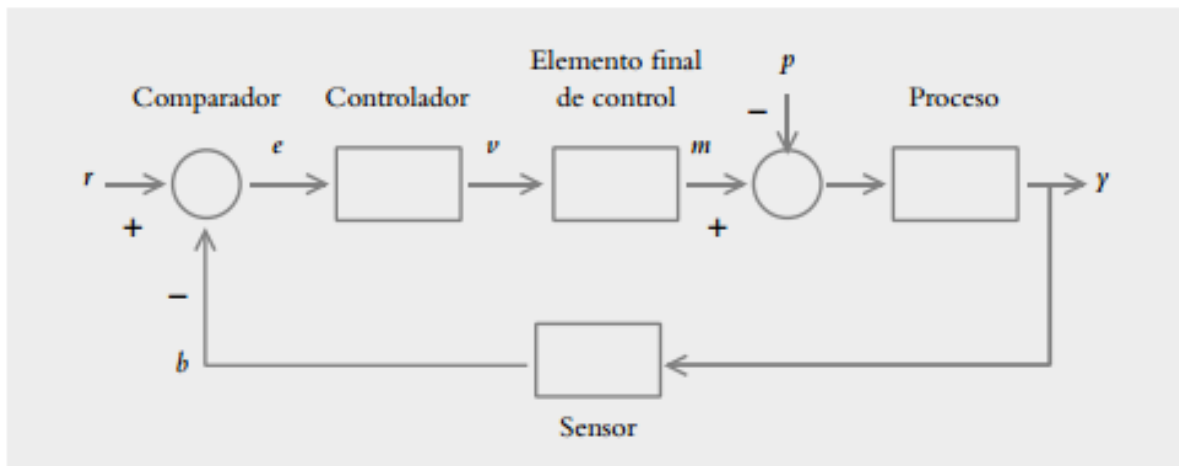


Figura 4.1.3.1 Diagrama de bloques de un sistema realimentado

Fuente: Introducción a los Sistemas de Control – Ricardo Hernandez Gaviño

Donde:

$r(t)$: Entrada de referencia.

$e(t)$: Señal de error.

$v(t)$: Variable regulada.

$m(t)$: Variable manipulada.

$p(t)$: Señal de perturbación.

$y(t)$: Variable controlada

$b(t)$: Variable de retroalimentación como resultado de haber detectado la variable controlada por medio del sensor.

Nuestra entrada de referencia $r(t)$ se dará de manera indirecta en gramos de yeso (la equivalencia será desprendida de una tabla); esta equivalencia será traducida a

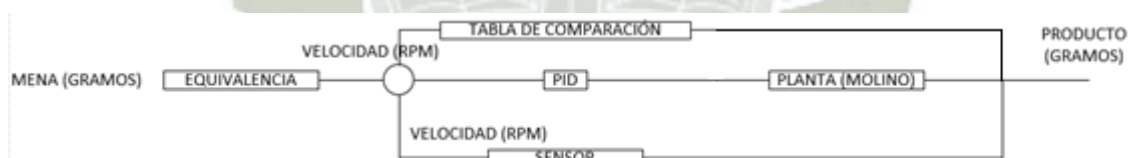
RPM variando la cantidad de revoluciones por minuto en base a los datos teóricos y experimentales obtenidos.

Las revoluciones por minuto representarán el SP de nuestro controlador (todo cálculo tomando en cuenta la velocidad crítica).

Nuestro controlador será del tipo PID y sus parámetros variaran en base a los datos teóricos y experimentales obtenidos previamente (aquí se observa el control adaptativo).

El éxito de nuestro proceso dependerá de cuan rápido se estabiliza la velocidad requerida de la planta en base a la demanda del producto.

La figura 4.1.3.2 refleja el proceso en mención mediante su respectivo diagrama de bloques.



*Figura 4.1.3.2: Diagrama de bloques de sistema de molienda con control adaptativo
Fuente: Propia*

Así nuestras variables serán las siguientes:

Entrada de referencia: Directamente mena (gramos), indirectamente velocidad (RPM)

Variable regulada: Velocidad (RPM).

Variable manipulada: Velocidad (RPM).

Variable controlada: Producto (gramos).

Para describir el posible comportamiento debemos partir de las siguientes premisas:

Se tomará esta planta como un sistema de primer orden.
Se considera un lazo de una entrada y una salida (SISO).
El controlador será del tipo PID.
La sintonización será experimental, pero se apoyará en el teorema de Ziegler Nichols.

Tabla 4.1.3.1. Premisas lógicas de modelamiento de planta.

Fuente: Propia.

Un sistema de primer orden es el que queda definido por la siguiente ecuación:

$$a \frac{dy}{dx} + by = cr(t)$$

Fórmula 4.1.3.1

Sabemos que muchas plantas de primer orden pueden ser descritas por el siguiente modelo:

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

Fórmula 4.1.3.2

Esta función debe analizarse en lazo abierto de la siguiente manera:

1. Llevaremos la planta a un punto de operación normal. Suponemos que la salida de la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para una entrada constante $u(t) = u_0$.
2. En el instante inicial t_0 , aplicar un cambio en la entrada escalón, desde u_0 a u_∞ (esto debería ser en un rango de 10 al 20% de rango completo).
3. 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.
4. Calcular los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_0}; \quad \tau_0 = t_1 - t_0; \quad v_0 = t_2 - t_1$$

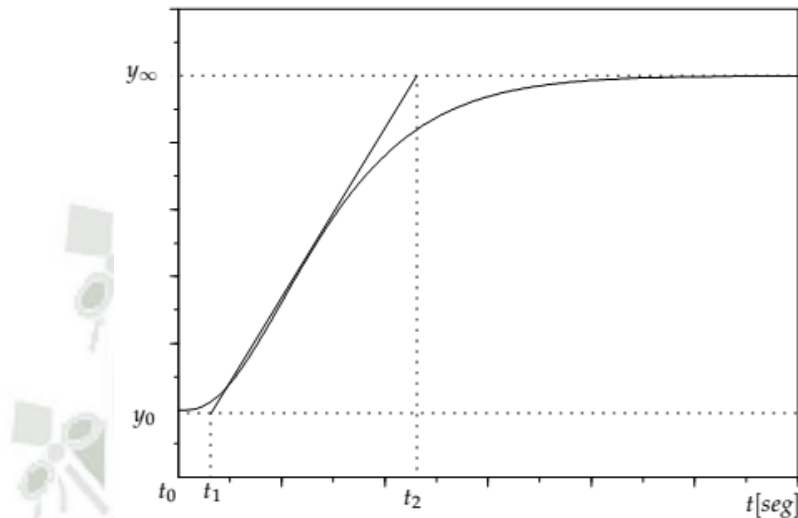


Figura 4.1.3.3: Típica respuesta escalón a una planta de primer orden en lazo abierto
Fuente: Introducción a los Sistemas de Control – Ricardo Hernandez Gaviño

Del análisis experimental de nuestra planta podemos desprender 2 o más zonas de confort para nuestro proceso; de cada cual se analizarán los parámetros adaptativos que mejor se acomoden al proceso; para luego ser tabulados en nuestro controlador.

4.2 DISEÑO MECÁNICO-ELÉCTRICO.

4.2.1. Calculo Potencia de Motor de Molino de bolas

Datos básicos:

- Tamaño de planta: 400Ton/Año.

$$\frac{400 \text{ Ton}}{330 \text{ dia}} = 1.21 \text{ Ton/día.}$$

- Se le da el 10% de producción extra: 1.33Ton/día.

- Consumo de energía: 1. kWhora/Ton, esto datos teóricos observados en el marco teórico.

- Cálculo de motor:

Potencia del motor de Molino = 1kWhora/Ton * 1.33 Ton/Hora = 1.333kW.

De donde

Usando un F.S. 1.3.

Potencia de motor = 0.264kW*1.33 = 1.773 HP.

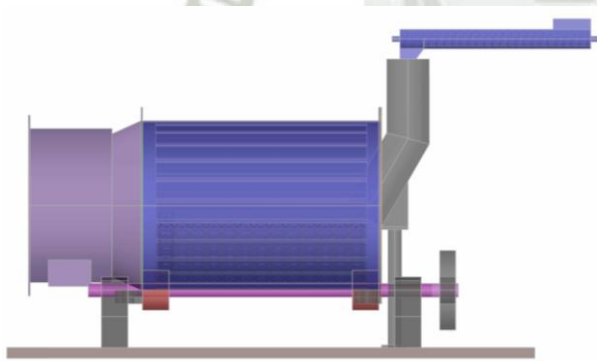


Figura 4.2.1.1. Vista Lateral de molino de bolas
Fuente: Propia

Datos de Motor:
Marca: Siemens
Modelo: 1LA7082-2YA80
RPM:3450
Torque: 12.1Nm
Peso:10kg
Factor de Potencia: 0.86
Potencia: 1.8HP
Voltaje: 220Vac
Corriente: 5.8A.
Frecuencia: 60 Hz

Tabla 4.2.1.1 Datos de motor
Fuente: Propia

4.2.2. Selección del reductor de velocidad:

En este caso seleccionaremos un reductor con transmisión por engranajes y transmisión por fajas, el cual reducirán la velocidad de 3450RPM a 65 RPM como máximo y esta velocidad variará 0 a 60 RPM con un variador de velocidad.

Datos de reductor

- Ratio de 45.
- Potencia de entrada 1.5 HP.
- Potencia de Salida 1.0 HP.

Datos de Poleas

- Diámetro de polea lado reductor: 150mm.
- Diámetro de polea lado motor: 100mm.

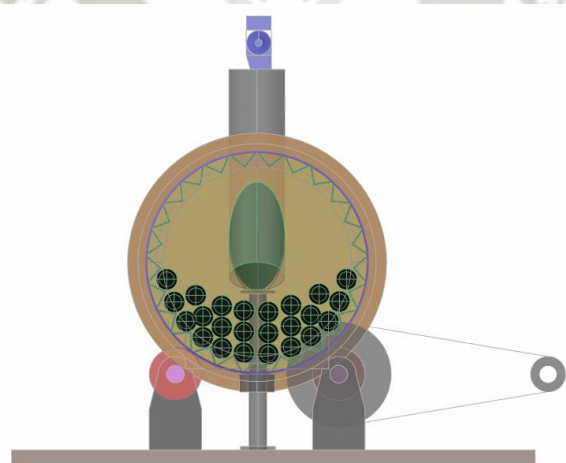


Figura 4.2.2.1. Vista Frontal de Molino de Bolas
Fuente: Propia

4.2.3. Expresión Dawn para el dimensionamiento del molino

Usando la expresión DAWN: $kW_{netos} = 0.284DAWN$.

Donde kW netos es la potencia requerida solamente del molino sin tomar en cuenta las pérdidas en el motor y en la transmisión.

En donde:

D=Es el diámetro del molino, adentro del emplacado (m)

A= (1.073-J); J= Es la fracción de carga del volumen del molino.

W=Es el peso de la bola en toneladas.

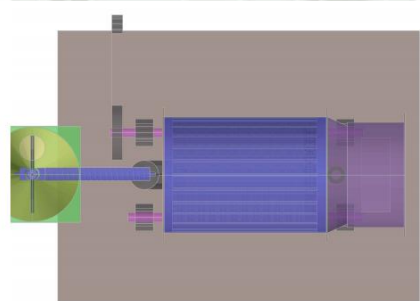
N= Es la velocidad del molino en RPM

Esta expresión es empírica y se ha desarrollado con el paso de los años

Sustituyendo estos valores en la formula o expresión se tiene:

$$KW \text{ netos} = 0.284 D(1.073 - J) WN.$$

Para obtener las dimensiones del molino, todos los parámetros deben ser expresados en términos "D"



*Figura 4.2.3.1. Vista Superior de Molino de Bolas
Fuente: Propia*

4.2.4. Calculo de velocidad del molino

La velocidad del molino normalmente se calcula como un porcentaje de la velocidad crítica (Nc), la cual se define como la velocidad en la que la carga de la bola empieza a centrifugar.

La velocidad crítica se puede calcular como una función del diámetro del molino.

$$N_c = \frac{42.2}{\sqrt{D}}$$

Fórmula 4.2.4.1

El rango normal de la velocidad del molino varía entre 70% y 80% de la velocidad crítica por lo que tomando la expresión.

$$75\%N_c = \frac{31.65}{\sqrt{D}}$$

Fórmula 4.2.4.2

La forma del molino de bolas se expresa en términos de la relación longitud a diámetro L/D, usando la longitud efectiva del molino y el diámetro dentro del emplacado para efecto del cálculo, por lo que tomaremos la relación 1.61:1.

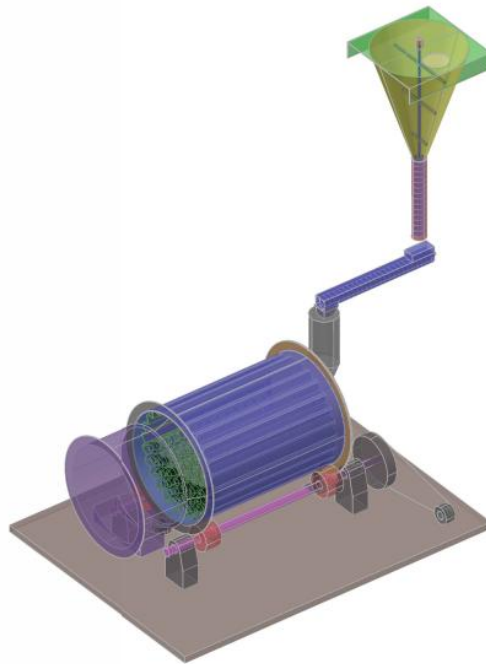
La velocidad crítica está dada por la formula $n = K / (D)^{0.5}$, en donde D = diámetro libre del molino, para este caso D = 0.57m

$$K = 42.3$$

Entonces:

$$N = 42.3 / (0.57)^{0.5} \text{ RPM}$$

$$N = 55.63 \text{ RPM}$$



*Figura 4.2.4.1. Vista Isométrica de Molino de Bolas
Fuente: Propia.*

4.2.5. Volumen de carga y peso de la bola

El volumen de carga depende hasta cierto punto de molino. El cálculo se basa en determinar el tamaño del molino y el volumen de carga necesario para usar la potencia requerida de modo de obtener la meta de producción.

Para encontrar el tamaño del molino se debe seleccionar un valor para el volumen de carga (J). Para este tipo de molino un valor del 28% es aceptable. Se ha encontrado en la práctica que con más de 30% se pierde eficiencia.

El peso de la bola se relaciona con el % de volumen de carga.

Peso de la bola = $W = \text{volumen del molino} \times J \times \text{densidad de la bola}$

La densidad convencional usada para la bola es de 4.48 Ton/m³

En este caso:

$$W = \frac{\pi}{4} x D^2 x 1.61 x D x 0.28 x 4.48$$

$$W = \frac{\pi}{4} x D^2 x 1.61 x D x 0.28 x 4.48$$

$$W = 1.59 D^3 \text{Toneladas}$$

Los kW netos es la potencia a la entrada del molino y se calcula a partir de la potencia de entrada del motor y transmisión.

Si este dato no se tiene disponible, un factor seguro para convertir potencia de alto (gross) a neto es de 0.9.

Donde:

$$\text{kW netos} = 0.9 \times 1 \times 0.746 = 0.67 \text{kW}$$

Por lo tanto

$$\text{kW netos} = 0.284 D (1.073 - 0.28) 1.61 D^3 (31.65 * D^{-0.5})$$

Sustituyendo el valor kW netos en esta expresión tenemos:

$$1.6 \text{kW} = 11.47 D^{3.5}$$

$$D = 0.57 \text{m entre emplacado}$$

El diámetro entre paredes es de 1.5m. dejando 2mm como espesor de emplacado en cada pared.

Para obtener la longitud del molino de la relación $L/D = 1.61$ despejamos a L y tenemos lo siguiente:

$L = 1.61 \times D$ sustituyen valores de D tenemos:

$$L = 1.61 \times 0.57 = 0.9177 \text{ m}$$

$$N = 31.65 / (D)^{0.5}$$

$$N = 41.9 \text{ RPM}$$

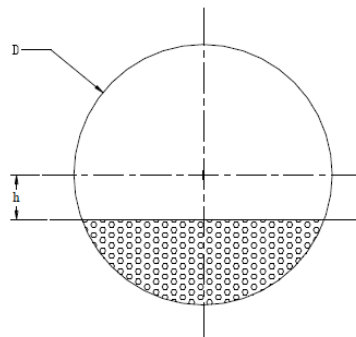
$$\text{Por lo que kW netos} = (0.284 \times 0.57 \times (1.073 - 0.28) \times 1.61 \times 0.57^3 \times ((31.65)/(0.57)^{0.5}))$$

$$\text{kW netos} = 1.6 \text{ kW}$$

Usaremos un 5% de los kW netos correspondientes a causa de pérdidas en el motor, cojinetes, reductor en general.

Para el porcentaje de llenado se utilizará el teorema de Lewenson

Según L. Lewenson el llenado óptimo de los molinos debe ser tal que $h = 0.16D$



Sustituyendo el de grado de llenado es de 29%

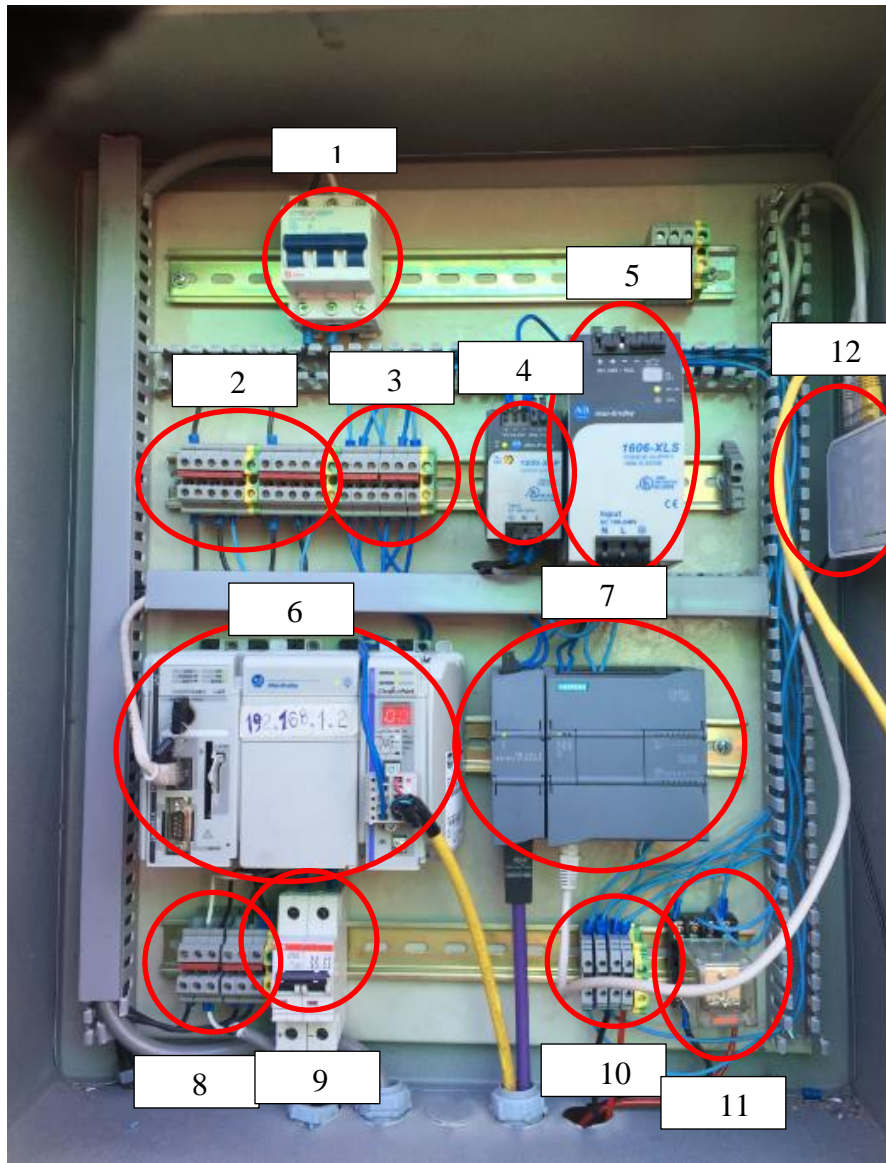
Para nuestro caso $D = 1.37 \text{ m}$, $\therefore h = 0.16 \times 1.37 = 0.21 \text{ m}$

*Figura 4.2.4.2. Porcentaje de llenado de villas ideal en molino de bolas
Fuente: Diseño Práctico de un Molino de Bolas – Alcántara V. Juan R.*

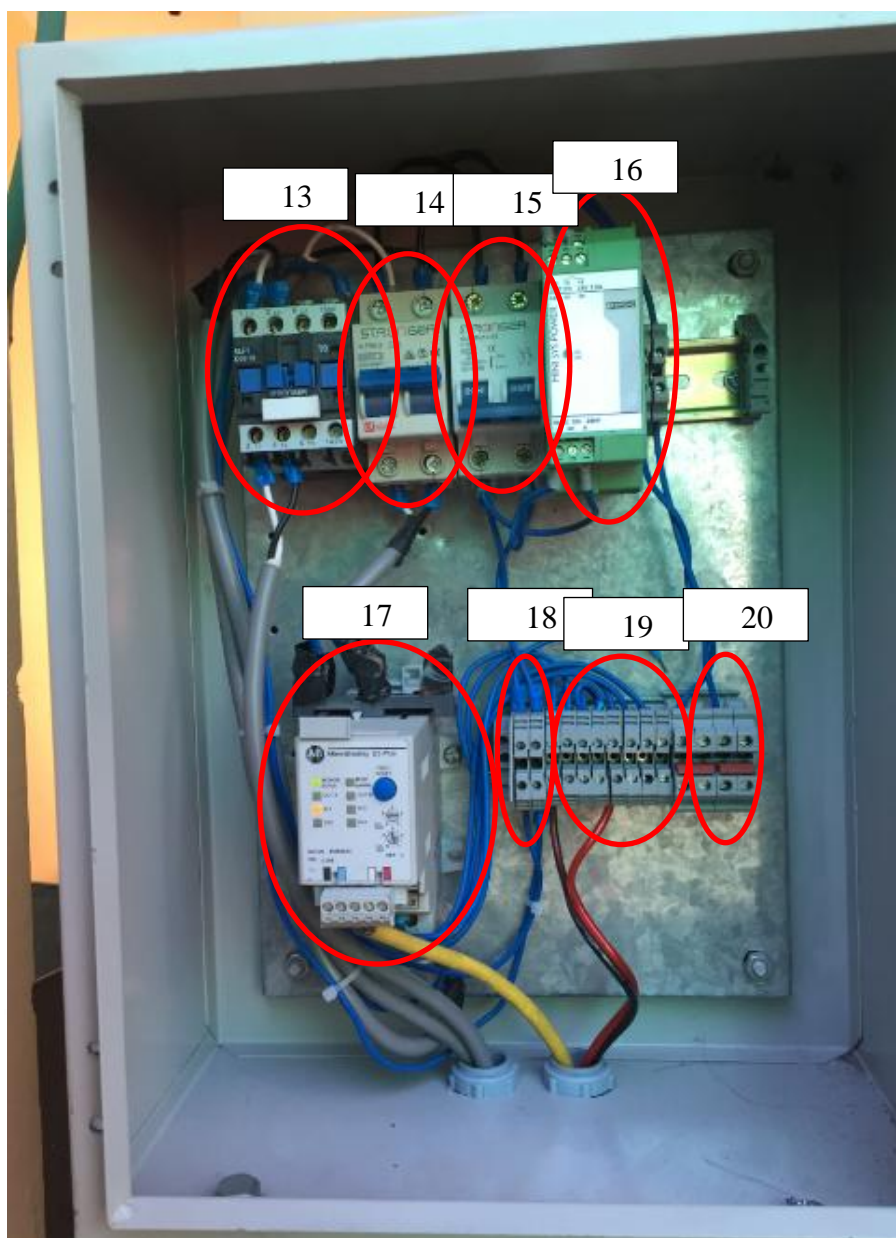


**CAPITULO V: INSTALACIÓN ELÉCTRICA, CONFIGURACION Y
PROGRAMACION**

5.1. PANEL FOTOGRÁFICO.



*Figura 5.1.1. Tablero de control descentralizado 0310-DCS-0001.
Fuente: Propia*



*Figura 5.1.2. Tablero remoto de instrumentación 0310-JBD-0001.
Fuente: Propia*



Figura 5.1.3. Variador profibus 0310-VDF-0001 y motor de molino 0310-ML-0001-M1.
Fuente: Propia



Figura 5.1.4. Instrumentos de campo y motor de alimentación de mineral.
Fuente: Propia



*Figura 5.1.5. Bomba de sistema de hidrociclón 0310-PP-0001 con motor 0310-PP-0001-M1.
Fuente: Propia*

5.2. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES.

1. Main breaker trifásico con aplicación monofásica 30A 0310-CB-0001.
2. Bornera de distribución de 220VAC 0310-TB220VAC-0001.
3. Bornera de distribución de 24 VDC 0310-TB24VDC-0001.
4. Fuente de alimentación de instrumentación 1.2A 24 VDC 0310-PS024VDC-0001.
5. Fuente de alimentación de instrumentación 10A 24 VDC 0310-PS024VDC-0002.
6. Controlador lógico programable Allen Bradley CompactLogix L32E con módulo de comunicación DEVICENET 0310-PC-0001.
7. Controlador lógico programable Siemens S7-1200 1212C RL/RL/RL con módulo de comunicación PROFIBUS maestro 0310-PC-0002.
8. Bornera de distribución de 220VAC 0310-TB220VAC-0002.
9. Breaker monofásico 20A 0310-CB-0004.
10. Bornera de señales de entrada digital hacia PLC Siemens 0310-TBIN-0001.

11. Relé de protección para salida digital de PLC Siemens 0310-RL-0001.
12. Switch de comunicación Ethernet 0310-CUA-0001.
13. Contactor de 30A. para activación de bomba de hidrociclón 0310-CC-0001.
14. Breaker monofásico 15A 0310-CB-0002.
15. Breaker monofásico 10A 0310-CB-0003.
16. Fuente de alimentación de instrumentación 1.5A 24 VDC 0310-PS024VDC-0003.
17. Relé de protección de motor E3PLUS 0-5A. 0310-PRL-0001.
18. Bornera de paso 220 VAC.
19. Bornera de señales de entrada digital hacia relé E3PLUS 0310-TBIN-0002.
20. Bornera de distribución de 24 VDC auxiliar 0310-TB24VDC-0002.
21. Variador de velocidad 2.0 HP Micromaster 420 con comunicación Profibus 0310-VDF-0001.
22. Motor de 220 VAC 3 fases 1.8 HP Siemens 0310-ML-0001-M1.
23. Limit Switch encargado de registrar pulso por vuelta de molino 0310-SS-0001.
24. Motor de alimentación de mineral 24 VDC. 0310-FD-0001-M1.
25. Switch NC de nivel bajo en tanque de hidrociclón 0310-LSL-0001 acompaña de switch de nivel alto 0310-LSH-0001.
26. Bomba de hidrociclón 0.5 HP 220 VAC 1 fase 0310-PP-0001 con motor 0310-PP-0001-M1.

5.3 SEGMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN.

Dentro de esta sección no avocaremos íntegramente a los pasos a seguir para poder configurar cada uno de los equipos; así mismo el desarrollo de la programación y del sistema de monitoreo gráfico.

Para un mejor entendimiento se desarrollarán los siguientes títulos:

- Configuración y programación de PLC Siemens S7-1200.
- Configuración y programación de PLC Allen Bradley Compact Logix.
- Configuración de servidor OPC KEPSERVER-EX.
- Configuración de sistema de monitoreo y entorno gráfico en INTOUCH.

5.4 CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE PLC SIEMENES S7-1200.

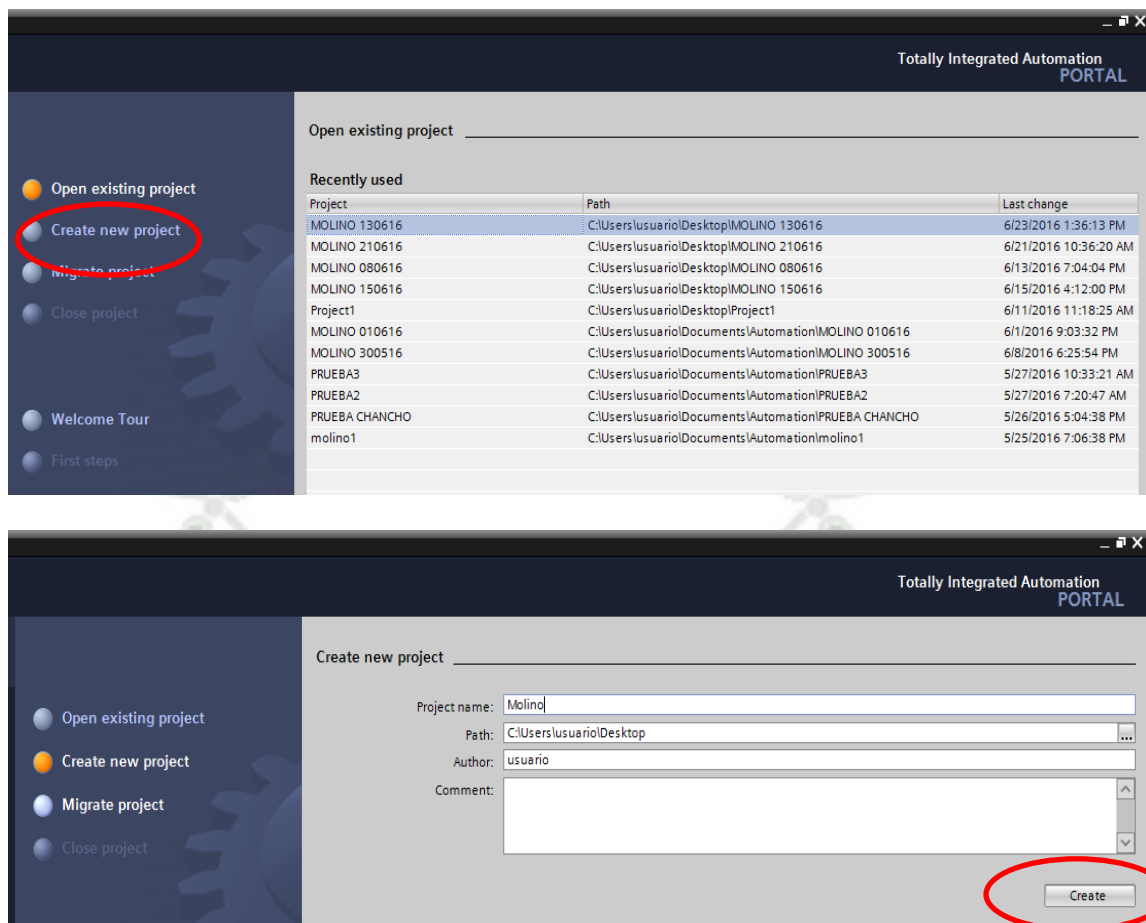
Se observó que dentro de las versiones de Microsoft Windows la versión más estable a la fecha es el Windows 7 de 64 bits; por lo cual se creó una máquina virtual para el desarrollo de este segmento del proceso. Adicionalmente se instaló el software nativo de Siemens llamado TIA PORTAL en su versión 13.0.

1. Se abrirá la aplicación TIA PORTAL V13.0 con compatibilidad a Windows XP SP3 y en modo administrador para que en el futuro puedan interactuar todas las aplicaciones necesarias.



*Figura 5.4.1. Ubicación de aplicación TIA PORTAL V13 en escritorio de VM.
Fuente: Propia.*

2. Dentro de la aplicación se creará un nuevo proyecto; en este caso de llamará “molino”.



*Figura 5.4.2. Creación de nuevo proyecto en TIA PORTAL V13.
Fuente: Propia.*

- Este programa tiene dos tipos de vista, una es la de desarrollo asistido y otra es la de desarrollo de proyecto; la primera es para hacer amigable el entorno de configuración y la segunda es muy parecida a la vista clásica de Step 7; elegiremos la segunda por ser la mas directa.

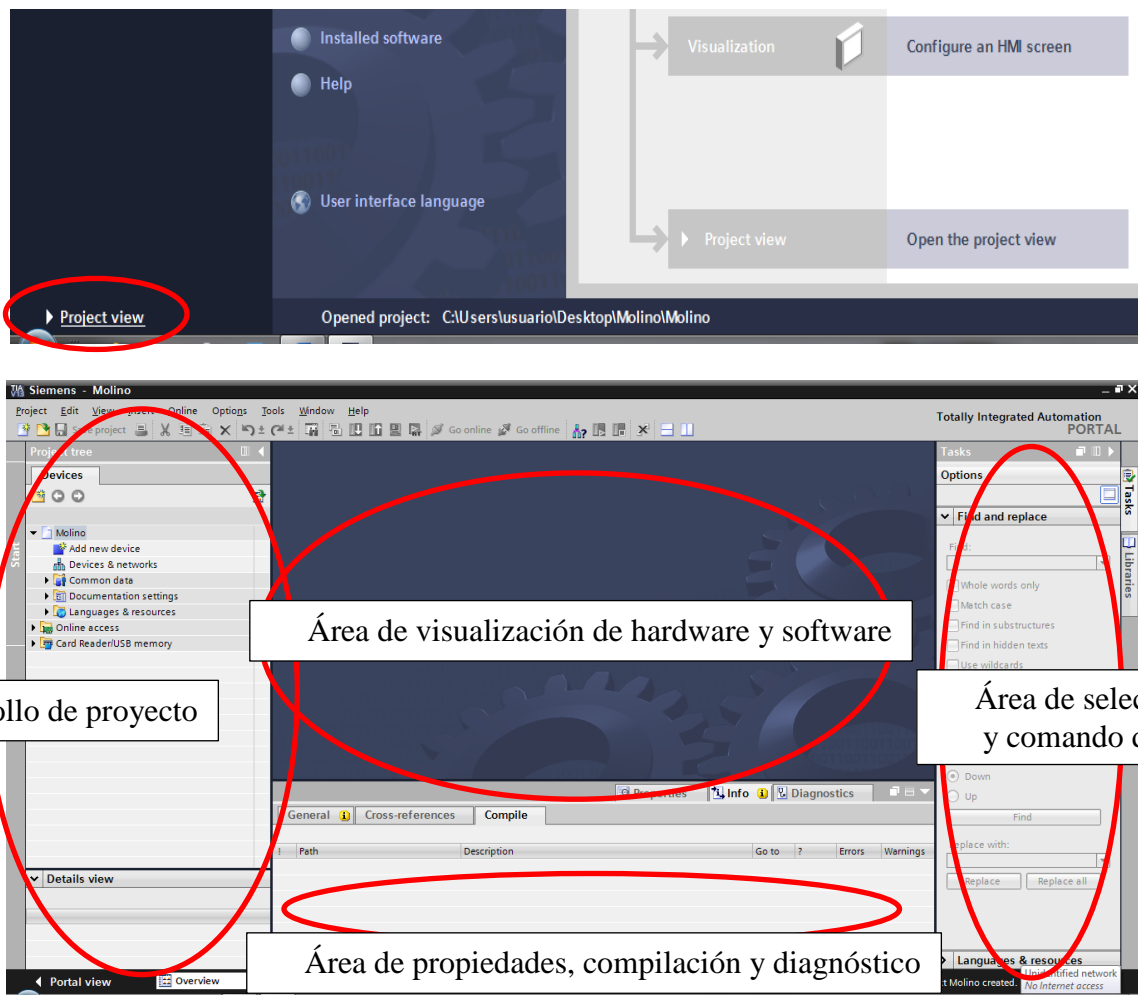
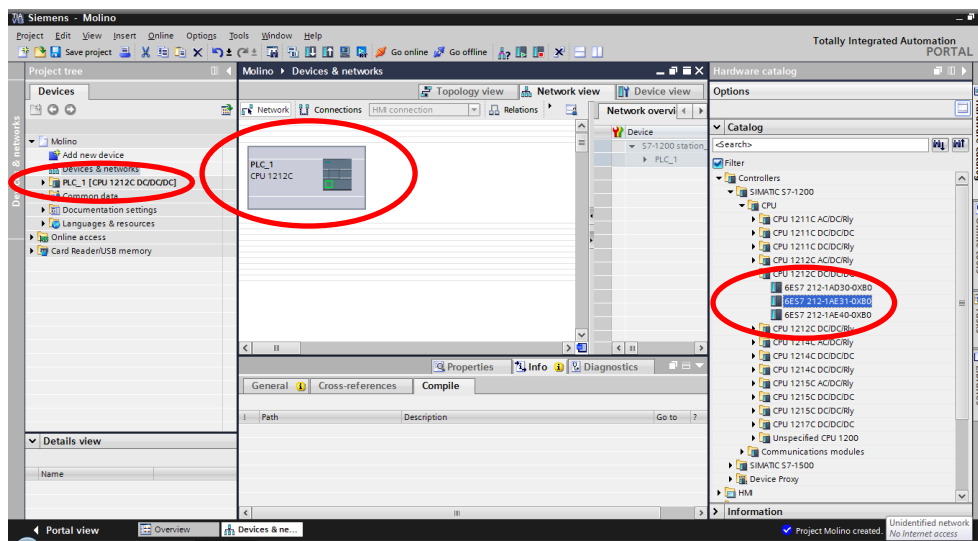


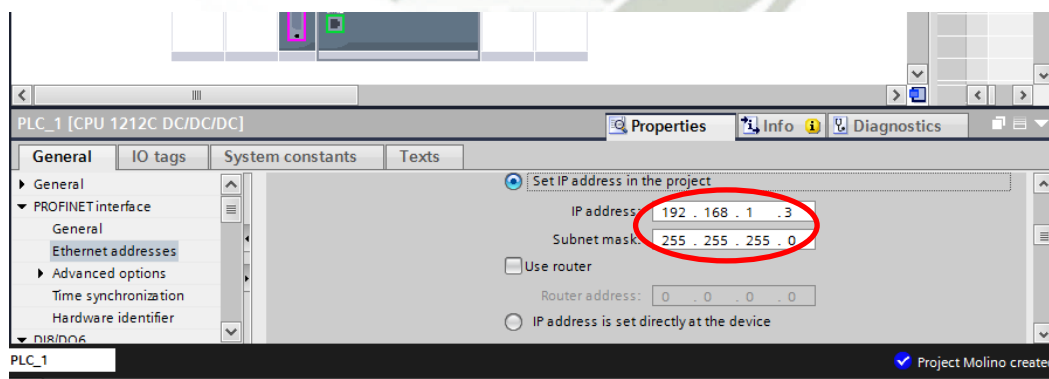
Figura 5.4.3. Ventana de Project View en TIA PORTAL V13
Fuente: Propia.

4. Seleccionaremos dentro del árbol de desarrollo de proyecto la sección Devices and Networks para poder seleccionar el controlador que poseemos, en este caso se trata de un procesador 1212C tipo relé/relé/relé; el firmware es 6ES7 212-1AE31-0XB0; esta información se halla rotulada en nuestro PLC en una de las caras laterales.



*Figura 5.4.4. Selección de PLC y procesador en TIA PORTAL V13.
Fuente: Propia.*

- Después de agregar el PLC configuraremos la dirección IP para su adaptador Profinet; en este caso nuestro ordenador tiene la dirección 192.168.1.4, por lo tanto nuestro PLC debe permanecer en la misma trama y se le asignará la dirección 192.168.1.3, esta configuración se realizará en el área de propiedades, compilación y diagnóstico; se debe decir que ningún cambio será efectuado hasta que toda la información configurada sea compilada y descargada.



*Figura 5.4.5. Configuración de dirección IP en puerto Profinet.
Fuente: Propia.*

- Una vez terminada la configuración inicial del nuestro PLC es hora de agregar nuestro módulo de comunicación profibus maestro CM 1243-5; para ello buscamos entre los controladores de módulos de comunicación y arrastramos el firmware al lado izquierdo de nuestro PLC ya que al lado izquierdo van los módulos de comunicación; dentro de las propiedades configuramos dicho módulo con la dirección 2.

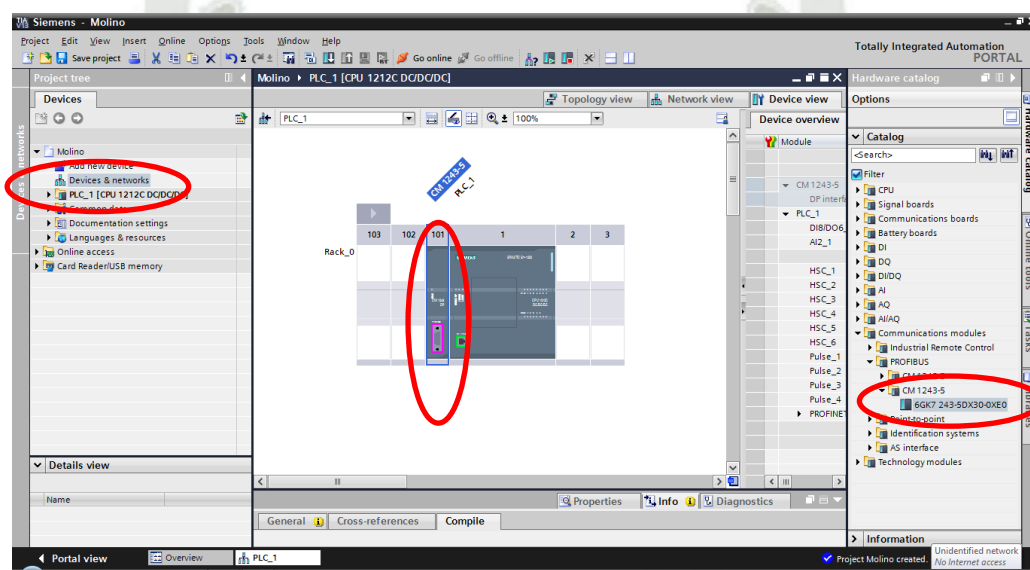


Figura 5.4.6. Selección de firmware de módulo de comunicación Profibus maestro.
Fuente: Propia.

- Finalmente agregamos el variador que en nuestro caso se trata de un Micromaster 420.

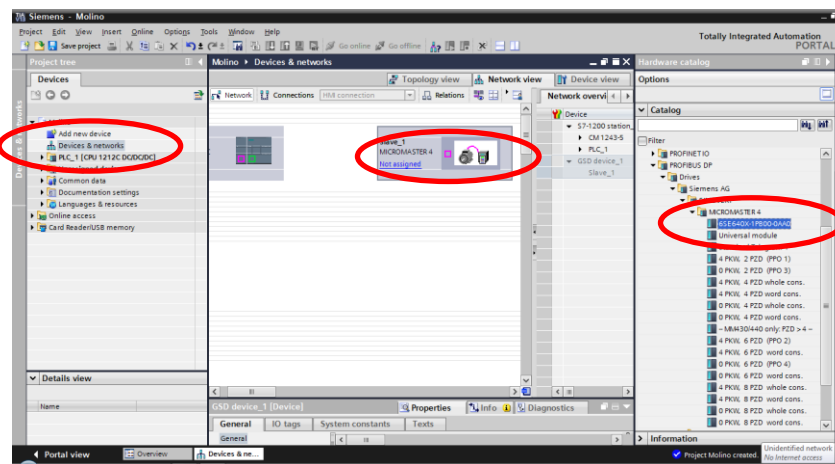


Figura 5.4.7. Selección de variador Micromaster 420.

Fuente: Propia.

8. Ahora que hemos agregado cada uno de los componentes es necesario relacionarlos topológicamente y para ello solo unimos el módulo Profibus maestro con el variador Micromaster 420; como se observa en la figura 5.4.8. se origina una línea color morado, la cual simboliza el enlace físico Profibus entre ambos componentes.

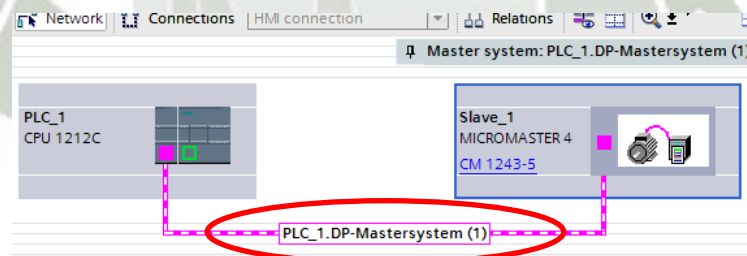


Figura 5.4.8. Configuración topológica entre módulo de comunicación Profibus maestro y variador Micromaster 420.

Fuente: Propia.

9. Un paso muy importante es seleccionar el tipo de comunicación que se tendrá con el variador; ya que de esto depende el direccionamiento de los parámetros y las palabras de mando y monitoreo; para ello seleccionamos el tipo PPO 1 que es el mas completo y que incluye a los demás.

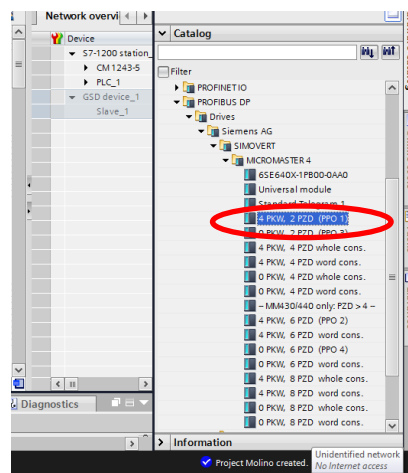


Figura 5.4.9. Selección de tipo de comunicación entre módulo de comunicación Profibus y variador
Fuente: Propia.

10. Como observamos en la figura 5.4.10. tenemos dos tipos de direccionamiento para nuestro variador; el primero (superior) es para lectura y escritura de parámetros y el segundo (inferior) es para lectura y escritura de mando y monitoreo; en ambos casos el direccionamiento puede ser variado; pero para nuestra aplicación mantendremos el direccionamiento por defecto.

Device overview							
...	Module	Rack	Slot	I address	Q address	Type	Or...
	Slave_1	0	0			MICROMASTER 4	6SI
	4 PKW, 2 PZD (PPO 1)_2_1	0	1	256...263	256...263	4 PKW, 2 PZD (PP...	
	4 PKW, 2 PZD (PPO 1)_2_2	0	2	264...267	264...267	4 PKW, 2 PZD (PP...	
		0	3				

Figura 5.4.10. Direccionamiento de parámetros y palabras de mando y monitoreo de variador Micromaster 420.
Fuente: Propia.

11. Ya que hemos terminado con la configuración de dispositivos y red de nuestro proyecto realizaremos la respectiva compilación y descarga de todo lo configurado; de no haber observaciones en el área de diagnóstico aparecerá el mensaje de “Loaded Successfully”.

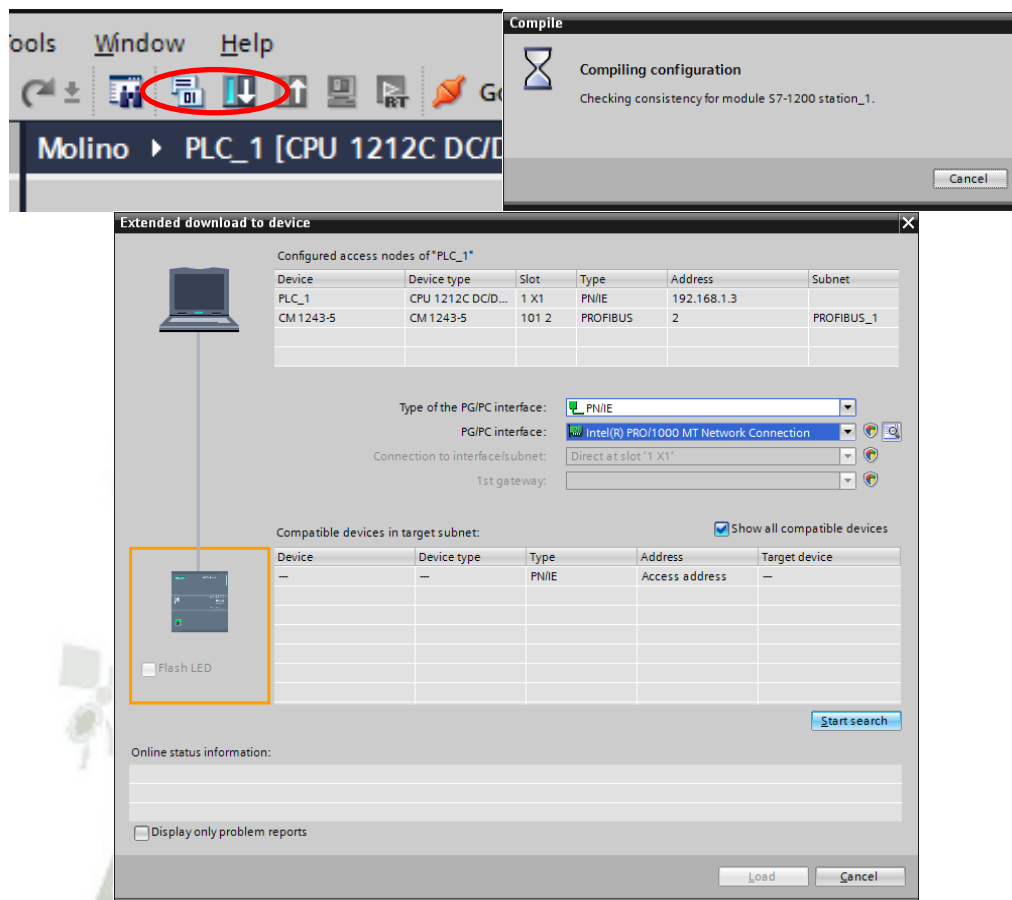


Figura 5.4.11. Procedimiento de compilación y descarga en TIA PORTAL V13
Fuente: Propia.

12. Para la programación del proceso se utilizará el lenguaje Ladder y se desarrolló la siguiente tabla de variables para un mejor entendimiento.

DIRECCIÓN	DESCRIPCIÓN	TIPO
MW0	PALABRA 1 DE MANDO EN MEMORIA	WORD
QW72	PALABRA 1 DE MANDO VARIADOR	WORD
MW1	PALABRA 2 DE MANDO EN MEMORIA	WORD
QW73	PALABRA 2 DE MANDO EN VARIADOR	WORD
MW2	VELOCIDAD REQUERIDA EN MEMORIA	WORD

QW74	VELOCIDAD REQUERIDA EN VARIADOR	WORD
IW76	PALABRA 1 DE ESTADO EN VARIADOR	WORD
MW5	PALABRA 1 DE ESTADO EN MEMORIA	WORD
IW77	PALABRA 2 DE ESTADO EN VARIADOR	WORD
MW6	PALABRA 2 DE ESTADO EN MEMORIA	WORD
IW78	VELOCIDAD REAL EN VARIADOR	WORD
MW7	VELOCIDAD REAL EN PLC	WORD
M4.0	START/STOP	BOOL
M0.2	CONTROL DESDE PLC	BOOL
M1.0	INICIO/PARADA	BOOL
M1.1	STOP ELÉCTRICO OFF2	BOOL
M1.2	STOP RÁPIDO OFF3	BOOL
M1.3	ACTIVAR PULSOS	BOOL
M1.4	ACTIVAR GENERADOR DE RAMPA	BOOL
M1.5	GENERADOR DE RAMPA	BOOL
M1.6	ACTIVAR VALOR DE CONSIGNA	BOOL
MW10	PORCENTAJE DE VELOCIDAD REQUERIDO	WORD
MD50	VELOCIDAD DE VARIADOR TIPO REAL	DWORD
M12.0	SOLICITAR CONSUMO DE CORRIENTE REAL	BOOL
QW64:P	PARÁMETRO ACÍCLICO SELECCIONADO EN VARIADOR	WORD
QW66:P	INDICE DE PARÁMETRO ACÍCLICO SELECCIONADO EN VARIADOR	WORD
QD68:P	VALOR PW1	REAL

IW68:P	LECTURA DE PARÁMETRO EN VARIADOR	WORD
MW13	LECTURA DE PARÁMETRO EN MEMORIA	WORD
IW70:P	LECTURA DE ÍNDICE DE PARÁMETRO EN VARIADOR	WORD
MW14	LECTURA DE ÍNDICE DE PARÁMETRO EN MEMORIA	WORD
ID72:P	LECTURA DE VALOR PW1 EN VARIADOR	DWORD
MD15	VALOR REAL SOLICITADO EN MEMORIA	DWORD
MD1200	VALOR DE CORRIENTE TIPO REAL	DWORD
MD1250	VALOR DE CORRIENTE TIPO DOBLE ENTERO	DWORD
MD52	TIEMPO TRANSCURRIDO EN TIMER DB4 (MAX 1 MIN).	DWORD
I0.0	INGRESO DE SWITCH FÍSICO DE REVOLUCIONES CONTADAS	BOOL
MW55	REVOLUCIONES CONTADAS EN EL MINUTO PRESENTE	WORD
MD58	REVOLUCIONES CONTADAS EN EL MINUTO PRESENTE TIPO REAL	DWORD
MD68	PRE-RPM	REAL
MD100	RPM FINAL	REAL
MW1780	RPM FINAL ENTERO	WORD
M2000.1	ACTIVAR FEEDER	BOOL
MD400	GRAMOS A INGRESAR	DWORD
MD404	TIEMPO DE ACTIVACIÓN DE FEEDER	DWORD

Q0.0	MOTOR FÍSICO DE ALIMENTACIÓN FEEDER 24 VDC	BOOL
PID COMPACT 1	BLOQUE PID ENCARGADO DE CONTROL	CONTROLADOR
MD416	SP2 EN RPM	DWORD
MW1600	SP2 EN RPM EN ENTERO	WORD
M4.5	ACTIVAR CONTROL ADAPTATIVO	BOOL
MD2100	KC PARA INTOUCH	DWORD
MD2104	TI PARA INTOUCH	DWORD
MD2108	TD PARA INTOUCH	DWORD
MD956	CORRIENTE CONSUMIDA POR EL VARIADOR TIPO REAL	DWORD
MD960	POTENCIA CONSUMIDA POR VARIADOR TIPO REAL	DWORD
MD1100	ENERGÍA ELÉCTRICA USADA EN REAL	DWORD

Tabla 5.4.1. Variables de proceso requeridas para programación en TIA PORTAL
Fuente: Propia.

13. El programa completamente desarrollado se encuentra en el ANEXO 1 – Programa de control Ladder Siemens Molino; en la imagen 6.2.13 encontramos la programación de escritura de palabras de mando en el PLC.

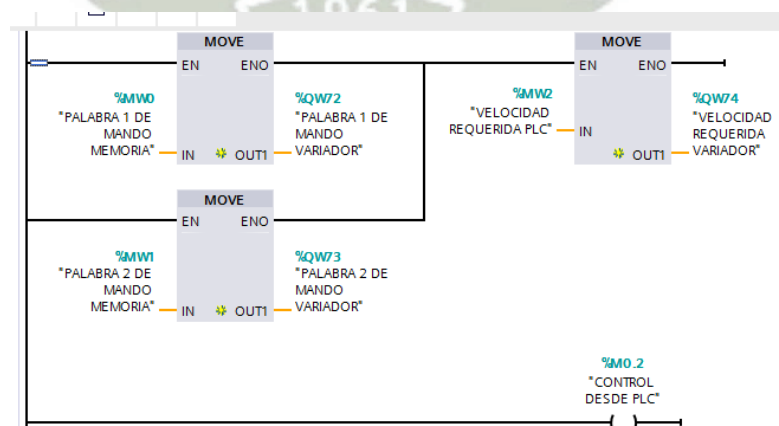
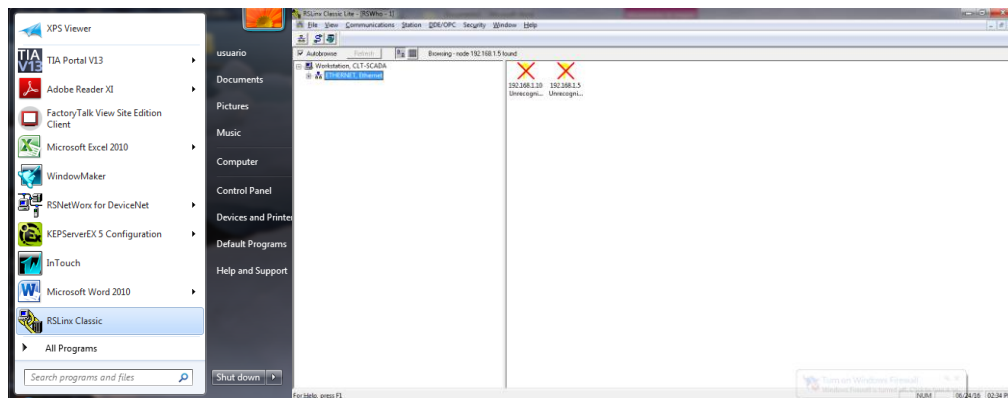


Figura 5.4.13. Ladder escritura de palabras de mando en variador
Fuente: Propia.

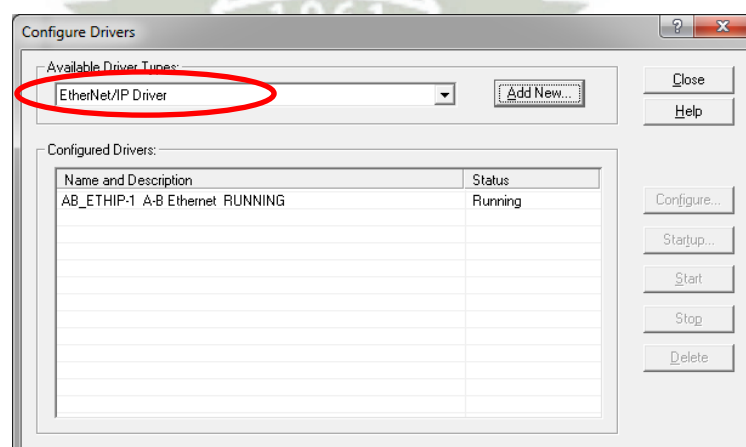
5.5 CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE PLC Allen Bradley Compact Logix.

1. Para nuestra aplicación contamos con el software Rockwell Studio v20.1; en un inicio para poder enlazar nuestra PC con el PLC abriremos el RSLINX.



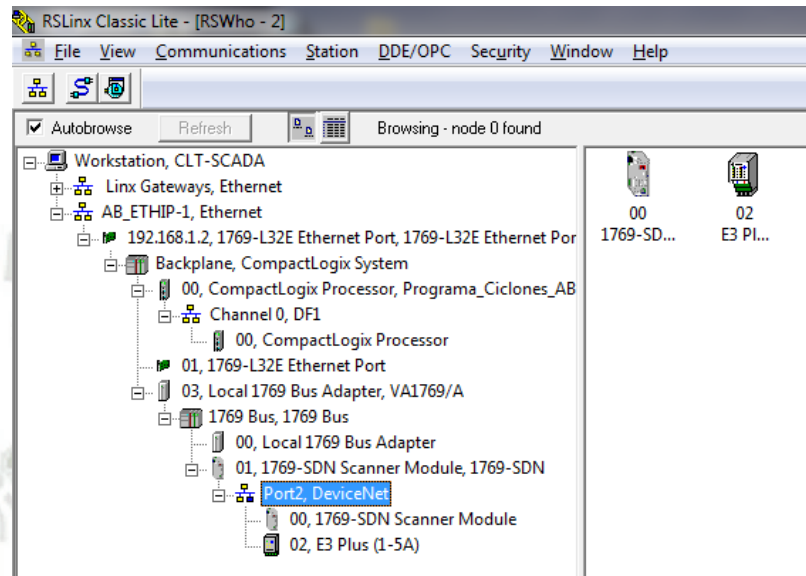
*Figura 5.5.1. Ventana de apertura de RSLINX
Fuente: Propia.*

2. Dentro del RSLINX configuraremos en driver de comunicación que existe entre nuestro controlador y nuestra PC, en este caso se trata del driver Ethernet/IP Driver; ya que nuestra comunicación se realiza dentro de un protocolo Ethernet industrial; como referencia, nuestro ordenador tiene la dirección IP 192.168.1.4 y nuestro PLC tiene la dirección 192.168.1.2.



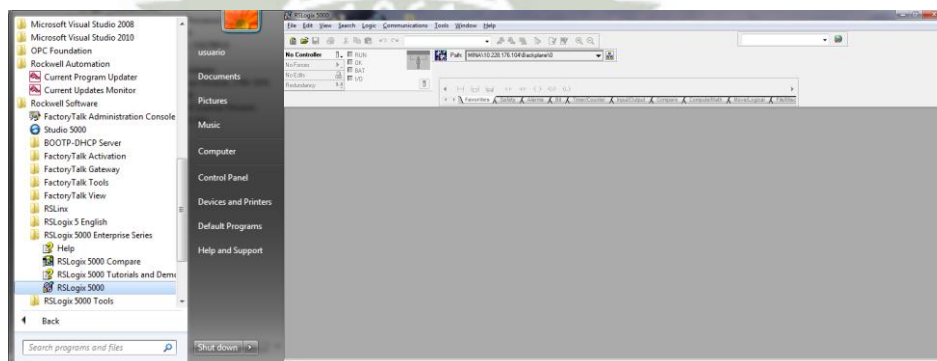
*Figura 5.5.2. Configuración de Driver de comunicación en RSLINX
Fuente: Propia.*

- De haber realizado la configuración correcta, RSLINX no mostrará un árbol de los dispositivos conectados como se observa en la figura 5.5.3.



*Figura 5.5.3. Dispositivos conectados vía Ethernet a nuestra PC
Fuente: Propia.*

- Una vez que la comunicación es estable; procederemos a realizar la configuración de los módulos que integran nuestro PLC y acto seguido a realizar la programación correspondiente; para ellos accedemos al software RSLOGIX5000.



*Figura 5.5.4. Ventana de apertura de RSLOGIX5000.
Fuente: Propia.*

- Realizaremos la creación de un nuevo proyecto y acto seguido agregaremos el módulo de comunicación 1769-SDN Scanner Devicenet para esta gama de controladores.

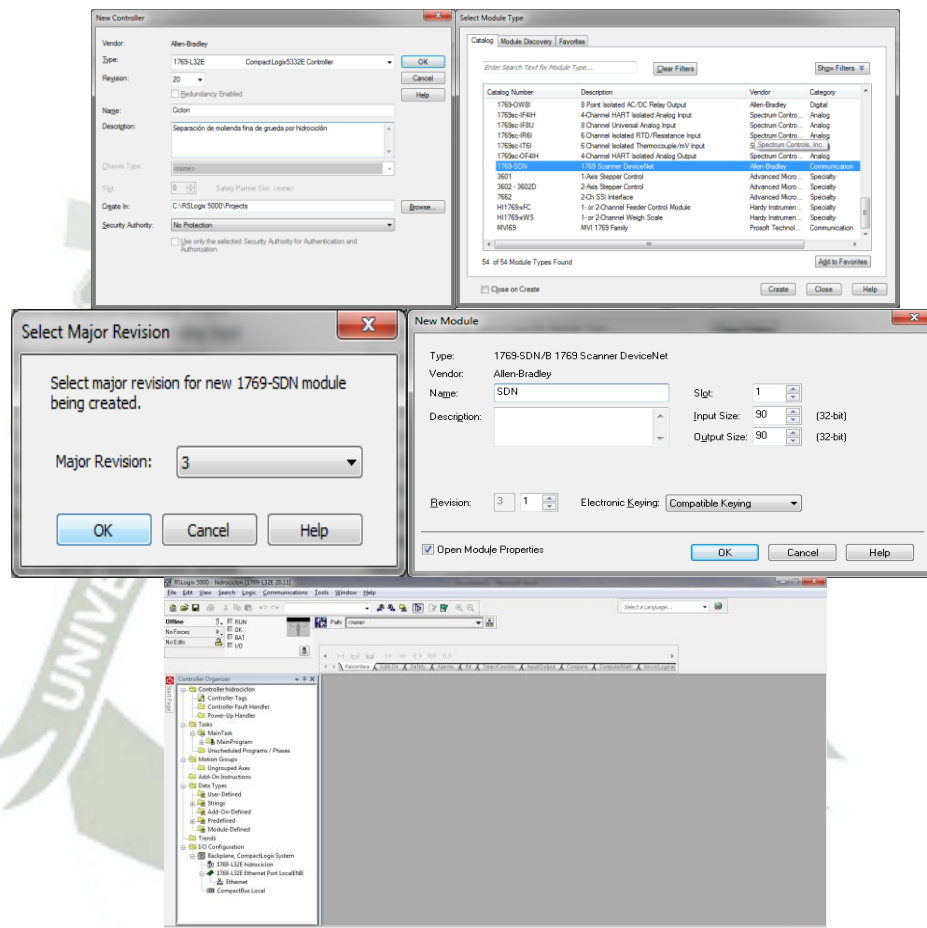


Figura 5.5.5. Apertura de nuevo proyecto y configuración de módulo de comunicación Devicenet en RSLOGIX5000
Fuente: Propia.

- Para proseguir debemos compilar y descargar las configuraciones realizadas.
- Finalmente, es necesario mapear los dispositivos que se hallan en nuestra red Devicenet; para nuestro caso debemos mapear el Relé E3PLUS; para ello usaremos el software RSNETWORKX for Devicenet

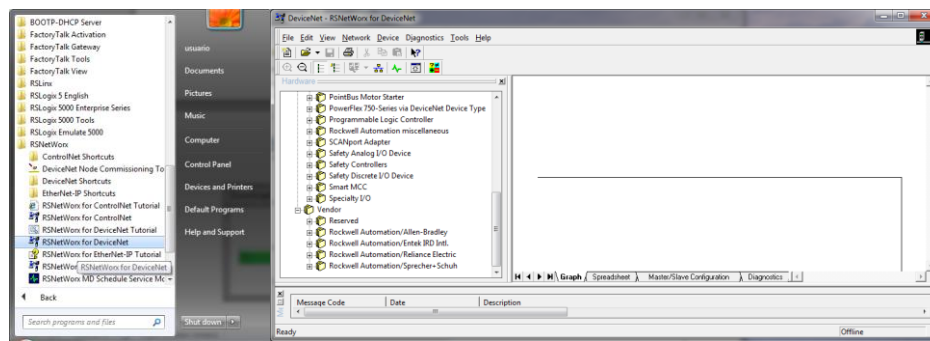


Figura 5.5.6. Ventana de apertura de RSNETWORX for Devicenet
Fuente: Propia.

8. Dentro del programa; primero es necesario realizar un escaneo de la red; para esto debemos fijar un path de escaneo, ir a modo online y esperar a que se halle nuestro dispositivo de campo.

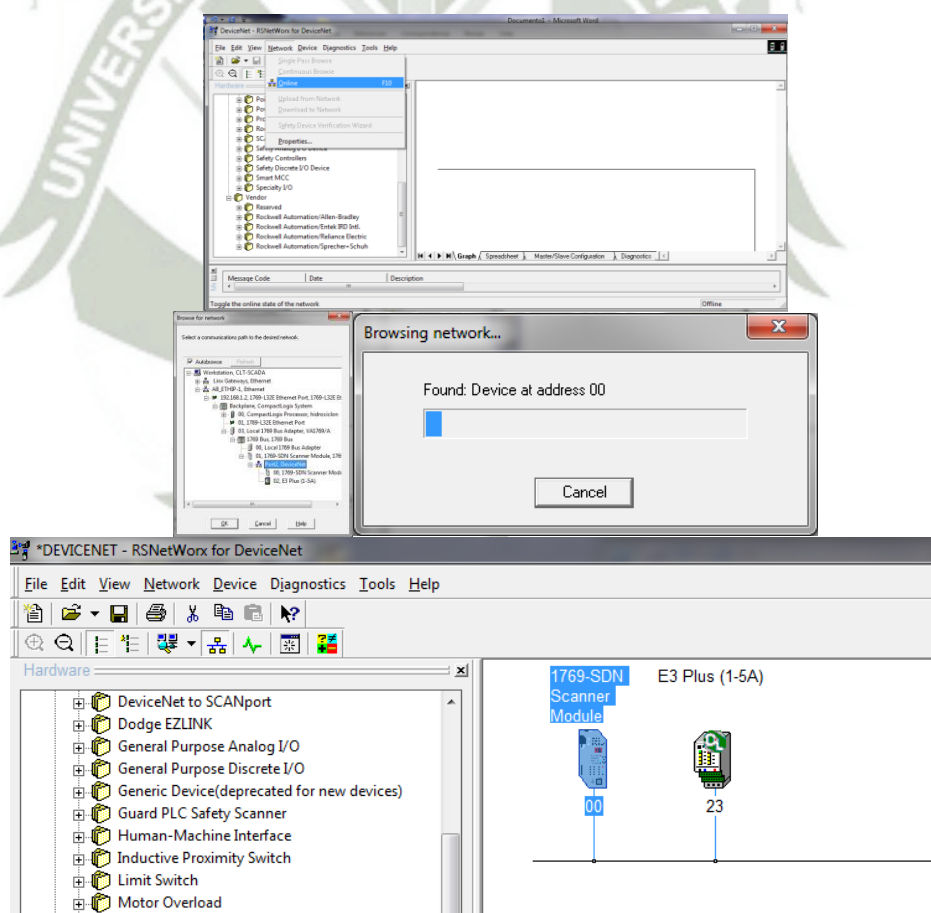


Figura 5.5.7. Procedimiento de escaneo de dispositivos en RSNETWORX for Devicenet.

Fuente: Propia.

9. La importancia de entrar a este programa radica en que en el configuraremos los parámetros de nuestro relé E3plus y podremos realizar el direccionamiento de bits necesario para la programación.

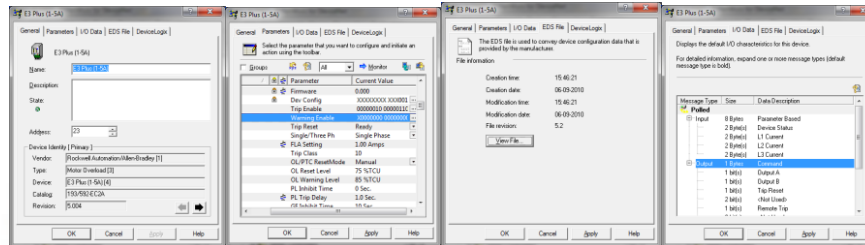


Figura 5.5.8. Configuración de parámetros de relé E3PLUS en RSNETWORX
Fuente: Propia.

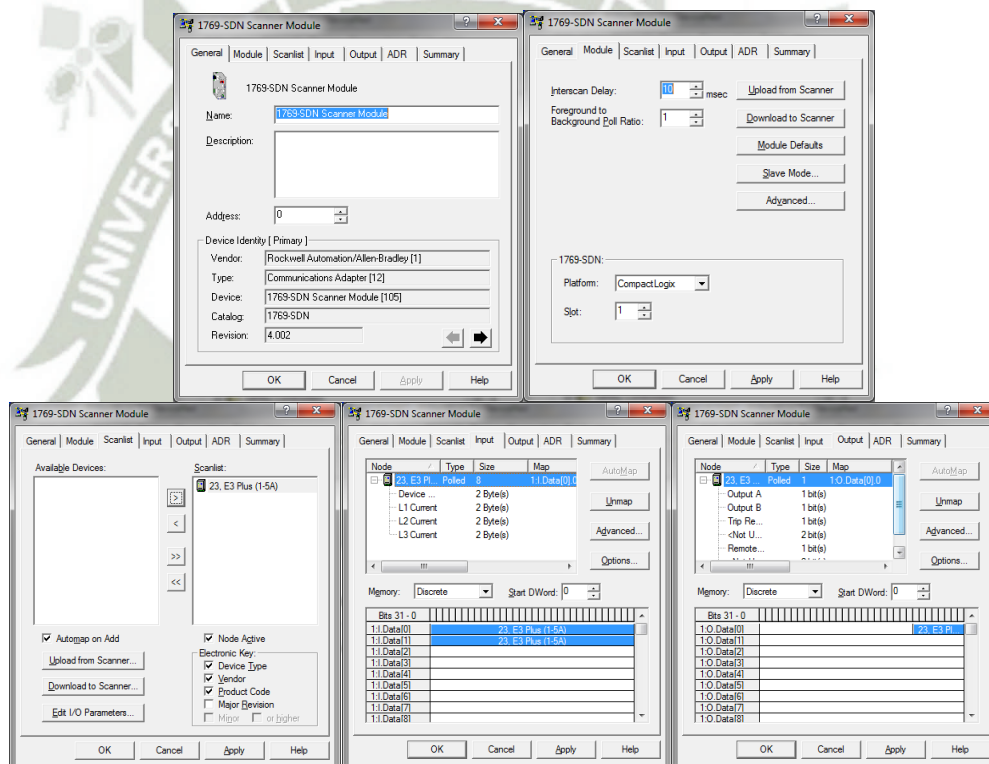


Figura 5.5.9. Direccionamiento de entradas y salidas de relé E3PLUS en módulo de comunicación Devicenet.
Fuente: Propia.

14. Para la programación del proceso se utilizará el lenguaje Ladder y se desarrolló la siguiente tabla de variables para un mejor entendimiento.

DIRECCIÓN	DESCRIPCIÓN	TIPO
AB	ARRANQUE DE ESTAPA DE HIDROCILÓN	BOOL
ENACUMULADA	CONSUMO ACUMULADO EN WS.	REAL
LAESC	CONSUMO DE CORRIENTE PROMEDIO ESCALADA	REAL
Local:1:I.Data[0].4	SWITCH DE NIVEL BAJO NC	BOOL
Local:1:I.Data[0].5	SWITCH DE NIVEL ALTO NC	BOOL
Local:1:O.Data[0].0	BOMBA DE HIDROCICLÓN	BOOL

Tabla 5.5.1. Variables de proceso requeridas para programación en RSDLOGIX5000

Fuente: Propia.

15. El programa completamente desarrollado se encuentra en el ANEXO 2 – Programa de control Ladder Rockwell Hidrociclón.

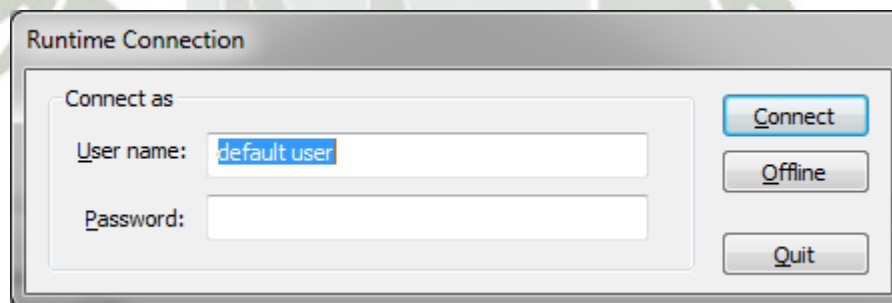
5.6 CONFIGURACIÓN DE SERVIDOR OPC KEPSERVER-EX.

1. El programa KEPSERVER-EX versión 5.0 es un servidor OPC, por medio del cual podemos enlazar equipos de diferentes marcas y fabricantes con el fin de implementar un DCS; esto debido a que algunas marcas ofrecen ciertas ventajas sobre otras y muchas veces su hardware y software no son compatibles entre sí; dentro de estos servidores se encuentra los drivers de comunicación entre uno y otro dispositivo; es así que tenemos los siguientes equipos con los siguientes medios y protocolos de comunicación.

- a. PLC Allen Bradley, modelo Compact Logix, procesador L32E, protocolo de comunicación Ethernet, medio de comunicación cable UTP.
- b. PLC Siemens, modelo S7-1200, procesador 1212C, protocolo de comunicación PROFINET, medio de comunicación cable UTP.

5.6.1 KEPSERVER-EX Siemens.

6. Se ejecutará el programa con compatibilidad a Windows XP SP3 y en modo administrador.
7. Al iniciar el programa se ingresará el usuario “default user” y en password se colocará cualquier cosa; en nuestro caso lo dejaremos en blanco; recordemos que nuestro software es de prueba, y por lo tanto el enlace se mantendrá solo por dos horas, después de esto es necesario reiniciar la máquina virtual.



*Figura 5.6.1.1. Ingreso de usuario y contraseña en KEPSERVER-EX
Fuente: Propia.*

8. En este programa debemos manejar dos conceptos básicos; el del canal y el de dispositivo. En el canal seleccionamos el driver mas adecuado para nuestro dispositivo y en el dispositivo especificamos la configuración de nuestro PLC.

9. En los siguientes screenshots desarrollamos la correcta configuración de canal para comunicar un dispositivo Siemens con adaptador PROFINET.

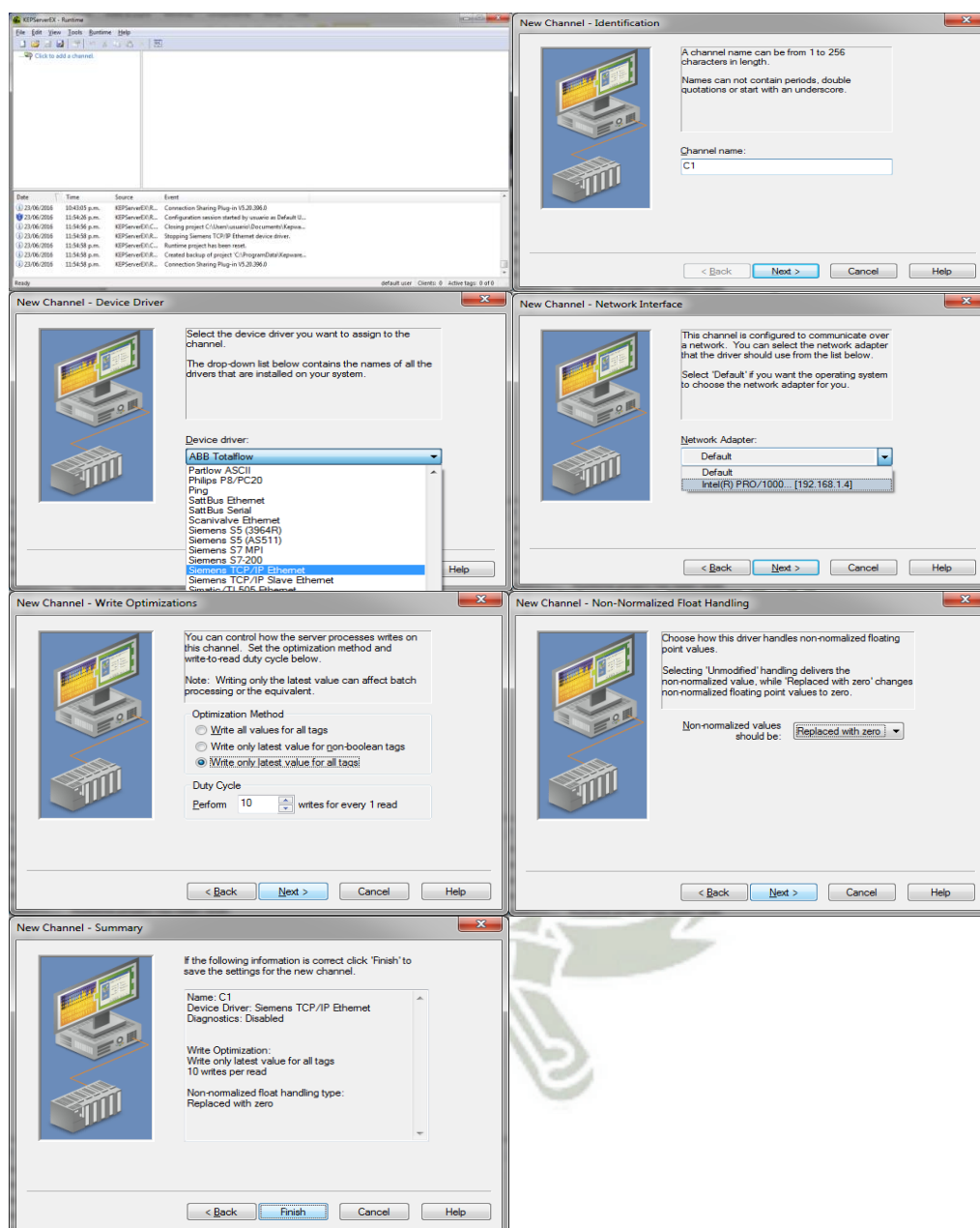
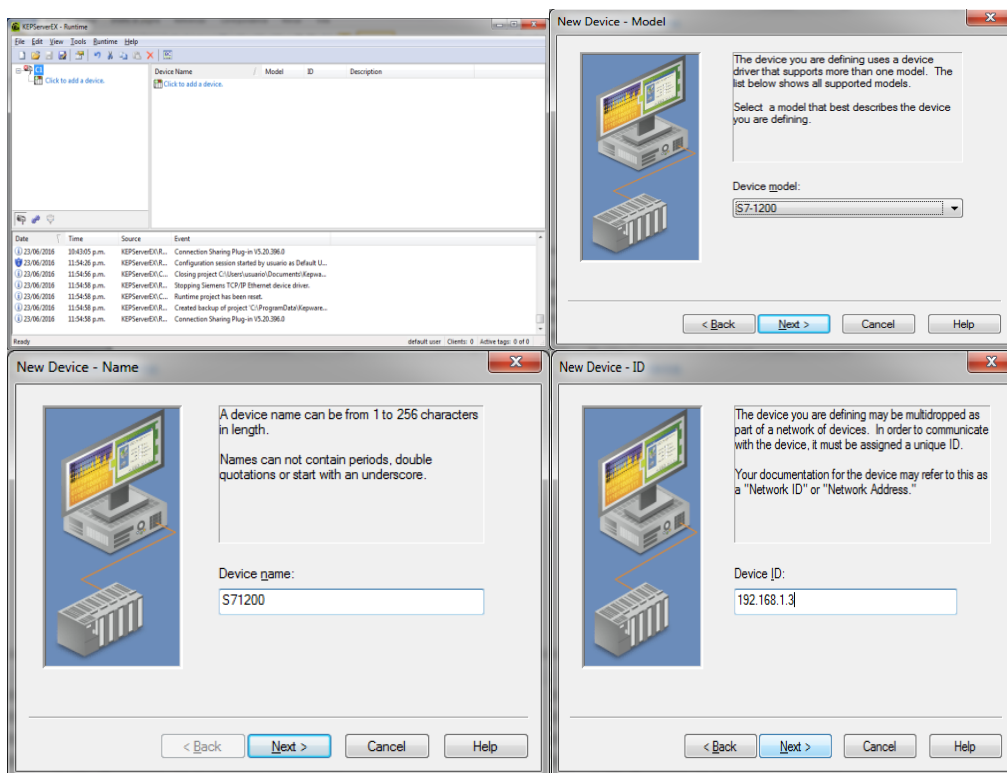
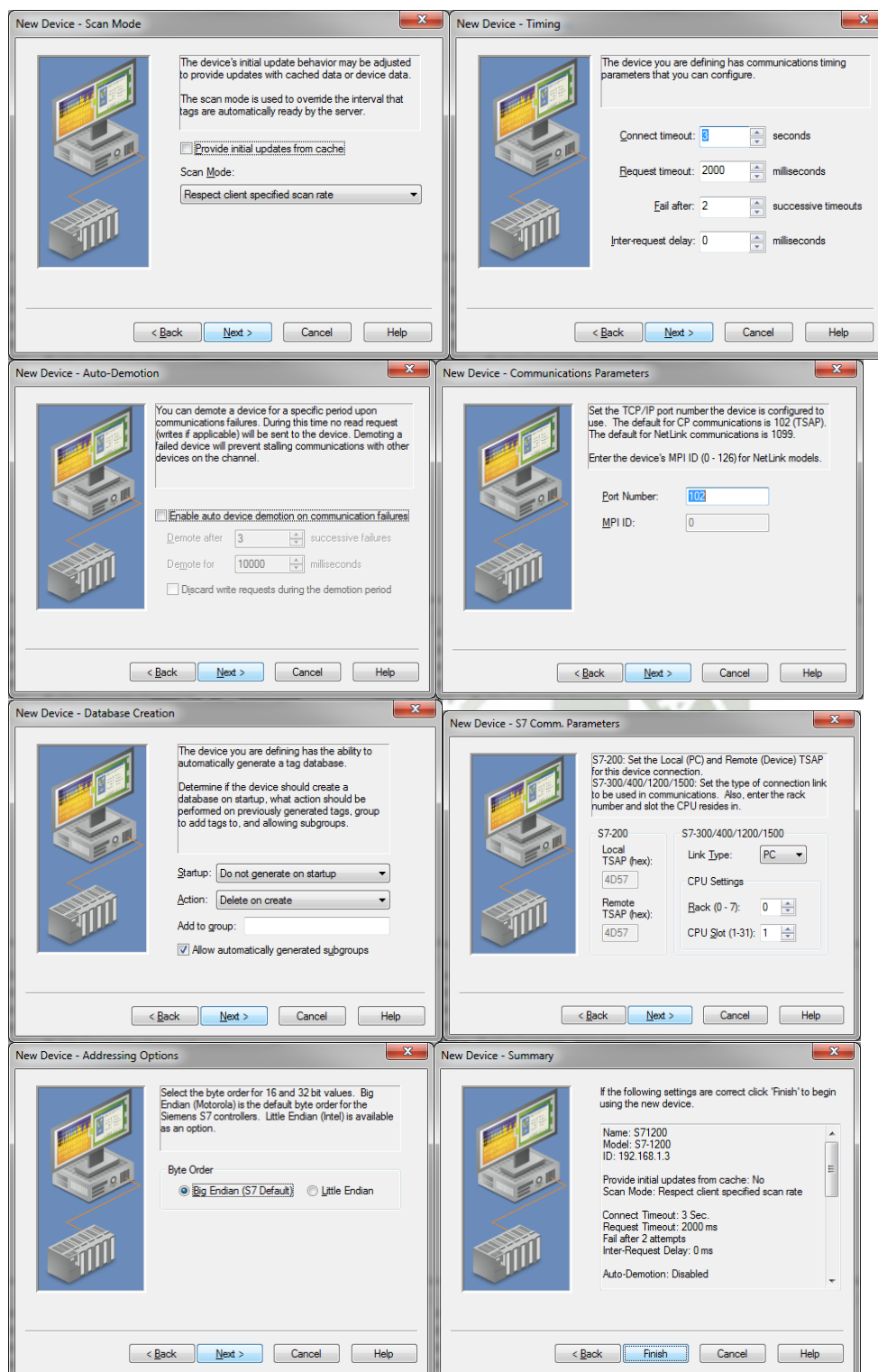


Figura 5.6.1.2. Configuración de canal en KEPSERVER-EX para un dispositivo Siemens con adaptador PROFINET.

Fuente: Propia.

10. En los siguientes screenshots desarrollamos la correcta configuración del dispositivo – PLC Siemens S7-1200 en el servidor KEPSERVER-EX





*Figura 5.6.1.3. Configuración de dispositivo en KEPSERVER-EX para un PLC Siemens S7-1200.
Fuente: Propia.*

11. Se crearán cada uno de los TAG que sea necesario monitorear en nuestro panel de operador.

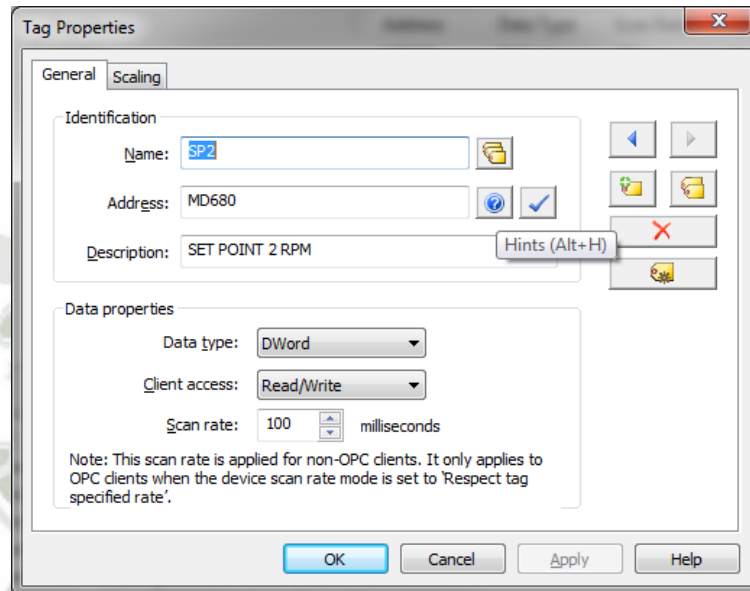


Figura 5.6.1.4. Creación de TAG para cada variable necesaria en panel de operador.

Fuente: Propia.

12. Se verificará el estado del enlace en cada uno de los TAG creados

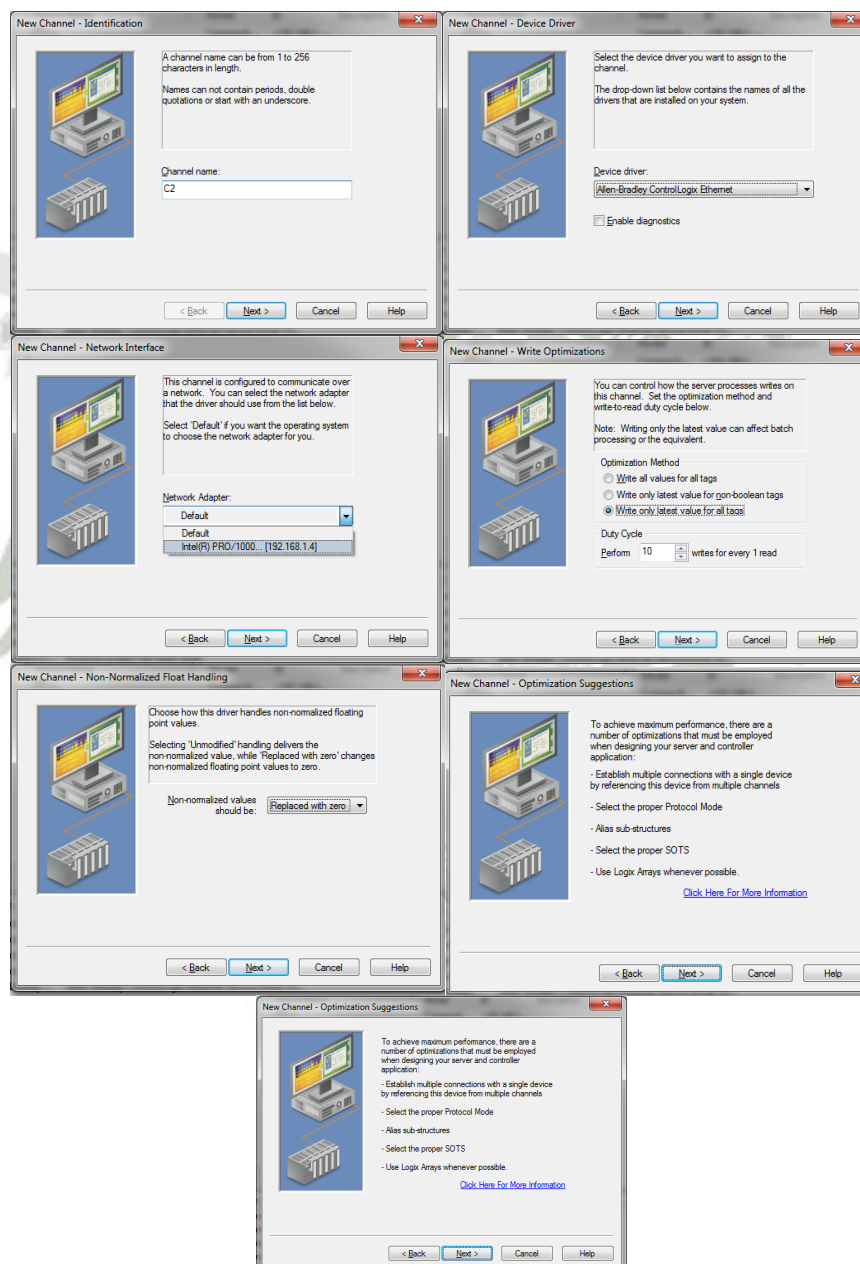
Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
SP2	MD680	DWord	100	None	SET POINT 2 RPM
RPM	MD610	DWord	100	None	REVOLUCIONES POR MINUTO
GM	MD70	DWord	100	None	GRAMOS A MOLER
FA	M102.0	Boolean	100	None	FEEDER ACTIVADO
CV	MW10	Word	100	None	CAPACIDAD VARIADOR 0-100
AV	M30.0	Boolean	100	None	ACTIVAR VARIADOR
AR	M110.0	Boolean	100	None	ACTIVAR RAMPA
AL	M910.0	Boolean	100	None	ACTIVAR LAZO
AF	M200.0	Boolean	100	None	ACTIVAR FEEDER

Figura 5.6.1.5. Verificación del enlace en cada uno de los TAG creados en KEPSERVER-EX.

Fuente: Propia.

5.6.2 KEPSERVER-EX Allen Bradley.

1. Los pasos 1 y 2 del título anterior son iguales.
2. Para la selección de canal se realizará la siguiente configuración; siempre tomando en cuenta que tratándose de otro fabricante, no se debe suponer que los drivers ni las opciones sean las mismas que en el título anterior.



*Figura 5.6.2.1. Configuración de canal para Allen Bradley Ethernet Driver en KEPSERVER-EX
Fuente: Propia.*

3. Ahora configuramos el dispositivo como CompactLogix 5300.

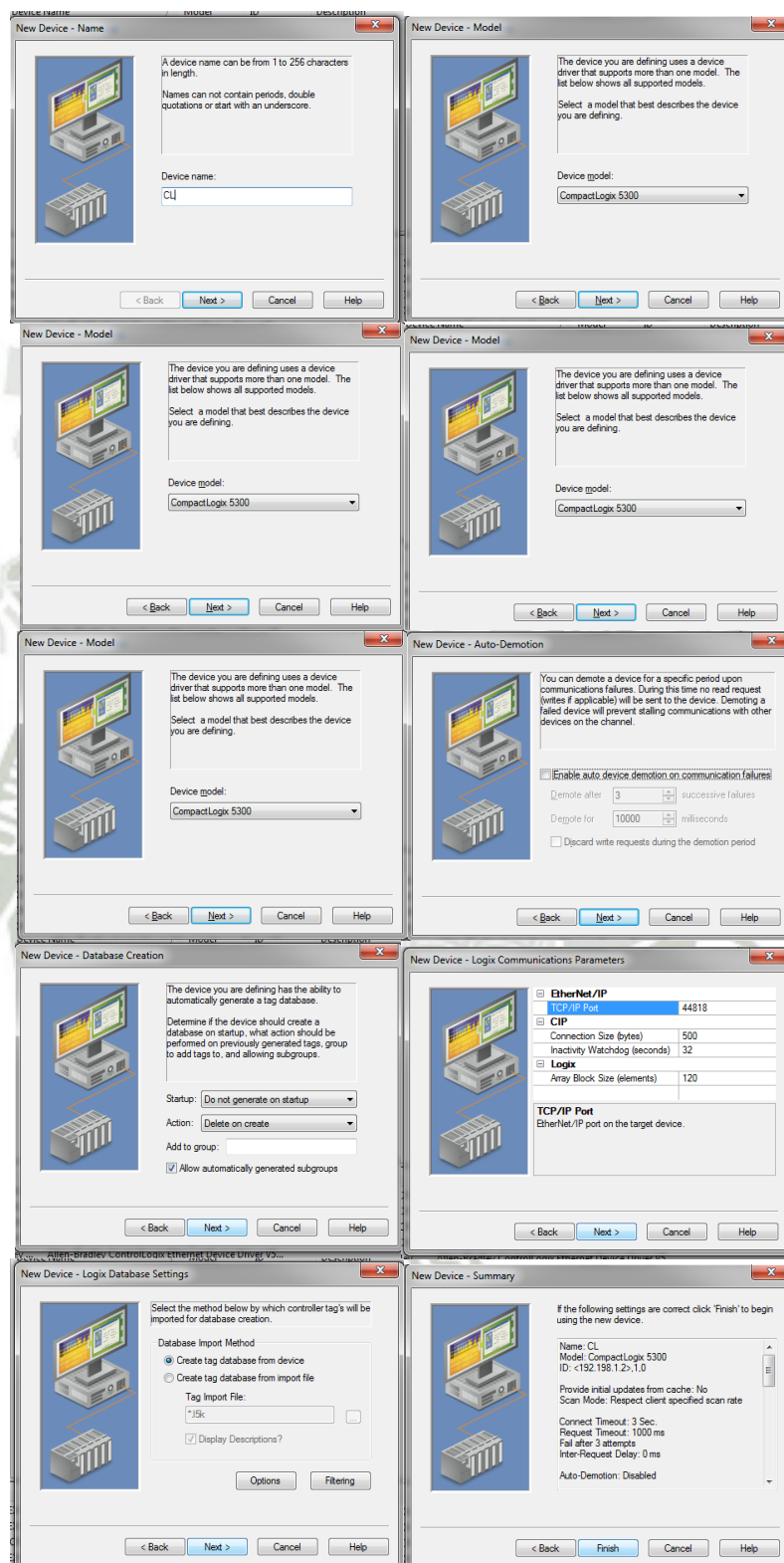


Figura 5.6.2.2. Configuración de dispositivo CompactLogix en KEPSERVER-EX
Fuente: Propia.

4. Finalmente es momento de agregar los tag descritos en la tabla 6.3.1 y probarlos online, recordemos que se trata de una versión demo; y para todo tenemos 2 horas; luego de esto será necesario reiniciar nuestra PC.

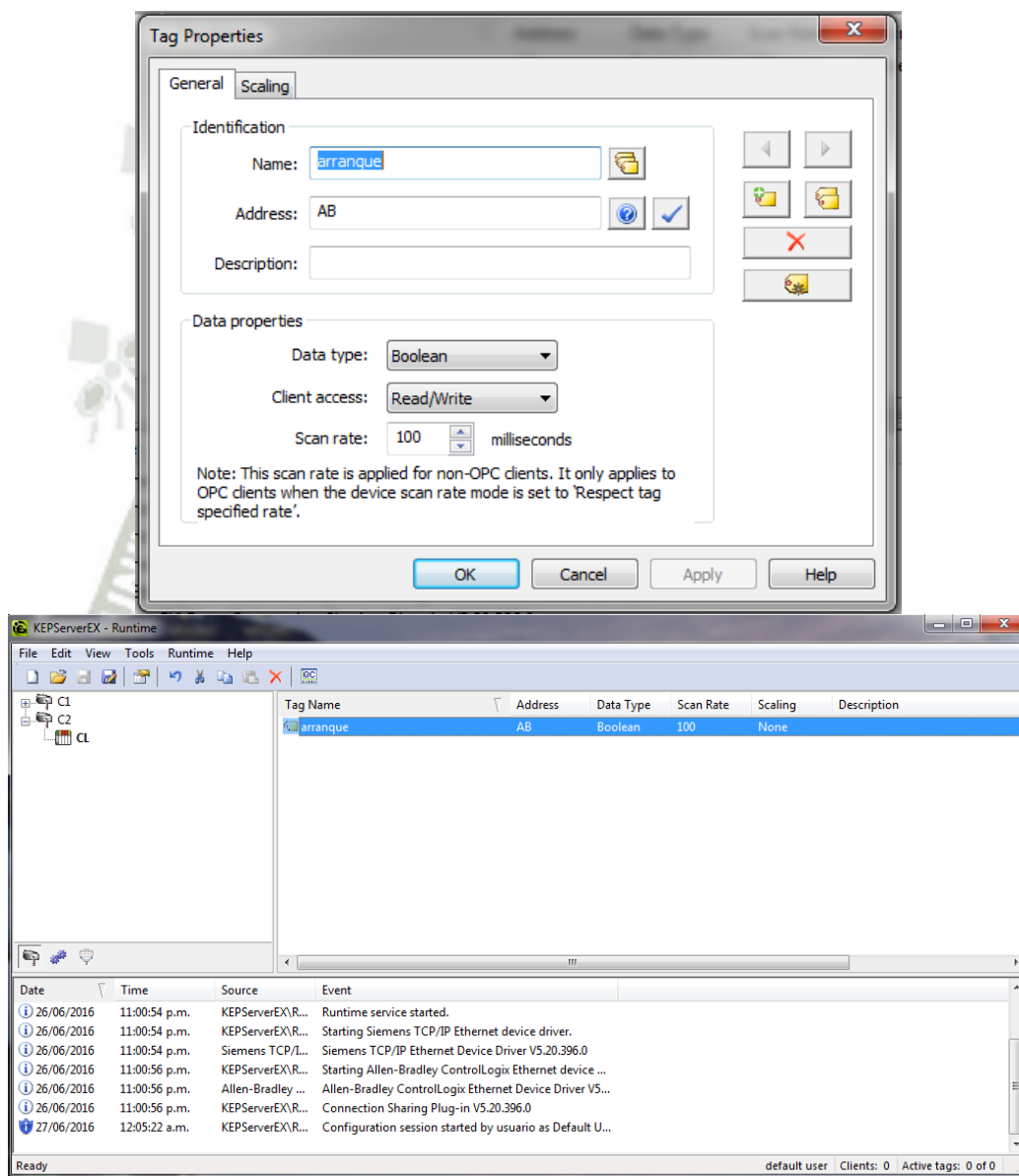
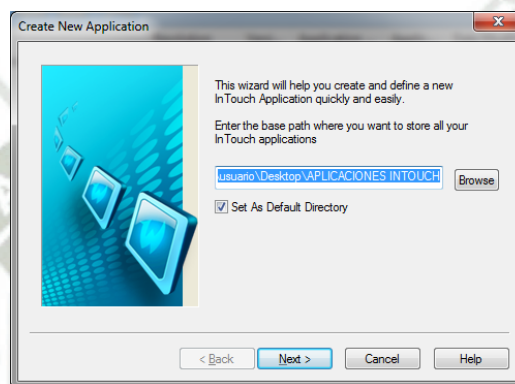


Figura 5.6.2.3. Configuración y prueba de TAG creados en KEPSERVER-EX.
Fuente: Propia.

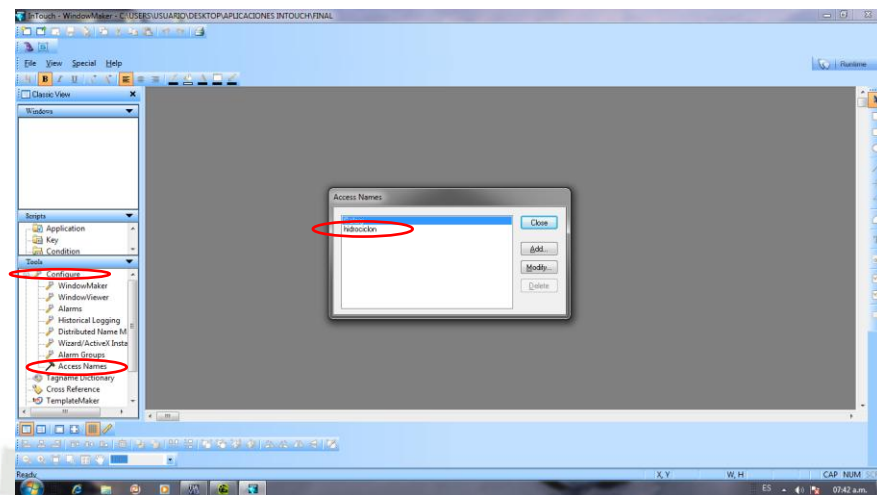
5.7 CONFIGURACIÓN DE SISTEMA DE MONITOREO Y ENTORNO GRÁFICO EN INTOUCH

1. Como software hemos seleccionado el programa INTOUCH en su versión 10.0; antes de comenzar a realizar cualquier configuración debemos cerciorarnos que el programa corra como administrador; de otro modo el enlace con KEPSERVER-EX no será posible, después de ello se creará un nuevo proyecto.



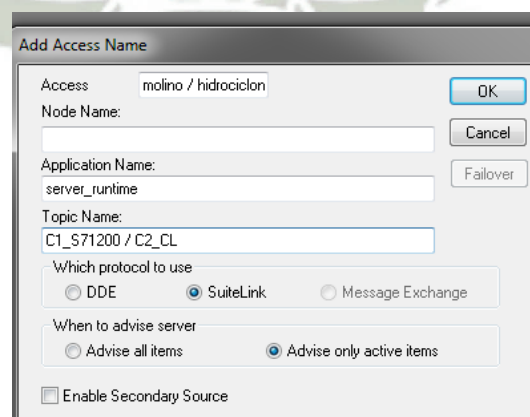
*Figura 5.7.1. Ventana de creación de proyecto INTOUCH.
Fuente: Propia.*

2. Lo primero que debemos hacer es crear el enlace con KEPSERVER-EX; para ello vamos al menú de tolos en la esquina inferior izquierda; seleccionamos la opción configure, dentro de ella se encuentra la opción Access Names, hacemos doble click y se nos abre una ventana de diálogo, donde deben figurar cada uno de nuestros enlaces; en este caso crearemos 2; un llamado “hidrociclón” para la interfaz con el PLC compactLogix L32E y el otro llamado “molino” para la interfaz con el PLC Siemens S7-1200.



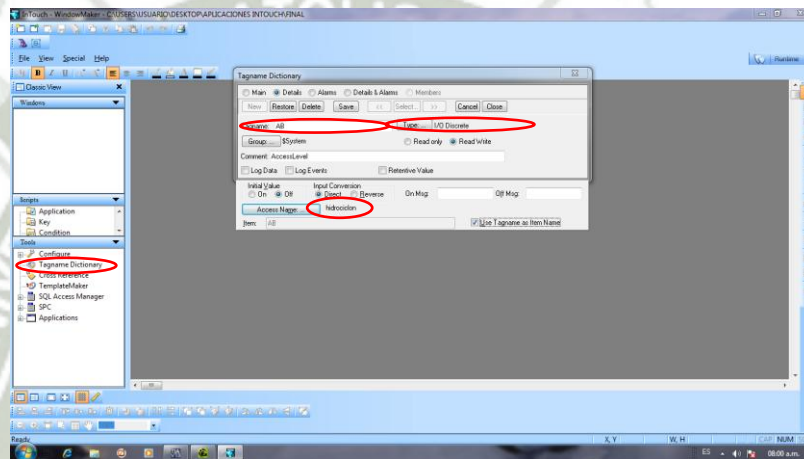
*Figura 5.7.2. Ventana de diálogo para creación de enlaces OPC en INTOUCH.
Fuente: Propia.*

3. Dentro de la ventana de diálogo seleccionaremos la opción ADD para crear nuestro enlace; se nos mostrará la ventana de la figura 5.7.3; en “Access” colocaremos el nombre que mejor se nos dé, en “Application Name” colocaremos “server_runtime” ya que este es el ejecutable de nuestro programa KEPSERVER-EX y en “topic name” colocaremos los nombres mostrados en la imagen 5.7.3; que no es otra cosa que el “canal_dispositivo” creados en KEPSERVER-EX.



*Figura 5.7.3. Ventana de creación de enlaces OPC entre INTOUCH y
KEPSERVER-EX.
Fuente: Propia.*

4. Ahora se crearán los tag, tal cual se crearon en KEPSERVER-EX, para ello no enfocamos en la paleta tools, opción “Tagname Directory”; en la cual se nos abre una ventana de diálogo, en ella debemos agregar TAG por TAG creado, con el mismo nombre que figura en KEPSERVER-EX, después determinar que tipo de variable es, enlazarlo con el servidor OPC “Acces Name” que corresponda y guardar cada uno; si todo se hizo de acuerdo a los descrito los enlaces deben estar establecidos.



*Figura 5.7.4. Ventana de creación de TAG en INTOUCH.
Fuente: Propia.*

5. Finalmente se creará el entorno gráfico de monitoreo de acuerdo a lo lineamientos de INTOUCH; en nuestro caso hablamos de una sola ventana donde se colocan las opciones de control del molino y las opciones de control del hidrociclón de acuerdo a la imagen 5.7.5.

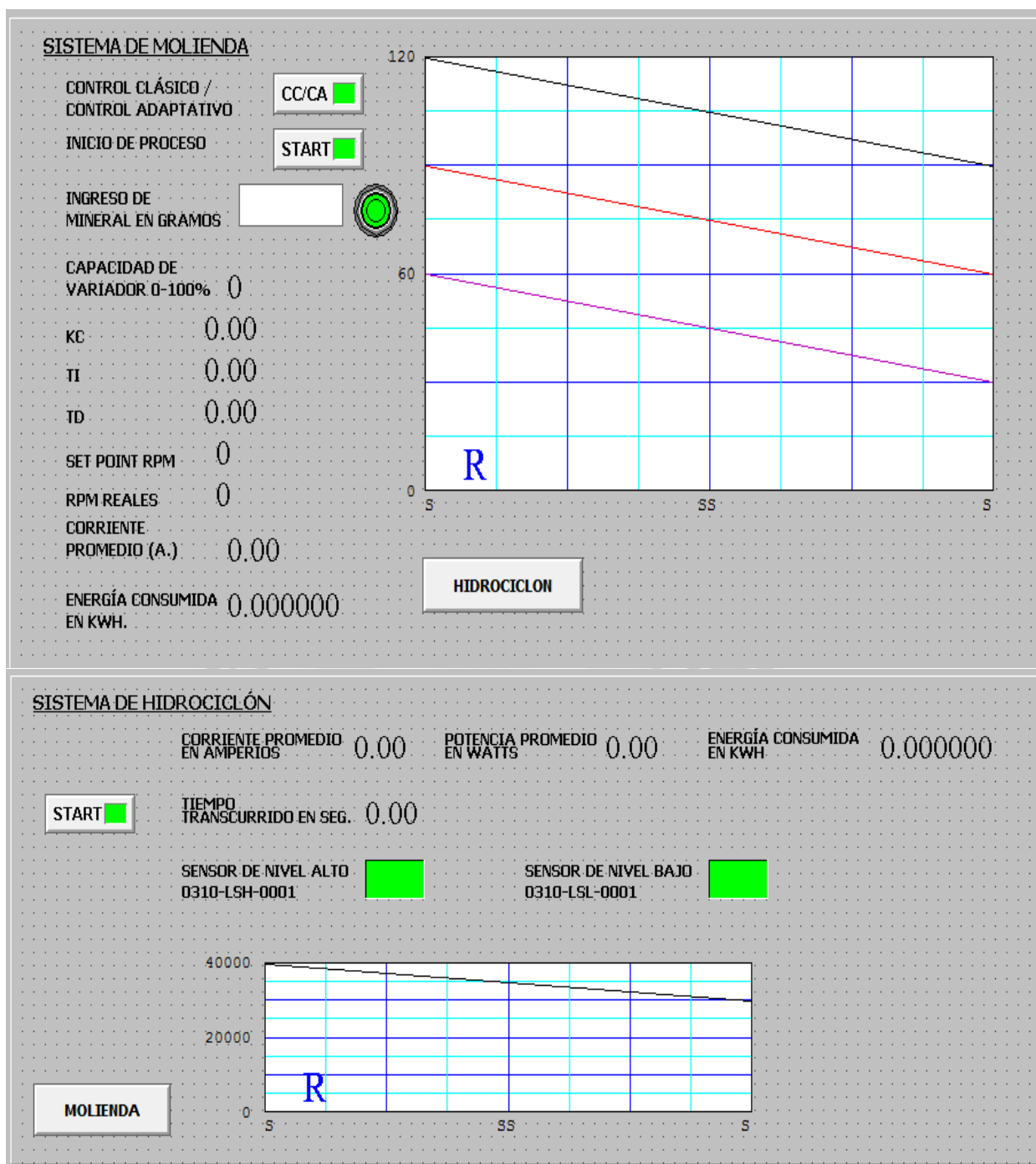


Figura 5.7.5. Ventana de entorno de monitoreo en INTOUCH
Fuente: Propia.



**CAPITULO VI: EXPERIMENTACION E INTERPRETRACION DE
RESULTADOS**

6.1 SEGMENTACIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Nuestro procedimiento experimental consistirá en lo siguiente:

- Verificación de entradas y salidas de campo y PLC (Hardware).
- Respuesta de planta a la señal tipo rampa en lazo abierto.
- Respuesta de planta a las señales tipo escalón en lazo abierto.
- Cálculo de parámetros de control PID según Ziegler-Nichols.
- Afinamiento de parámetros por método experimental.
- Resultados de muestreo

6.1.1 Verificación de entradas y salidas de campo y PLC.

Esta verificación se realizó entre las entradas y salidas de campo y los PLC utilizados.

- Siemens S7-1200 1212C RL/RL/RL.
 - Lazo entre variador Micromaster 420 con conexión PROFIBUS DP y módulo de comunicación maestro CM 1243-5 – CORRECTO.
 - Lazo entre motor alimentador (feeder) de 24 VDC y PLC Siemens S7-1200, con conexionado de relé de 24 VDC, 10A para protección de PLC – CORRECTO.
 - Lazo entre limit switch encargado de conteo de revoluciones de molino y PLC Siemens S7-1200 de manera directa – CORRECTO.

- Allen Bradley CompactLogix L32E
 - Lazo entre relé de protección de motor E3-PLUS con conexión DEVICENET y módulo de comunicación 1769-SDN – CORRECTO.
 - Lazo entre bomba de 220 VAC monofásica y relé de protección de motor E3-PLUS, con conexionado de contactor de 220 VAC, 30A para protección de contacto de salida de relé E3-PLUS.
 - Lazo entre limit switch de nivel alto encargado de proteger el tanque de bombeo de derrames y relé de protección de motor E3-PLUS de manera directa – CORRECTO.
 - Lazo entre limit switch de nivel bajo encargado de proteger el motor en caso de bombeo en vacío y relé de protección de motor E3-PLUS de manera directa – CORRECTO.

6.1.2 Respuesta de la planta a la señal tipo rampa en lazo abierto.

Para poder observar la respuesta de nuestra planta en lazo abierto, con ayuda de un timer se creó una función de excitación a la variable de control, la cual hace variar de manera lineal al tag “cv” durante un periodo de tiempo de 180 segundos, originándose así una función tipo rampa con la siguiente relación:

$$y = \frac{5}{9}x$$

Fórmula 6.1.2.1

Donde

y = capacidad de funcionamiento de variador escalada de 0 – 100%

x = tiempo indicado en segundos

El resultado obtenido en el trend del sistema de monitoreo fue el siguiente:

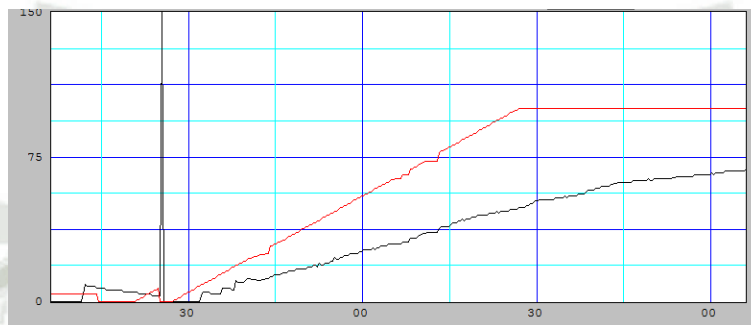


Figura 6.1.2.1. Señal de excitación tipo rampa y respuesta de variable de control en lazo abierto
Fuente: Propia.

Donde:

- La línea roja es la variable de control con tag intouch “cv” capacidad de variador de 0 a 100%
- La línea negra es la variable controlada con tag intouch “rpm” revoluciones por minuto.

Dentro de la variable controlada resaltamos su respuesta con respecto a la función rampa y obtenemos la siguiente línea de tendencia donde claramente podemos identificar 5 zonas estables; y por lo tanto 5 zonas con parámetros de control distintos.

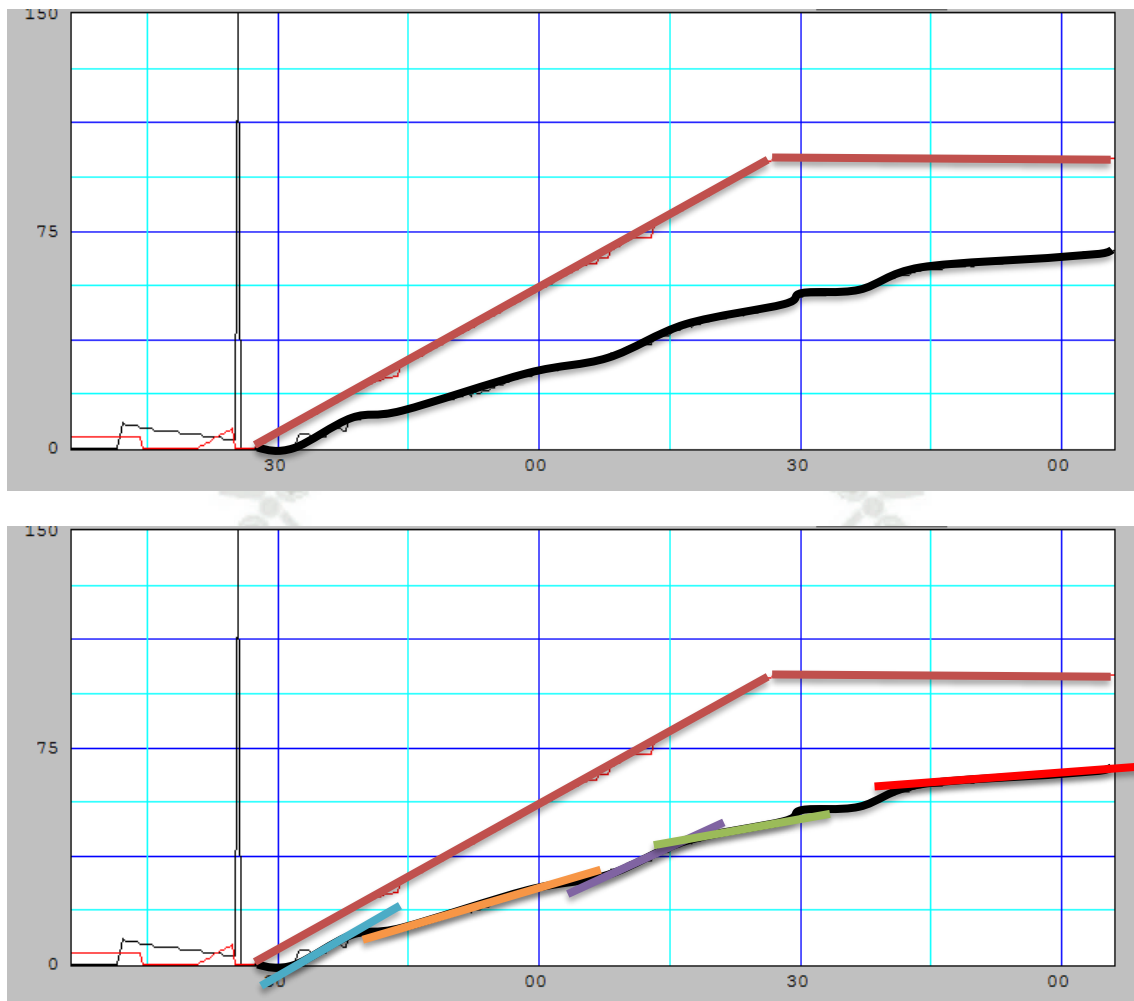


Figura 6.1.2.2. Línea de tendencia y zonas de confort para evaluación de parámetros de control PID
Fuente: Propia.

Se observa que cada línea de distinto color, celeste, naranja, morado, verde y rojo manifiesta un comportamiento diferente (línea con pendiente diferente) de acuerdo a la respuesta de la planta a la función tipo rampa.

Después se escalaron los resultados en hojas milimétricas para obtener numéricamente las zonas de confort.

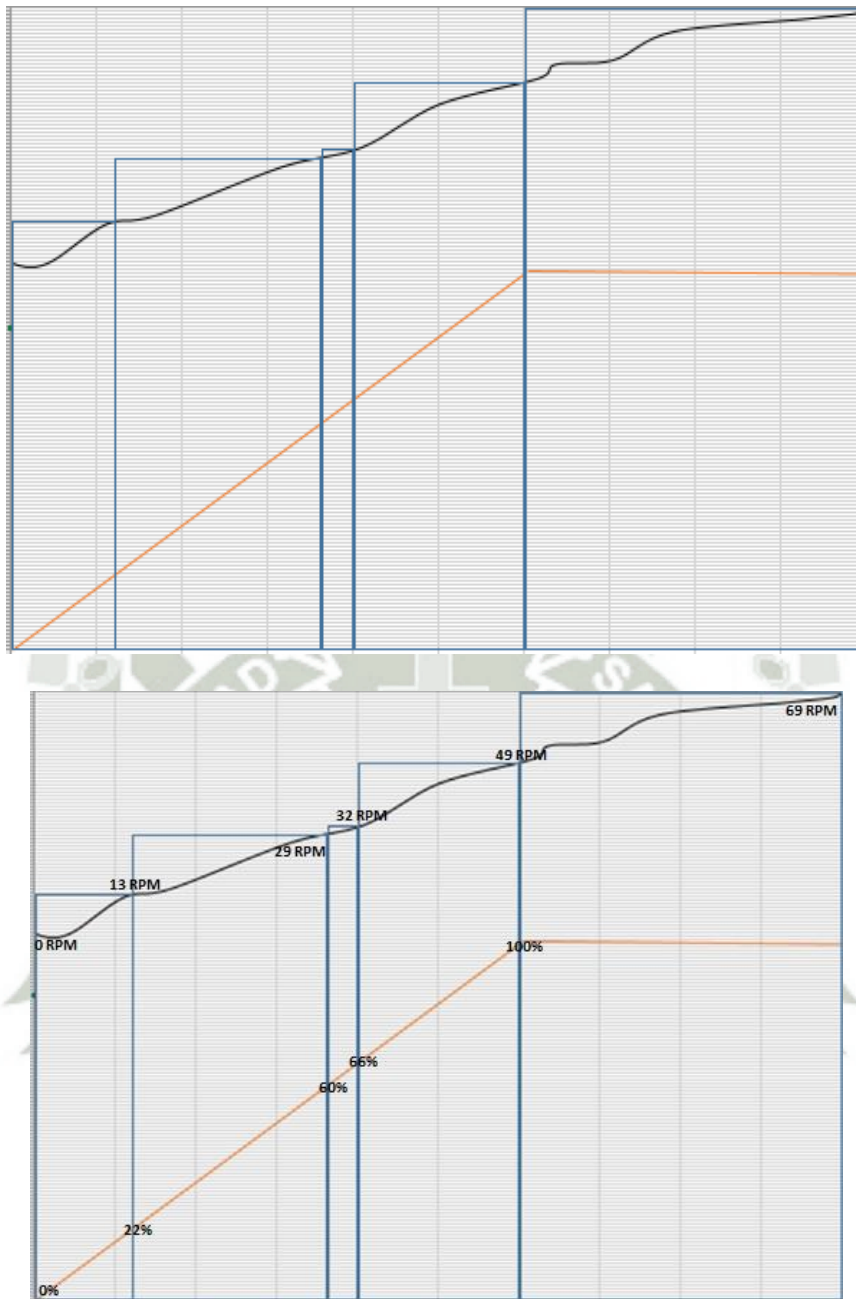


Figura 6.1.2.3. Líneas de tendencia escaladas para análisis.
Fuente: Propia.

Finalmente se concluyó de la figura 6.1.2.3 que las regiones donde los parámetros de control PID serán diferenciados serán las siguientes:

Zona 1:

Variable de control mayor e igual a 0% y menor a 22%; según las muestras, nuestro molino opera idealmente entre 0 y 13 RPM.

Zona 2:

Variable de control mayor e igual a 22% y menor a 60%; según las muestras, nuestro molino opera idealmente entre 13 y 29 RPM.

Zona 3:

Variable de control mayor e igual a 60% y menor a 66%; según las muestras, nuestro molino opera idealmente entre 29 y 32 RPM.

Zona 4:

Variable de control mayor e igual a 66% y menor a 100%; según las muestras, nuestro molino opera idealmente entre 32 y 49 RPM.

Zona 5:

Variable de control igual a 100%; según las muestras, nuestro molino opera idealmente a 69 RPM.

6.1.3 Respuestas de la planta a señales tipo escalón.

De acuerdo a lo referido en el subtítulo anterior se decidió evaluar la respuesta transitoria de cada zona de confort de la siguiente manera:

Zona 1 – Variable de control 15%.

Zona 2 – Variable de control 46%.

Zona 3 – Variable de control 63%.

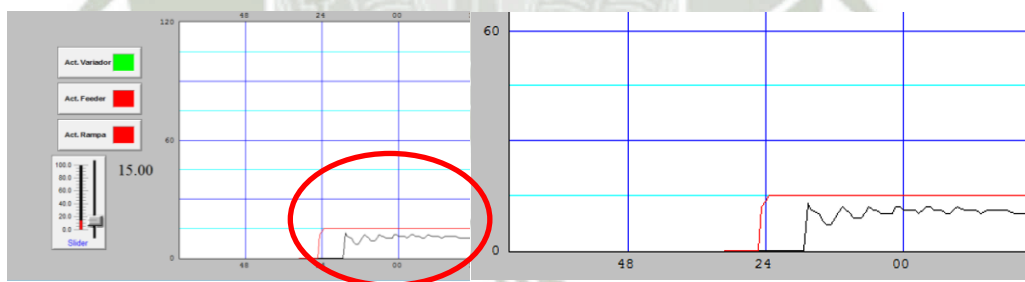
Zona 4 – Variable de control 90%.

Zona 5 – Variable de control 100%.

Es así que se realizaron los siguientes análisis.

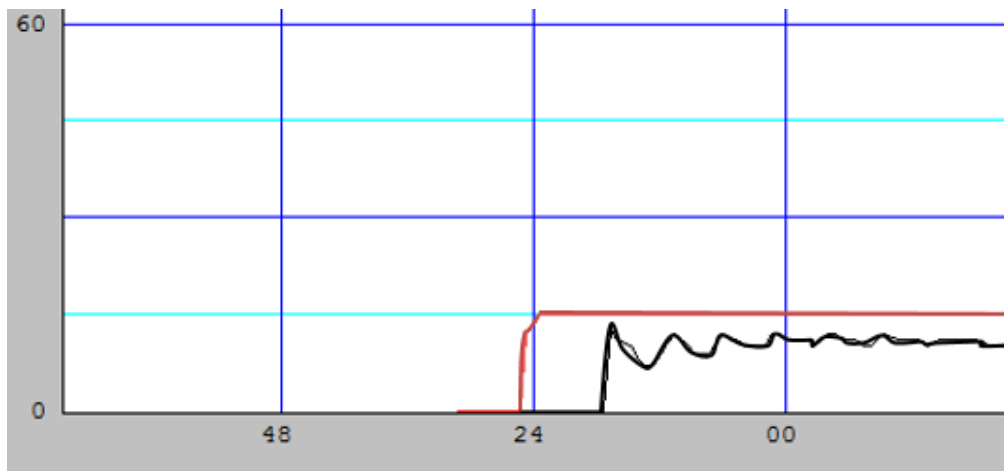
6.1.3.1 Análisis a respuesta transitoria zona 1.

Para originar una función tipo escalón se seleccionó aleatoriamente 15 % de capacidad de trabajo de variador; aproximadamente 9 Hz y en el trend del sistema de monitoreo se obtuvo la siguiente respuesta.



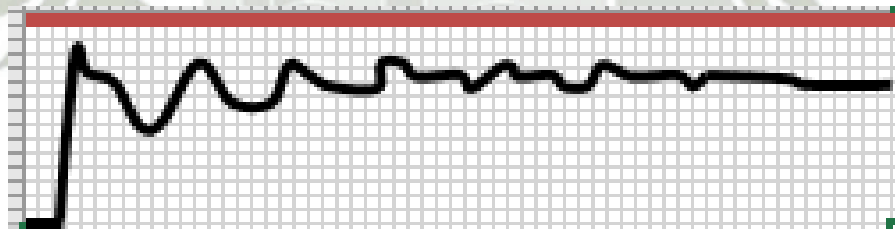
*Figura 6.1.3.1.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 1
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de herramientas propias de Excel en Microsoft Office 2016 se halló la línea de tendencia de esta gráfica para que así pudiera ser analizada en el cálculo de parámetros de control; se debe mencionar que el tiempo total de la respuesta tanto en estado transitorio como estacionario se efectuó en un total de 61 segundos hasta el fin del muestreo.



*Figura 6.1.3.1.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 15%.
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de una plantilla milimétrica en Excel podemos escalar dicha gráfica, y así indicar que cada cuadrado equivale a 1% para nuestra variable de control, 1 RPM para nuestra variable de proceso y 1 segundo para el cálculo de parámetros de control; el resultado lo observamos en la figura 6.1.3.1.3.



*Figura 6.1.3.1.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 1 escalada
Fuente: Propia.*

Ya que en nuestro siguiente título trataremos acerca de los parámetros de sintonización siguiendo las reglas de Ziegler y Nichols en lazo abierto, aplicaremos el método de la línea tangente y para poder calcular los parámetros resaltaremos las medidas requeridas en la figura 6.1.3.1.4.

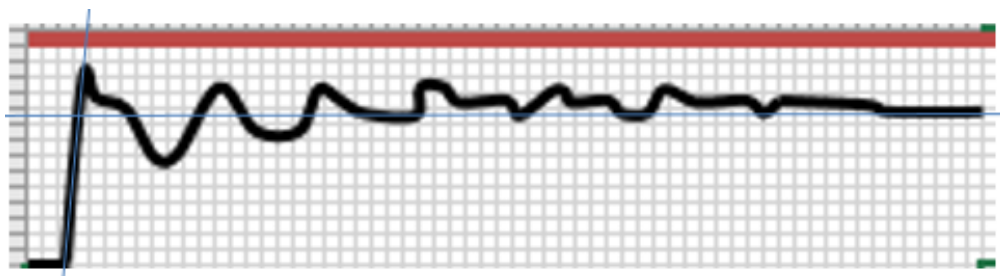


Figura 6.1.3.1.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 1
Fuente: Propia.

De esta figura desprendemos lo siguiente:

- T_1 = tiempo muerto = 2 segundos
- T_2 = tiempo en el que nuestra variable de proceso alcanza el 63.2% = 1 segundos.
- K = Variación de la variable de proceso/Variación de la variable de control
= $13/15=0.87$

6.1.3.2 Análisis a respuesta transitoria zona 2.

Para originar una función tipo escalón se seleccionó aleatoriamente 46 % de capacidad de trabajo de variador; aproximadamente 27.6 Hz y en el trend del sistema de monitoreo se obtuvo la siguiente respuesta.

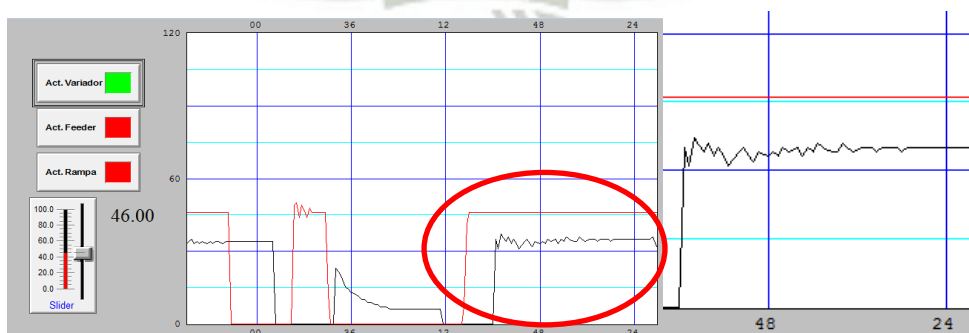
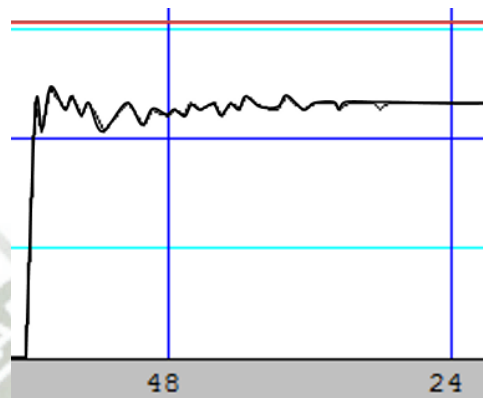


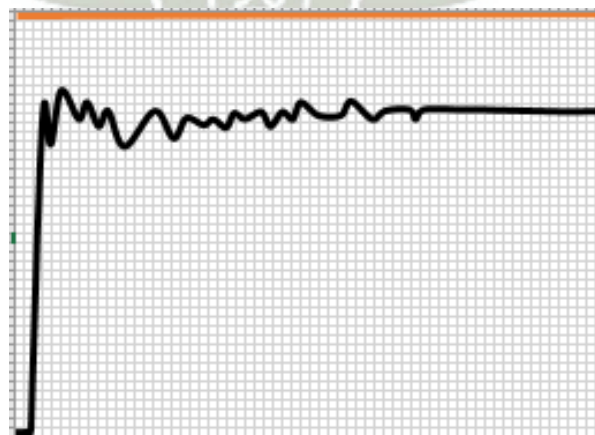
Figura 6.1.3.2.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 2
Fuente: Propia.

Haciendo uso de herramientas propias de Excel en Microsoft Office 2016 se halló la línea de tendencia de esta gráfica para que así pudiera ser analizada en el cálculo de parámetros de control; se debe mencionar que el tiempo total de la respuesta tanto en estado transitorio como estacionario se efectuó en un total de 64 segundos hasta el fin del muestreo.



*Figura 6.1.3.2.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 46%.
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de una plantilla milimétrica en Excel podemos escalar dicha gráfica, y así indicar que cada cuadrado equivale a 1% para nuestra variable de control, 1 RPM para nuestra variable de proceso y 1 segundo para el cálculo de parámetros de control; el resultado lo observamos en la figura 6.1.3.2.3.



*Figura 6.1.3.2.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 2 escalada.
Fuente: Propia.*

Ya que en nuestro siguiente título trataremos acerca de los parámetros de sintonización siguiendo las reglas de Ziegler y Nichols en lazo abierto, aplicaremos el método de la línea tangente y para poder calcular los parámetros resaltaremos las medidas requeridas en la figura 6.1.3.2.4.

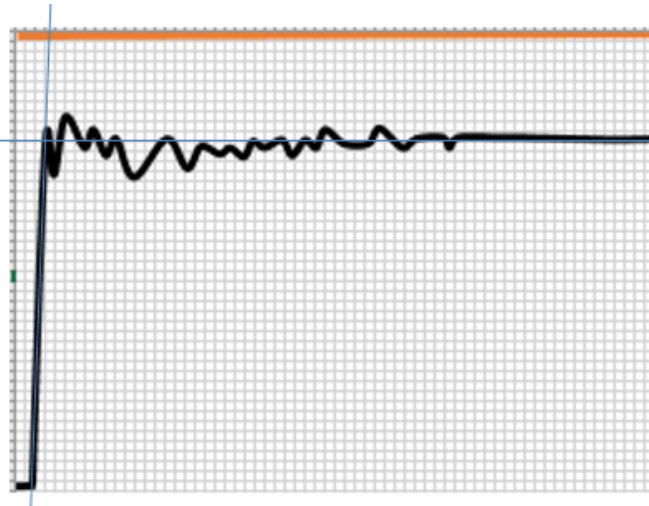


Figura 6.1.3.2.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 2.

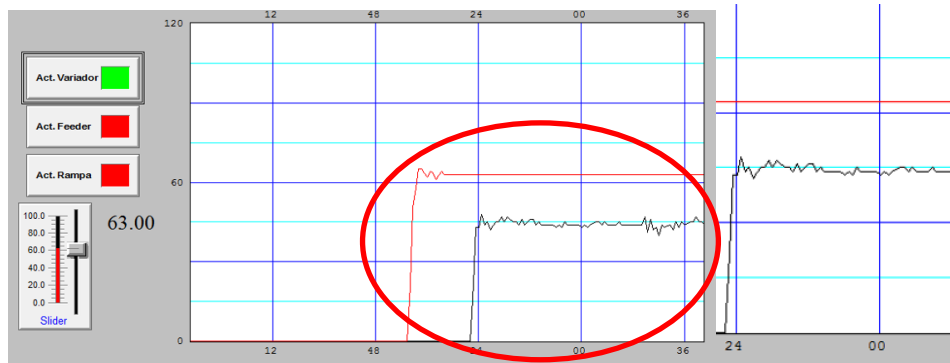
Fuente: Propia.

De esta figura desprendemos lo siguiente:

- T_1 = tiempo muerto = 1.5 segundos
- T_2 = tiempo en el que nuestra variable de proceso alcanza el 63.2% = 1 segundos.
- K = Variación de la variable de proceso/Variación de la variable de control
= $35/46=0.76$

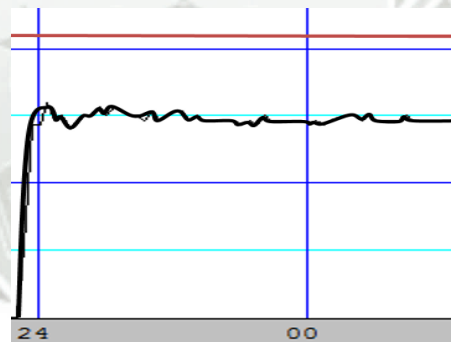
6.1.3.3 Análisis a respuesta transitoria zona 3.

Para originar una función tipo escalón se seleccionó aleatoriamente 63 % de capacidad de trabajo de variador; aproximadamente 37.8 Hz y en el trend del sistema de monitoreo se obtuvo la siguiente respuesta.



*Figura 6.1.3.3.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 3
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de herramientas propias de Excel en Microsoft Office 2016 se halló la línea de tendencia de esta gráfica para que así pudiera ser analizada en el cálculo de parámetros de control; se debe mencionar que el tiempo total de la respuesta tanto en estado transitorio como estacionario se efectuó en un total de 61 segundos hasta el fin del muestreo.



*Figura 6.1.3.3.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 63%.
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de una plantilla milimétrica en Excel podemos escalar dicha gráfica, y así indicar que cada cuadrado equivale a 1% para nuestra variable de control, 1 RPM para nuestra variable de proceso y 1 segundo para el cálculo de parámetros de control; el resultado lo observamos en la figura 6.1.3.3.3.



*Figura 6.1.3.3.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 3 escalada.
Fuente: Propia.*

Ya que en nuestro siguiente título trataremos acerca de los parámetros de sintonización siguiendo las reglas de Ziegler y Nichols en lazo abierto, aplicaremos el método de la línea tangente y para poder calcular los parámetros resaltaremos las medidas requeridas en la figura 6.1.3.3.4.



*Figura 6.1.3.3.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 3.
Fuente: Propia.*

De esta figura desprendemos lo siguiente:

- $T1 = \text{tiempo muerto} = 1.5 \text{ segundos}$
- $T2 = \text{tiempo en el que nuestra variable de proceso alcanza el } 63.2\% = 1 \text{ segundos.}$
- $K = \text{Variación de la variable de proceso/Variación de la variable de control} = 44/63=0.70$

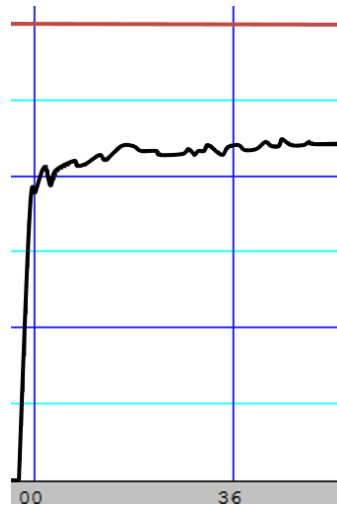
6.1.3.4 Análisis a respuesta transitoria zona 4.

Para originar una función tipo escalón se seleccionó aleatoriamente 90 % de capacidad de trabajo de variador; aproximadamente 54 Hz y en el trend del sistema de monitoreo se obtuvo la siguiente respuesta.



*Figura 6.1.3.4.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 4
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de herramientas propias de Excel en Microsoft Office 2016 se halló la línea de tendencia de esta gráfica para que así pudiera ser analizada en el cálculo de parámetros de control; se debe mencionar que el tiempo total de la respuesta tanto en estado transitorio como estacionario se efectuó en un total de 59 segundos hasta el fin del muestreo.



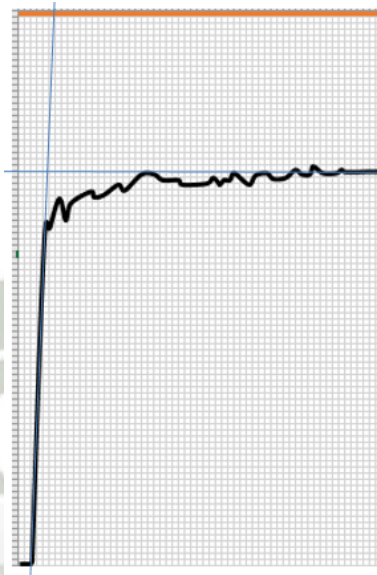
*Figura 6.1.3.4.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 90%.
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de una plantilla milimétrica en Excel podemos escalar dicha gráfica, y así indicar que cada cuadrado equivale a 1% para nuestra variable de control, 1 RPM para nuestra variable de proceso y 1 segundo para el cálculo de parámetros de control; el resultado lo observamos en la figura 6.1.3.4.3.



*Figura 6.1.3.4.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 4 escalada.
Fuente: Propia.*

Ya que en nuestro siguiente título trataremos acerca de los parámetros de sintonización siguiendo las reglas de Ziegler y Nichols en lazo abierto, aplicaremos el método de la línea tangente y para poder calcular los parámetros resaltaremos las medidas requeridas en la figura 6.1.3.4.4.



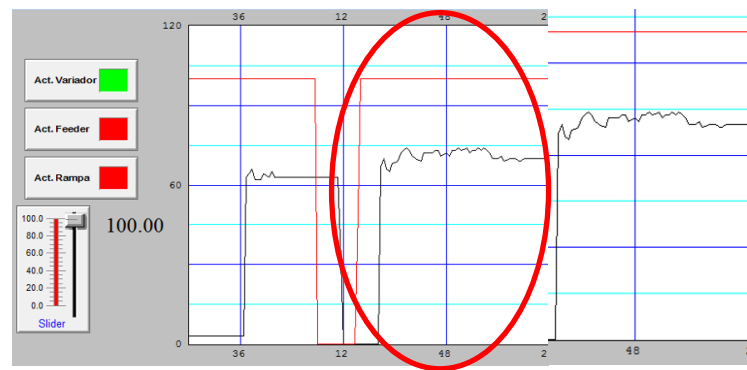
*Figura 6.1.3.3.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 4.
Fuente: Propia.*

De esta figura desprendemos lo siguiente:

- T_1 = tiempo muerto = 2 segundos
- T_2 = tiempo en el que nuestra variable de proceso alcanza el 63.2% = 1.5 segundos.
- K = Variación de la variable de proceso/Variación de la variable de control
= $64/90=0.71$

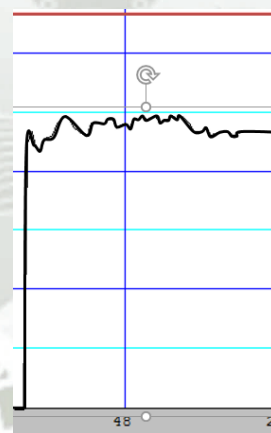
6.1.3.5 Análisis a respuesta transitoria zona 5.

Finalmente, para originar una función tipo escalón se seleccionó el 100 % de capacidad de trabajo de variador; aproximadamente 60 Hz y en el trend del sistema de monitoreo se obtuvo la siguiente respuesta.



*Figura 6.1.3.5.1. Respuesta de sistema en lazo abierta obtenida en zona 5
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de herramientas propias de Excel en Microsoft Office 2016 se halló la línea de tendencia de esta gráfica para que así pudiera ser analizada en el cálculo de parámetros de control; se debe mencionar que el tiempo total de la respuesta tanto en estado transitorio como estacionario se efectuó en un total de 62 segundos hasta el fin del muestreo.



*Figura 6.1.3.5.2. Línea de tendencia de respuesta de sistema a escalón de 100%.
Fuente: Propia.*

Haciendo uso de una plantilla milimétrica en Excel podemos escalar dicha gráfica, y así indicar que cada cuadrado equivale a 1% para nuestra variable de control, 1 RPM para nuestra variable de proceso y 1 segundo para el cálculo de parámetros de control; el resultado lo observamos en la figura 6.1.3.5.3.



Figura 6.1.3.5.3. Respuesta transitoria a función escalón en zona 5 escalada.

Fuente: Propia.

Ya que en nuestro siguiente título trataremos acerca de los parámetros de sintonización siguiendo las reglas de Ziegler y Nichols en lazo abierto, aplicaremos el método de la línea tangente y para poder calcular los parámetros resaltaremos las medidas requeridas en la figura 6.1.3.5.4.

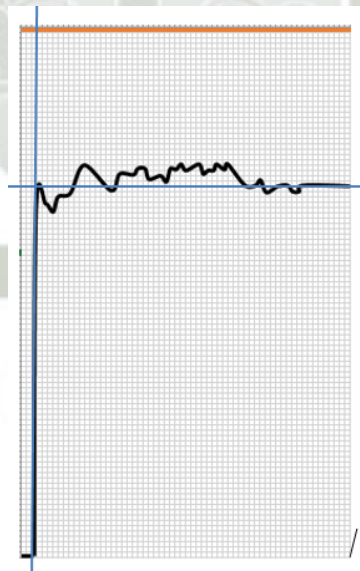


Figura 6.1.3.5.4. Líneas tangente y de régimen estable sobre respuesta de sistema en zona 5.

Fuente: Propia.

De esta figura desprendemos lo siguiente:

- T1 = tiempo muerto = 2 segundos
- T2 = tiempo en el que nuestra variable de proceso alcanza el 63.2% = 1 segundo.
- K = Variación de la variable de proceso/Variación de la variable de control
= 71/100=0.71

6.1.4 Cálculo de parámetros de control PID según Ziegler-Nichols.

Una vez realizado el análisis en estado estacionario y habiendo obtenido los siguientes resultados:

Zona/Constates	T1	T2	K
Zona 1	2.0	1.0	0.87
Zona 2	1.5	1.0	0.76
Zona 3	1.5	1.0	0.70
Zona 4	2.0	1.5	0.71
Zona 5	2.0	1.0	0.71

Tabla 6.1.4.1: Constantes experimentales obtenidas de análisis en estado estacionario / Fuente: Propia

Se aplicará el método de Ziegler-Nichols de acuerdo a las siguientes fórmulas para el bloque de control PID.

	Kp	Ti	Td
PID	$\frac{2T2 + T1}{6KT1}$	$2 + \frac{T1}{2}$	$\frac{T2T1}{6T1}$

Tabla 6.1.4.2: Formulas de parámetros de sintonización según Ziegler – Nichols. Fuente: <https://sites.google.com/site/picuino/ziegler-nichols>

Reemplazando nuestras contantes en las fórmulas obtenemos los siguientes resultados:

	Kp	Ti	Td
Zona 1	0.38	2	0.17
Zona 2	0.51	1.75	0.17
Zona 3	0.56	1.75	0.17
Zona 4	0.59	2.5	0.25
Zona 5	0.47	2	0.17

*Tabla 6.1.4.3: Resultados de parámetros de sintonización según Ziegler-Nichols.
Fuente: Propia*

Con estos resultados se trabajará experimentalmente el lazo cerrado clásico en primera instancia

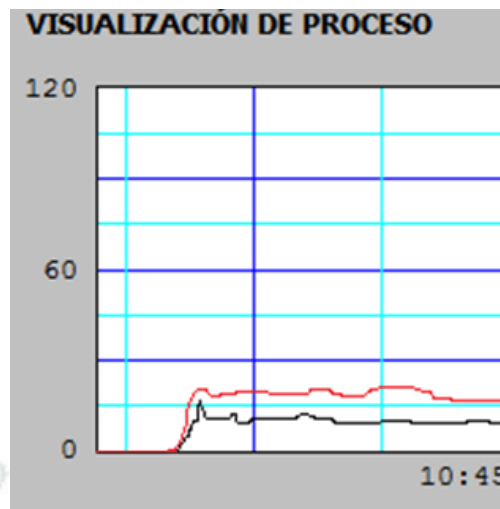
6.1.5 Afinamiento de parámetros por método experimental.

Una vez realizado el proceso de auto-tunning se obtuvieron los siguientes resultados corregidos; los cuales como podemos observar, no distan de los parámetros teóricos; por lo tanto se tomarían los parámetros de la tabla 6.1.5.1 en la zona 5 para el análisis entre el lazo realimentado clásico y el lazo de control realimentado adaptativo, ya que la respuesta en esta zona denota un mejor control, ya que su error en offset es mínimo, anula el overdamp y tiene un mejor control alrededor del punto de consigna como se observa en la figura 6.1.5.5.

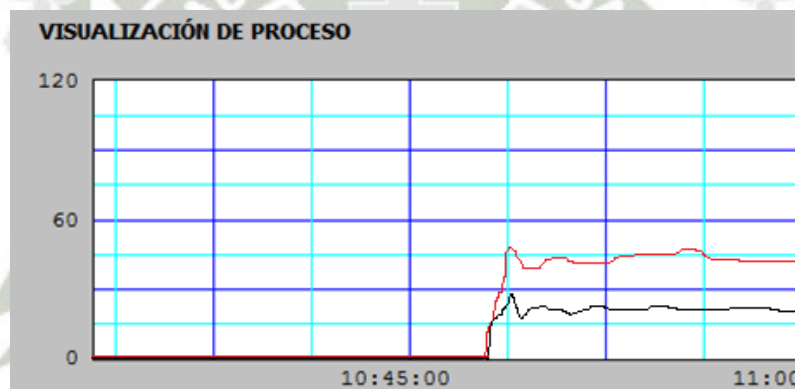
	Kp	Ti	Td
Zona 1	1.41	2.10	0.08
Zona 2	1.54	1.98	0.08
Zona 3	1.61	1.95	0.06
Zona 4	1.62	2.32	0.05
Zona 5	1.23	2.16	0.06

*Tabla 6.1.5.1: Resultados experimentales de parámetros de sintonización según Auto-tunning
Fuente: Propia*

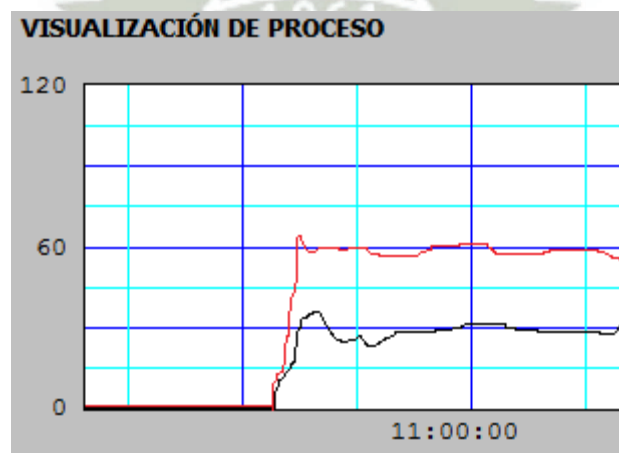
Los parámetros mencionados en la tabla 6.1.5.1 originan las siguientes respuestas del sistema en lazo cerrado; donde la línea negra es la variable de proceso en RPM y la línea roja es la variable de control capacidad de variador 0-100%.



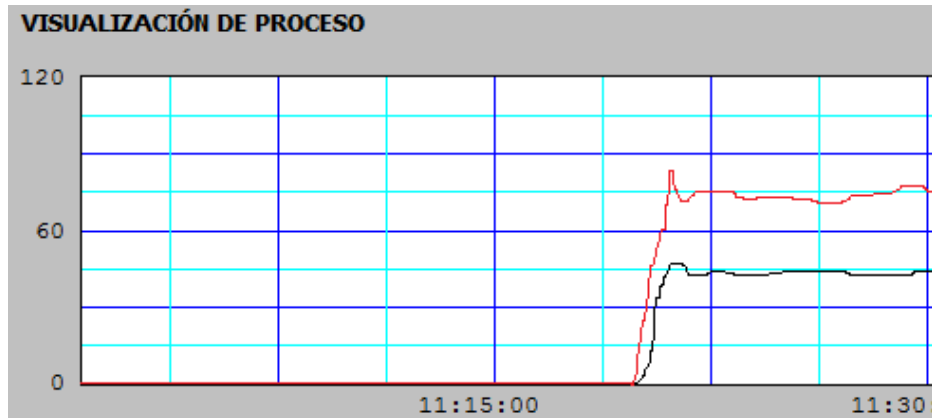
*Figura 6.1.5.1: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 13 RPM
Fuente: Propia*



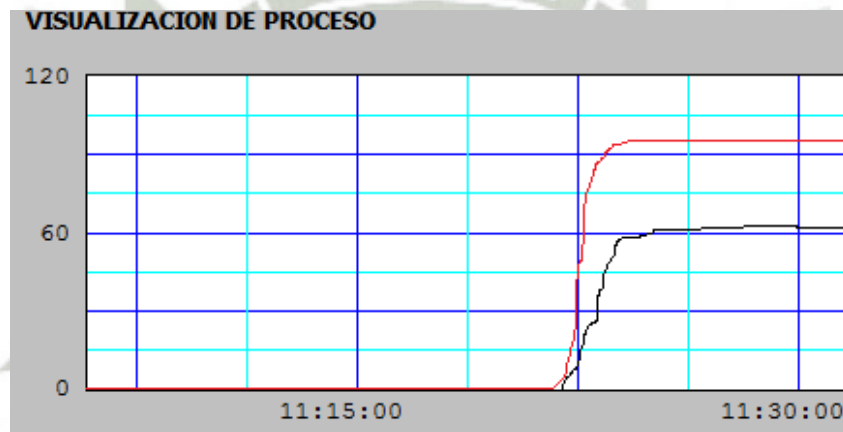
*Figura 6.1.5.2: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 25 RPM
Fuente: Propia*



*Figura 6.1.5.3: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 30 RPM
Fuente: Propia*



*Figura 6.1.5.4: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 40 RPM
Fuente: Propia*



*Figura 6.1.5.5: Resultado de proceso sintonizado con un SP2 de 62 RPM
Fuente: Propia*

En las figuras 6.1.5.1/6.1.5.2/6.1.5.3/6.1.5.4/6.1.5.5 se observa que nuestra planta tiene una respuesta controlada y estable dentro de las 5 zonas de confort.

Para terminar se aprecian los siguientes parámetros de sintonización obtenidos de manera completamente experimental según la tabla 6.1.5.2, en donde la mayor diferencia se da en la ganancia proporcional; estos resultados se tomarán para la prueba con el lazo de control realimentado de tipo adaptativo.

Control Adaptativo				
Variable de control 0-100%		KC	TI	TD
0	22	4.9985	3.6216	0.9125
22	60	5.7916	3.5867	0.9024
60	66	5.8116	3.8855	0.9125
66	100	5.7916	3.6122	0.9233
100	Mas	5.8199	3.5867	0.9058

Tabla 6.1.5.2: Resultados experimentales de parámetros de sintonización obtenidos por observación.

Fuente: Propia

6.1.6 Resultados de muestreo.

Para estos resultados se tomó un tiempo de molienda de 11 minutos y un tiempo de funcionamiento de hidrociclón de 02 minutos.

Se ingresó en ambos casos 1393 gr. De yeso con una granulometría no mayor a 5 mm. de diámetro; de los cuales se usarían para cada demostración 600g.



Figura 6.1.6.1: Peso de yeso ingresado a molino.

Fuente: Propia

Luego de 11 minutos de molienda y habiendo variado el ingreso de mineral y por consiguiente las revoluciones necesarias para su molienda de la siguiente manera.

TIEMPO	GRAMOS INGRESADOS	GRAMOS EN MOLINO	RPM RECOMENDADAS
0-120 seg.	100	100	20
120-300 seg.	200	300	30
300-480 seg.	300	600	45
480-660 seg.	-	-	60

Tabla 6.1.6.1: Parámetros tomados en cuenta para el funcionamiento de planta.

Fuente: Propia

Como se desprende de la tabla 6.1.6.1 la relación de variación entre el SP1 en gramos (gramos en molino) y el SP2 en RPM (RPM recomendadas) viene determinada por la siguiente función:

$$SP2 = \frac{SP1}{20} + 15$$

Fórmula 6.1.6.1

Se obtuvieron los siguientes resultados en el proceso durante las 3 pruebas en lazo cerrado clásico realizadas, donde la línea roja es la variable de control de 0 a 100%, la línea negra es la variable de proceso en RPM y la línea morada es el set point en RPM; mientras que el trend inferior simboliza el consumo de corriente en tiempo real el cual nos ayudará a observar el consumo de energía con respecto a la variación de la variable de control y la de proceso.

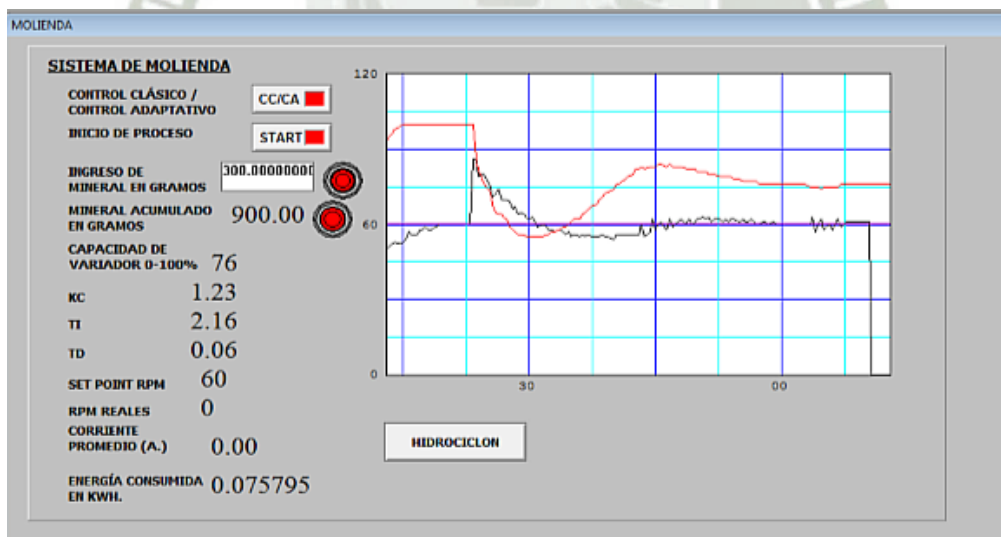


Figura 6.1.6.2: Resultado de la primera prueba en lazo de control cerrado clásico con un spam de 3 minutos

Fuente: Propia

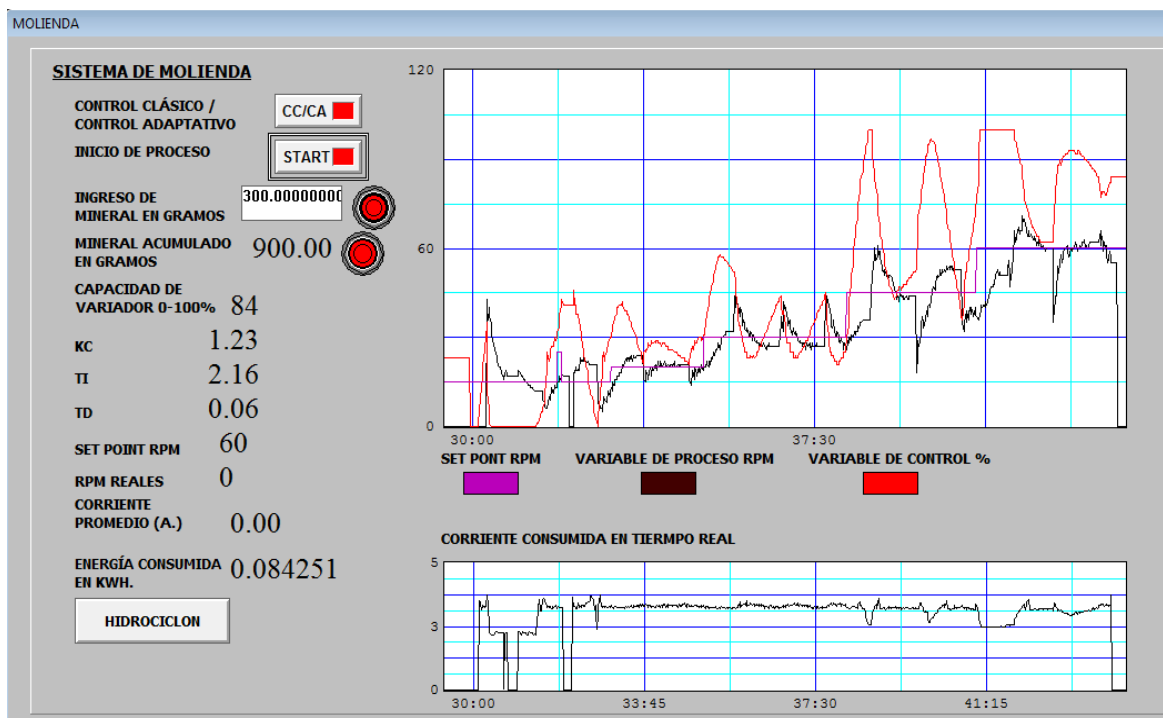


Figura 6.1.6.3: Resultado de la segunda prueba en lazo de control cerrado clásico con un spam de 12 minutos
Fuente: Propia

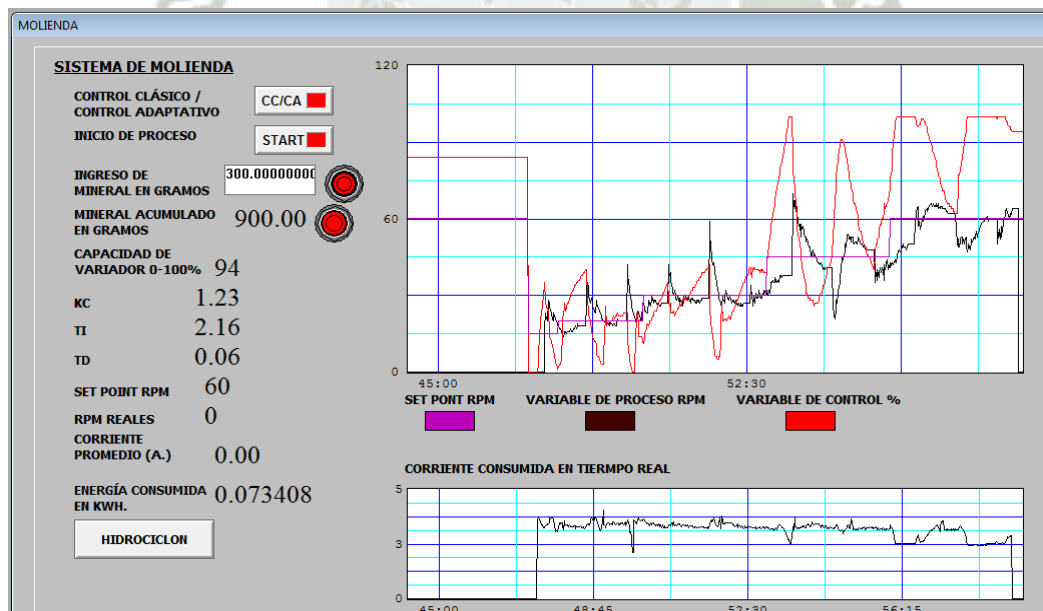


Figura 6.1.6.4: Resultado de la tercera prueba en lazo de control cerrado clásico con un spam de 12 minutos
Fuente: Propia

En segunda instancia se obtuvieron los siguientes resultados en el proceso durante las 3 pruebas en lazo cerrado con control adaptativo realizadas, donde la línea roja es la

variable de control de 0 a 100%, la línea negra es la variable de proceso en RPM y la línea morada es el set point en RPM; mientras que el trend inferior simboliza el consumo de corriente en tiempo real el cual nos ayudará a observar el consumo de energía con respecto a la variación de la variable de control y la de proceso.

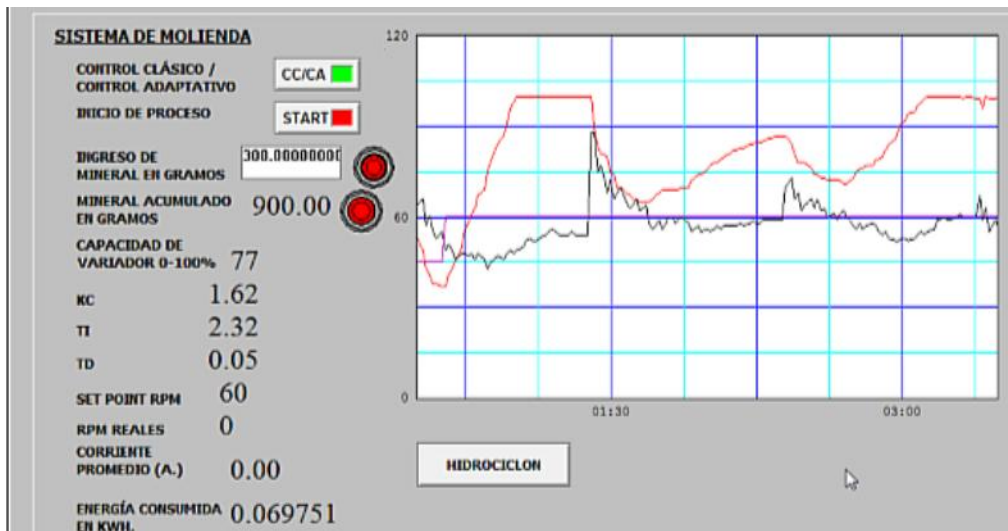


Figura 6.1.6.5: Resultado de la primera prueba en lazo de control cerrado adaptativo con un spam de 3 minutos
Fuente: Propia

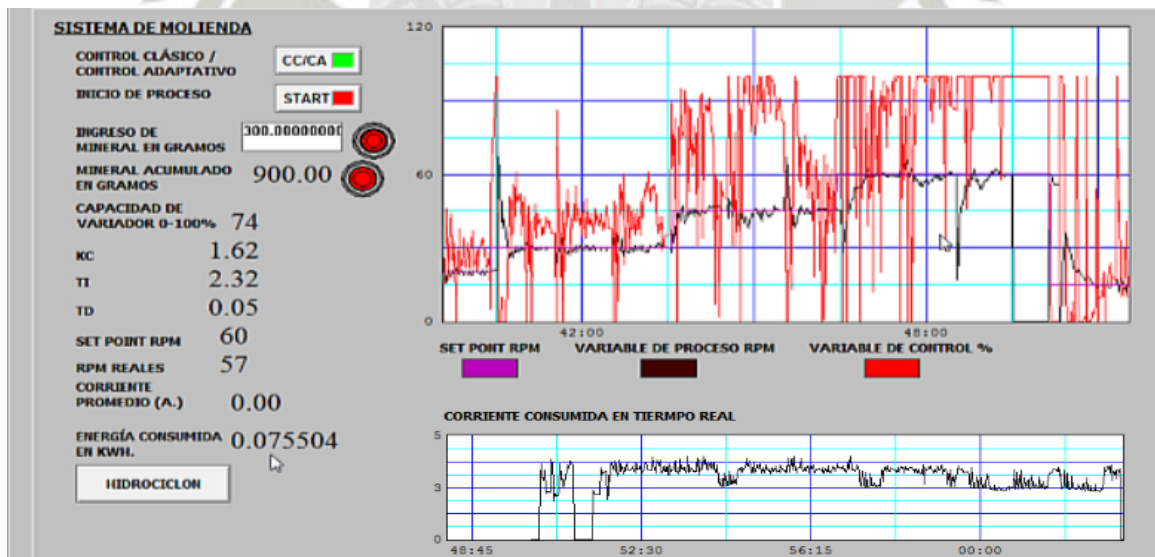
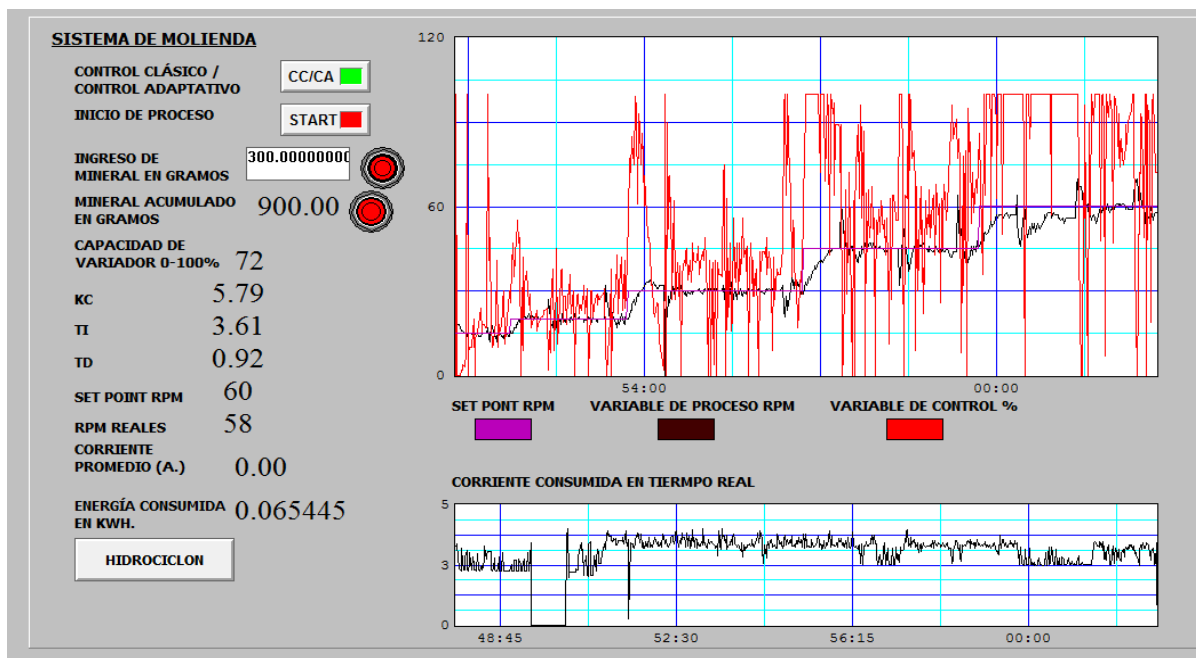


Figura 6.1.6.6: Resultado de la segunda prueba en lazo de control cerrado adaptativo con un spam de 12 minutos
Fuente: Propia



*Figura 6.1.6.7: Resultado de la tercera prueba en lazo de control cerrado adaptativo con un spam de 12 minutos
Fuente: Propia*

Las figuras 6.1.6.2/6.1.6.3/6.1.6.4/6.1.6.5/6.1.6.6/6.1.6.7 que indican la respuesta de la planta en lazo de control cerrado clásico y la respuesta de la planta en lazo de control cerrado adaptativo nos indican lo siguiente:

- La sintonización realizada en los procesos controlados con control de lazo cerrado adaptativo tiene un menor tiempo de establecimiento, anula de una mejor manera el error de offset y reduce la acción de overdamp en nuestra variable de proceso.
- La variable de control en lazo de control cerrado adaptativo tiene una variación mayor, lo cual ayuda a que las billas en el interior del molino ataquen las partículas de yeso de una forma más agresiva, incrementando el proceso de colisión y abrasión y que esto finalmente se traduzca en una producción mayor del producto procesado.

- Dado que la variable de control tiene una variación mayor, esto hace que las corrientes usadas en los bits 1 y 2 de la primera palabra de mando de nuestro variador (freno inducido) se desactiven durante un mayor lapso de tiempo, sobre todo cuando la capacidad del variador oscila entre 80 y 100%; esto se refleja en un menor consumo de corriente por parte del variador, este comportamiento se observa en el trend de consumo de corriente el tiempo real (inferior) que se observa en las figuras 6.1.6.3/6.1.6.4/6.1.6.6/6.1.6.7.

Con respecto a la cantidad de material obtenido se observaron los siguientes resultados durante 3 pruebas.

NÚMERO DE PRUEBA.	CON CONTROL CERRADO CLÁSICO.	CON CONTROL ADAPTATIVO.	(CA/CC) X 100 %
1	77 g.	92 g.	119.48
2	85 g.	102 g.	120.00
3	90 g.	105 g.	116.66

*Tabla 6.1.6.2: Resultados de producto obtenido en pruebas realizadas.
Fuente: Propia*

Con lo cual en promedio la efectividad del molino es de un 18.71% superior.

Si estos datos los aplicamos a la industria, comparemos la nueva planta de Sociedad Minera Cerro Verde CVPUE la cual procesa 240 ton por día; la misma que ahora procesaría 284.904 ton por día.



*Figura 6.1.6.8: Peso de yeso producto de molino con lazo de control cerrado adaptativo.
Fuente: Propia*

El proceso de separación por hidrociclón tiene por objetivo separar el mineral con una granulometría menor a 0.5mm con el material mayor a 0.5mm; este proceso es solo demostrativo, ya que el mineral fino solo es obtenible y medible luego de un proceso de secado; sin embargo se obtuvo un peso underflow como muestra que el proceso de separación del hidrociclón es exitoso.



*Figura 6.1.6.9: Peso de yeso producto de hidrociclón underflow.
Fuente: Propia*

En cuanto a la energía se utilizó la medida de kilowatts-hora para su medición obteniéndose lo siguientes resultados:

NÚMERO DE PRUEBA.	CON CONTROL CERRADO CLÁSICO.	CON CONTROL ADAPTATIVO.	(CA/CC)/100 %
1	0.075795 kWh.	0.069751 kWh.	92.03
2	0.084251 kWh.	0.075504 kWh.	89.62
3	0.073408 kWh.	0.065445 kWh.	89.15

Tabla 6.1.6.3: Resultados de consumo de energía eléctrica obtenido en pruebas realizadas.

Fuente: Propia

En promedio se ahorró un 7.73% de energía eléctrica.

Si transferimos este resultado hacia un proceso en la industria, tenemos el caso de la nueva planta CVPUE de Sociedad Minera Cerro verde, la cual opera 6 molinos de fino (bolas) y donde cada uno de ellos consume 20 MWh; siendo el consumo de los 6 durante todo un

día de 2880 MWh en donde el ahorro en un día con la planta operando al 100%, ascendería a 222.624 MWh por 24 horas.

- Como observación el hidrociclón por funcionamiento de 2 min. consumió 0.007835 kWh.



CONCLUSIONES

El presente problema se relaciona al alto consumo de energía que demanda el funcionamiento de molinos en la industria minera y a la necesidad de obtener más producto (mineral) con menos energía; la producción, la capacidad volumétrica de los molinos y la demanda de energía es tan alta que se planteó un sistema de control cuya sintonización pudiera ser específica dependiendo de su carga a fin de optimizar el proceso en mención.

Esta sintonización se realizó en 5 zonas de su espectro de funcionamiento habiendo aplicado los conocimientos adquiridos durante los años de formación universitaria y formación laboral, y después del análisis de los resultados obtenidos se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

1. Es posible implementar un control adaptativo a un proceso de molienda haciendo que éste produzca más (18.71%) y ahorre energía (7.73%); siendo ambas mejoras significativas en el ámbito industrial.
2. El control de lazo cerrado de tipo adaptativo es altamente recomendado en procesos donde los puntos de consigna sean variables y ayudan a que el sistema que controla tenga una respuesta más eficiente con respecto a las perturbaciones propias de la planta.

3. La integración de marcas industriales dentro de un mismo proceso es posible debido a los servidores y clientes OPC; a su vez esto ayuda a ampliar el espectro de posibilidades tanto en equipos como instrumentos y así hacer la labor logística de mantenimiento más eficiente.
4. El trabajo con redes industriales de campo es altamente recomendable ya que abarata costos de consumibles como cables, terminales, repetidores, etc. ya que en su mayoría denotan topología tipo bus y no tipo estrella como los conexiones convencionales
5. Es recomendable trabajar con distintos buses de campo, ya que cada uno presenta ventaja y desventajas sobre otro; para nuestra aplicación tomar en cuenta la tabla 4.1.2.1.
6. La aplicación de este tipo de control se puede dar en más procesos; sobre todo en procesos con mayor inercia en su variable de proceso como sistemas que trabajen con temperatura o flujo, ya que en ellos las perturbaciones afectan la variable de proceso con mayor magnitud.

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para el mejoramiento de nuestro proyecto se propone lo siguiente:

1. Se propone trabajar con un medidor de revoluciones por minuto con mayor resolución para obtener datos más fidedignos.
2. Con un medidor de RPM con mayor resolución se obtendrá una respuesta en lazo abierto con más zonas examinables y parametrizables; esto sin duda alguna podrá afinar la respuesta de la planta a cualquier tipo de perturbación o variación.
3. Se aconseja trabajar el proceso de molienda de manera húmeda para facilitar el tránsito de mineral dentro del molino.
4. Trabajar el motor de molienda con energía trifásica, ya que la adaptación que hace el variador de frecuencia de monofásico a trifásico le resta potencia al motor.
5. Manejar la lectura de nivel del tanque con sensores analógicos para poder controlar mejor el sistema de bombeo mediante lazo cerrado.
6. Trabajar la bomba de hidrociclones con un variador o un softstarter con el fin de preservar el motor.
7. Separar por niveles de tensión los equipos instalados en los tableros, ya que no es recomendable que 220 VAC, 24 VAC y cables de comunicación se hallen cerca,

ya que una señal puede inducir a la otra influyendo en los datos de campo obtenidos.

8. Afinar los parámetros de granulometría del proceso con el fin de poder hacer un cálculo de elementos de molienda y velocidad crítica mucho más eficiente.
9. Trabajar el modelamiento y afinamiento mecánico de la planta.



BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES ELECTRÓNICOS

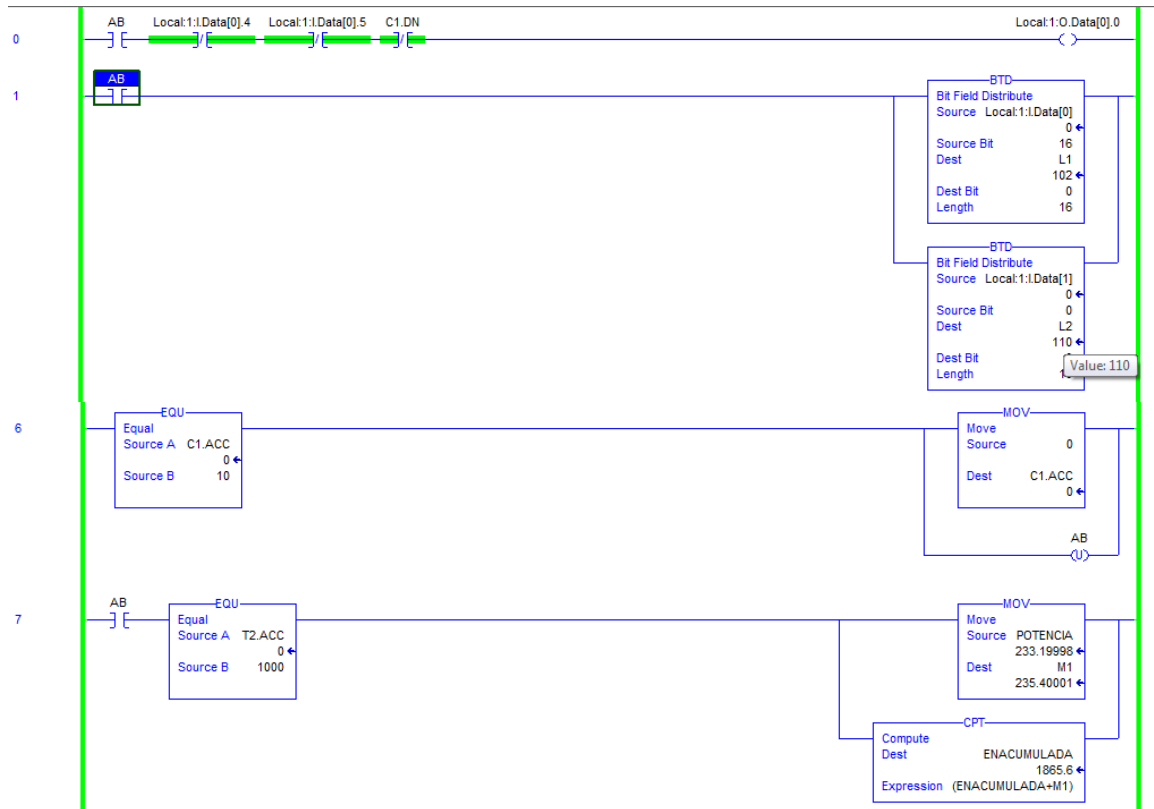
- C.M. ANTAMINA S.A., “Proceso de producción”, [online]. Disponible en:
<http://www.antamina.com/sobre-antamina/nuestras-operaciones/proceso-de-produccion/>
-
- F. Rodríguez y M. López, “Introducción” en *Control Adaptativo y Robusto*, F. Rodríguez, Ed. Universidad de Sevilla, Sevilla 1996, pp. 1-7.
-
- U. Sevilla, “Diseño de estrategias de control de tracción para vehículos eléctricos con motores en rueda”, [online]. Disponible en:
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90554/fichero/TFG_delOjoJimenez_Angel.pdf
- R. Hernández, “Introducción a los sistemas de control” en *Introducción a los Sistemas de Control*, R. Hurtado y R. Yáñez – Ed. Pearson, México DF 2010, pp. 1-18.
- F. Rodríguez y M. López, “Control Adaptativo” en *Control Adaptativo y Robusto*, F. Rodríguez, Ed. Universidad de Sevilla, Sevilla 1996, pp. 9-23.
- WEB, “Otros métodos de control”, [online]. Disponible en:
<http://prof.usb.ve/lamanna/cursos/Esquemas-de-control.pdf>

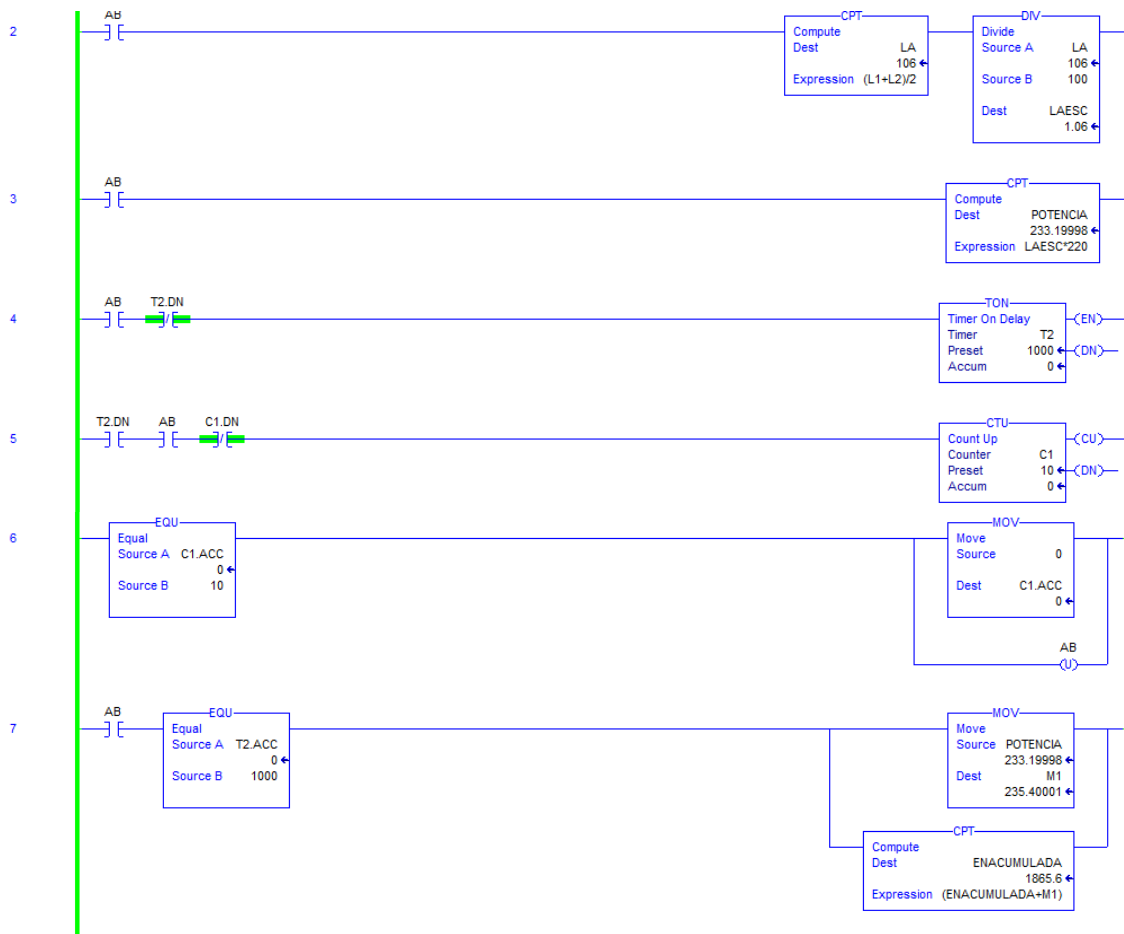
- C. Cassiolato, “Redes Industriales”, [online]. Disponible en:
<http://www.smar.com/espanol/articulo-tecnico/redes-industriales-parte-1>
- WEB, “Automatización Industrial” [online]. Disponible en:
<http://automatizacion.bligoo.com/tag/protocolos>
- J. Alcántara, “Diseño Práctico de un Molino de Bolas”, Tesis pre-grado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica – Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2008.
- H. Ortega, “Sistema SCADA en INTOUCH para la supervisión y control de procesos, con la integración de los dispositivos de control en una red de comunicación industrial, mediante el interfaz OPC server”, Tesis pre-grado, Programa Profesional de Ingeniería Electrónica, Universidad Católica de Santa María. Arequipa, 2010.



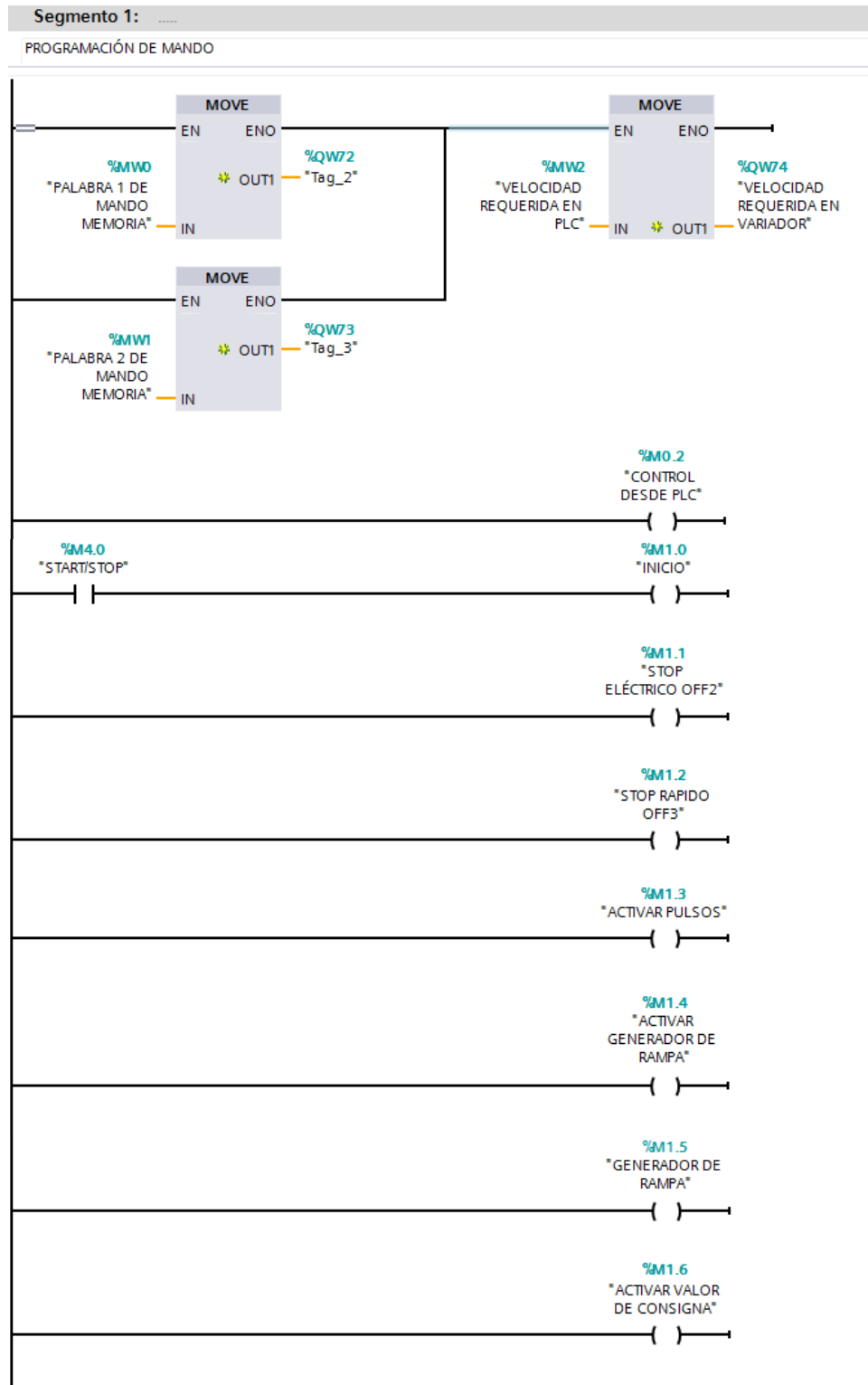
ANEXOS

ANEXO 1 – Programa de control Ladder Rockwell Hidrociclón.





ANEXO 2 – Programa de control Ladder Siemens Molino



Segmento 2:

PROGRAMACIÓN DE ESTADO



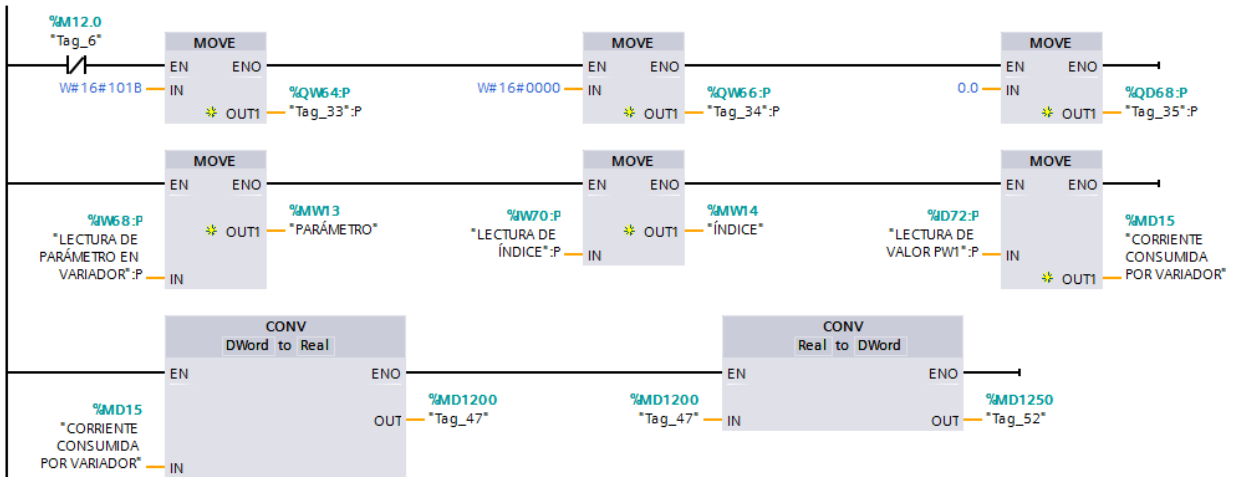
Segmento 3:

TRANSFORMACIÓN Y ESCALAMIENTO PARA EL VARIADOR 0=0HZ Y 16383=60HZ



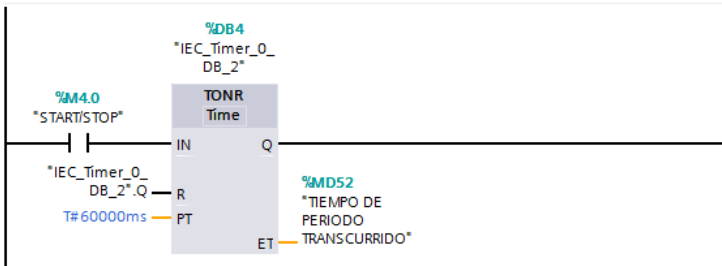
Segmento 4:

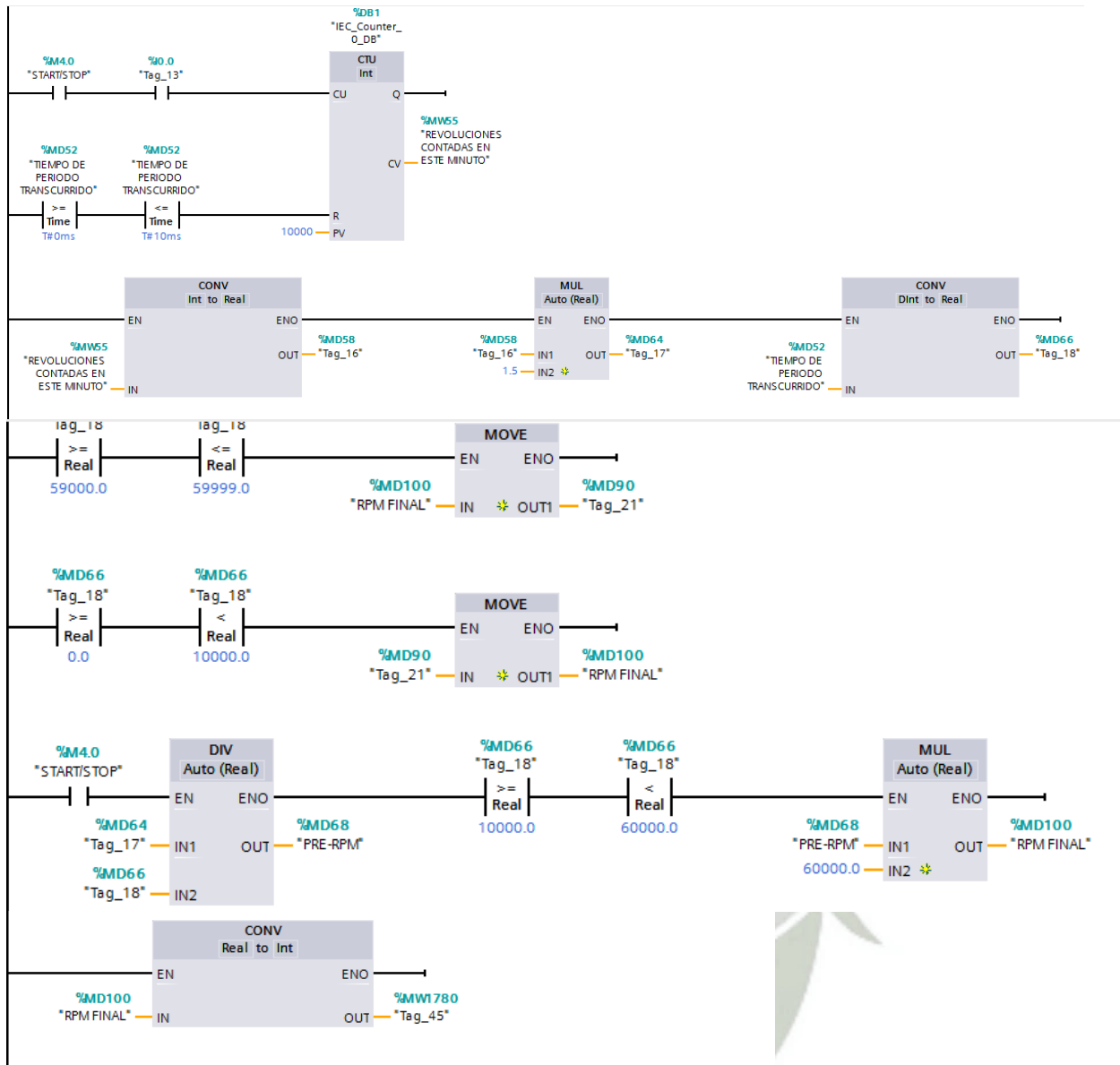
LECTURA ACÍCLICA DE CORRIENTE CONSUMIDA



Segmento 5:

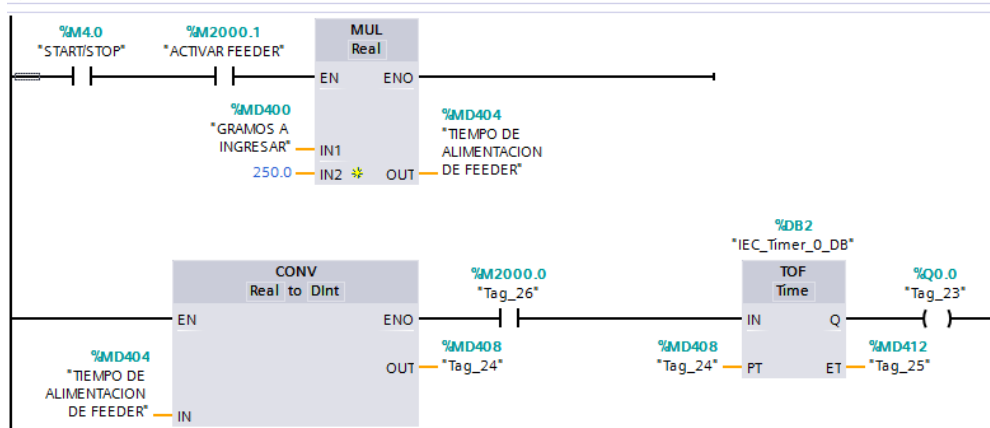
CONTADOR DE REVOLUCIONES POR MINUTO

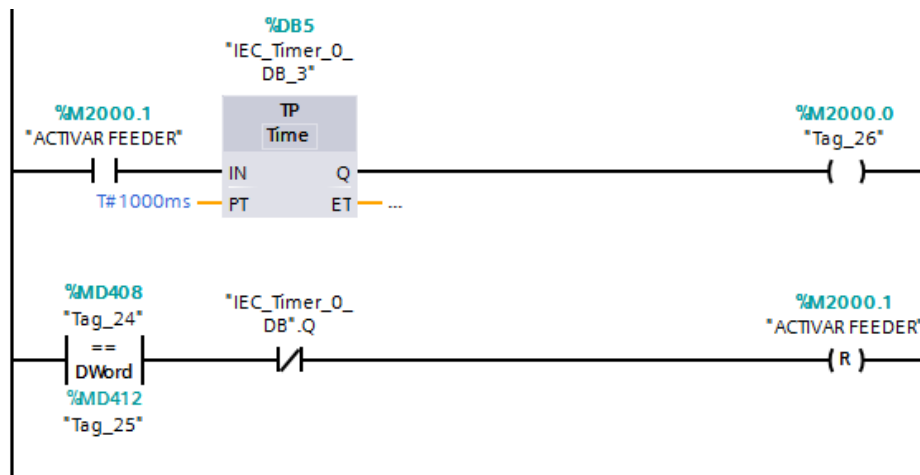




Segmento 6:

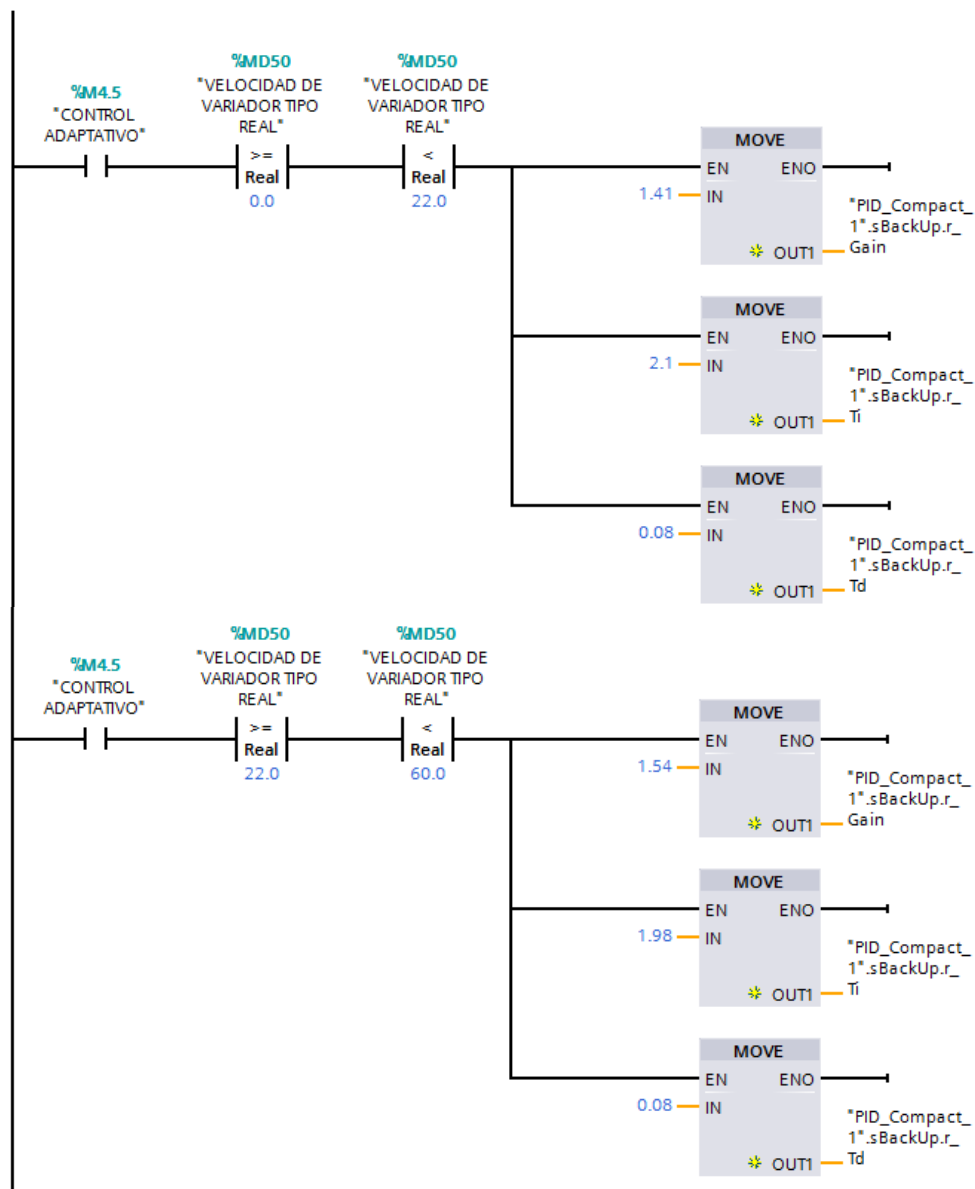
MOTOR DE ALIMENTACIÓN FEEDER

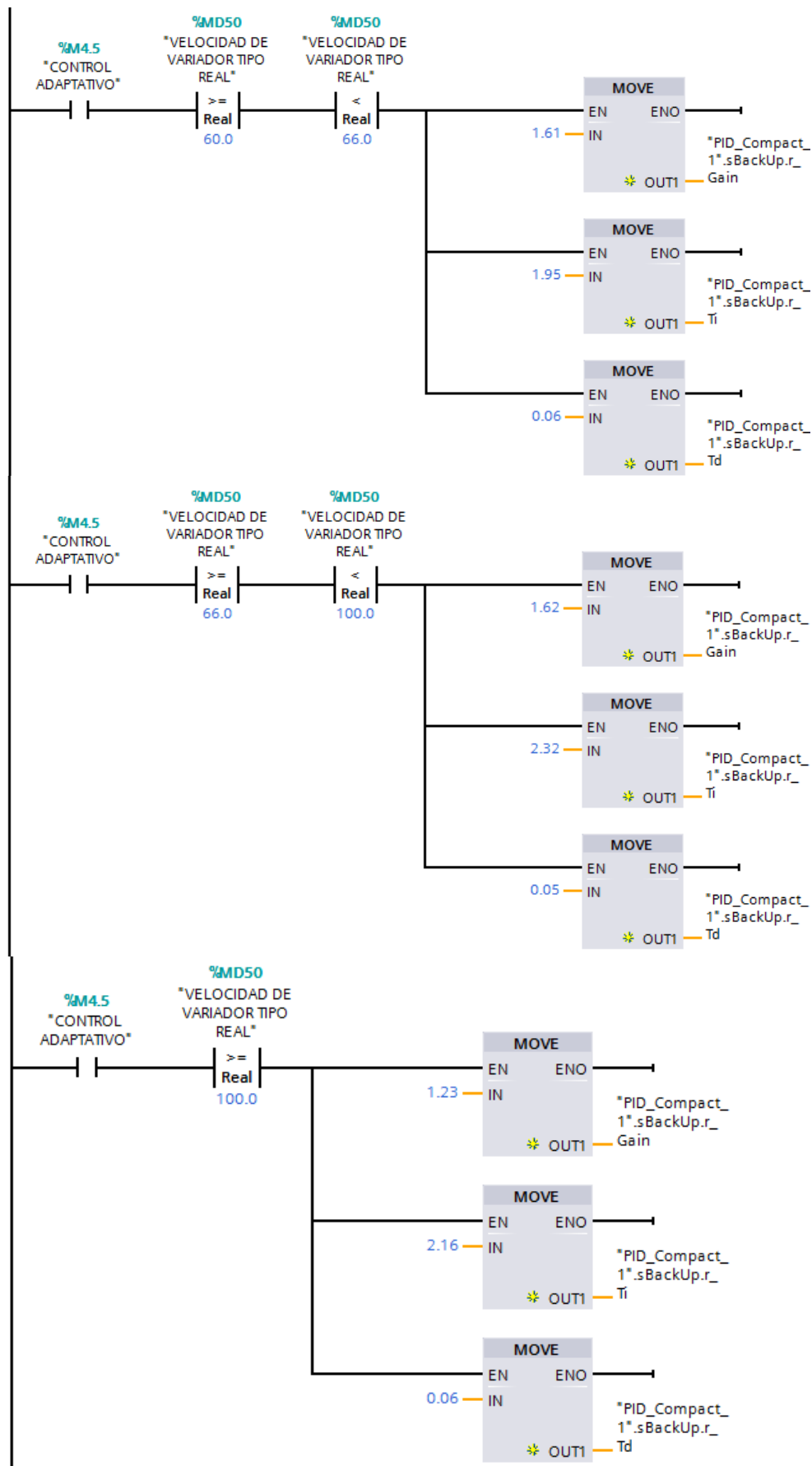


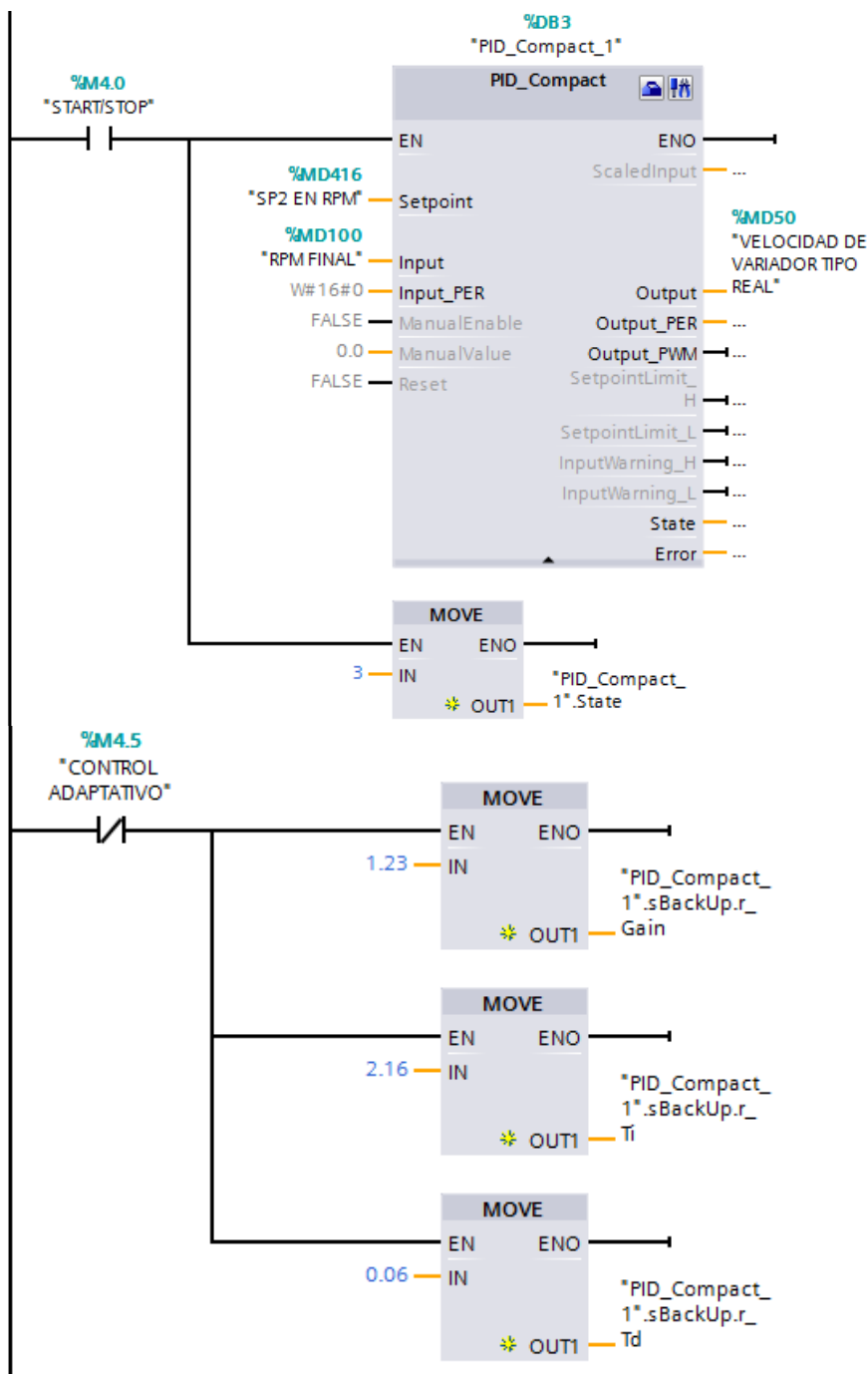


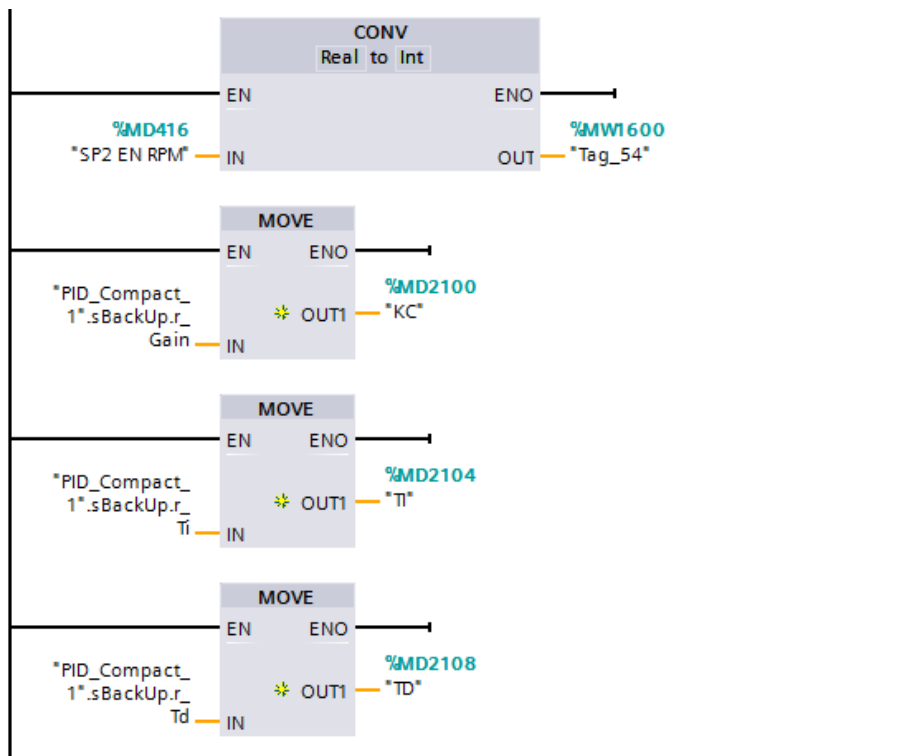
Segmento 7:

CONTROL ADAPTATIVO



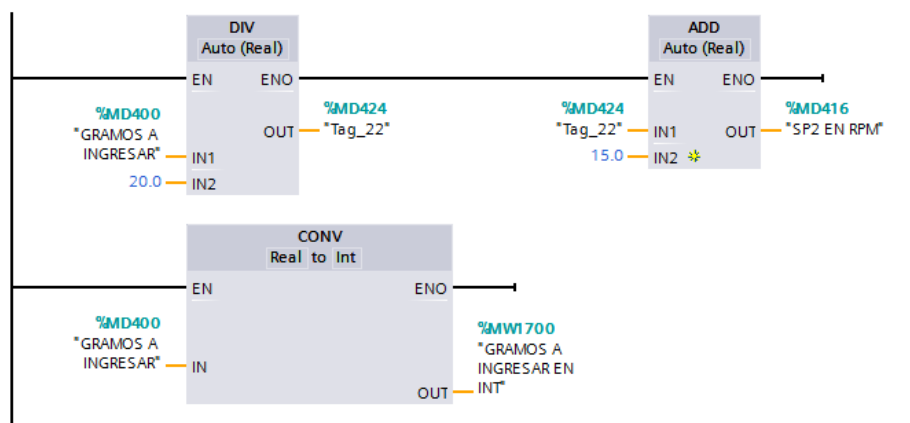






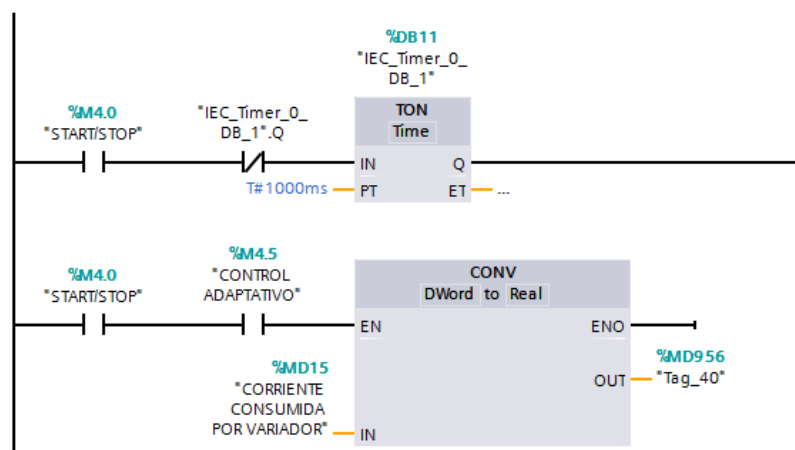
Segmento 8:

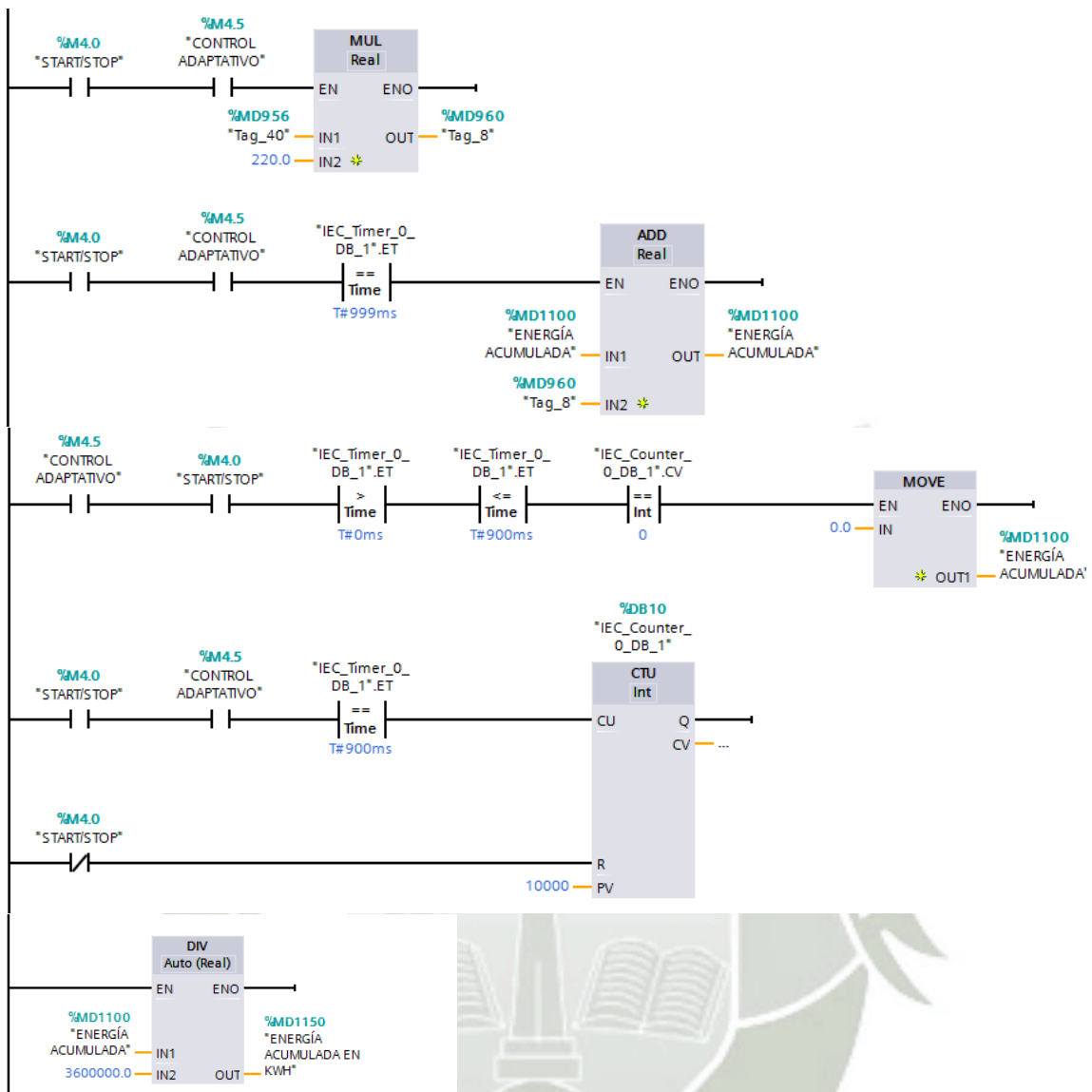
CONVERSIÓN DE SP1 A SP2



Segmento 9:

CALCULO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA





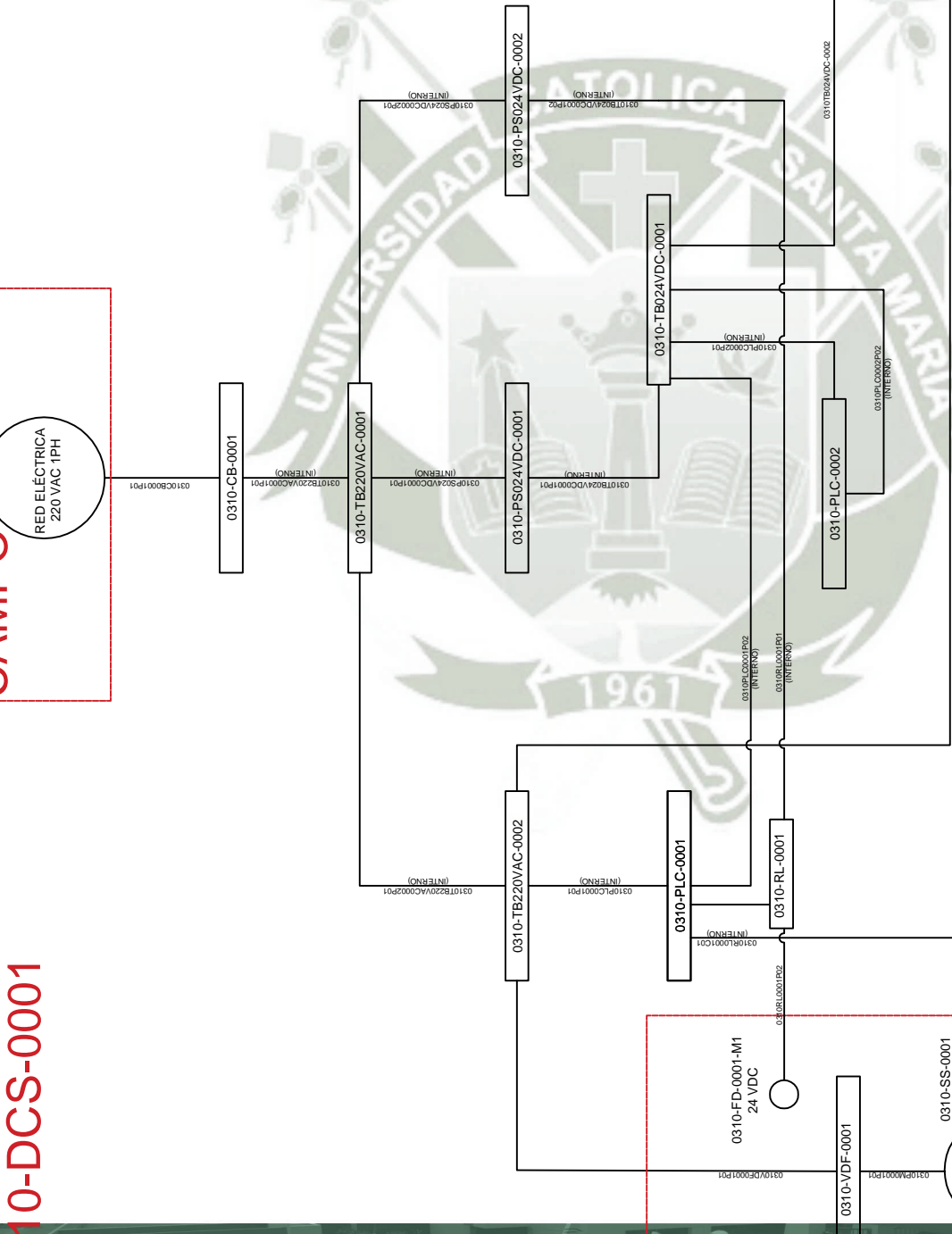
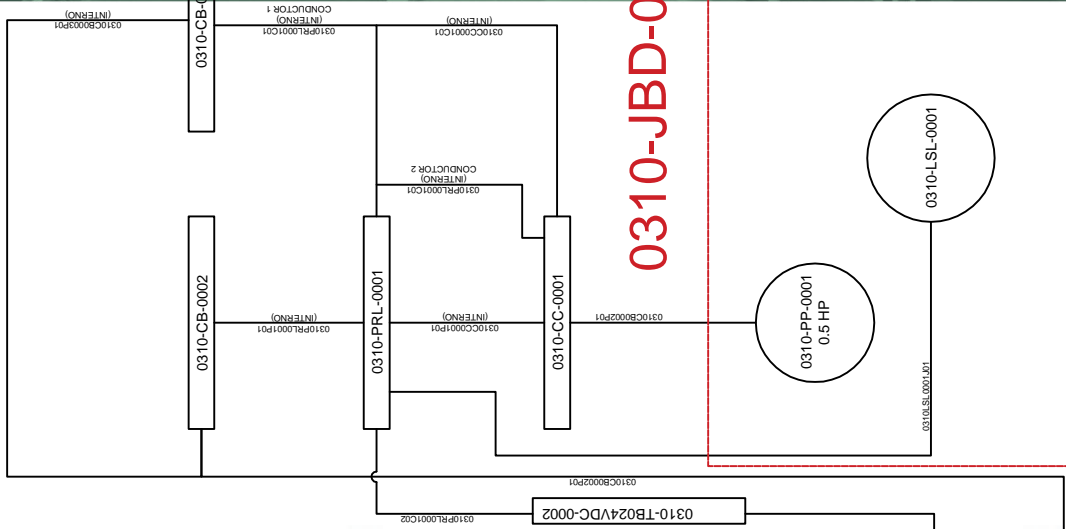
ANEXO 3 – Lista de y planos E&I

- 0310-DB-0001 REV 00 DIAGRAMA DE BLOQUES.
- 0310-DCEC-0001 REV00 DIAGRAMA DE CONEXIONADO
ELÉCTRICO Y DE CONTROL.
- 0310-DCEC-0002 REV00 DIAGRAMA DE CONEXIONADO
ELÉCTRICO Y DE CONTROL.
- 0310-DCEC-0003 REV00 DIAGRAMA DE CONEXIONADO
ELÉCTRICO Y DE CONTROL.
- 0310-DCEC-0004 REV00 DIAGRAMA DE CONEXIONADO
ELÉCTRICO Y DE CONTROL.
- 0310-DCI-0001 REV00 DIAGRAMA DE CONEXIONADO
INSTRUMENTACIÓN
- 0310-DG-0001 REV 00 DIAGRAMA DE ARREGLOS
GENERALES
- 0310-DG-0002 REV 00 DIAGRAMA DE ARREGLOS
GENERALES
- 0310-P&ID-0001 REV00 DIAGRAMA P&ID PLANTA



0310-JBD-0001

CAMPO



CAMPO

0310-DCS-0001

PROYECTO: UPGRADE BALL MILL SYSTEM 0310 AREA
DESCRIPCIÓN: DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL DEL PROCESO
CÓDIGO DE PLANO: 0310-DB-0001 REV 00

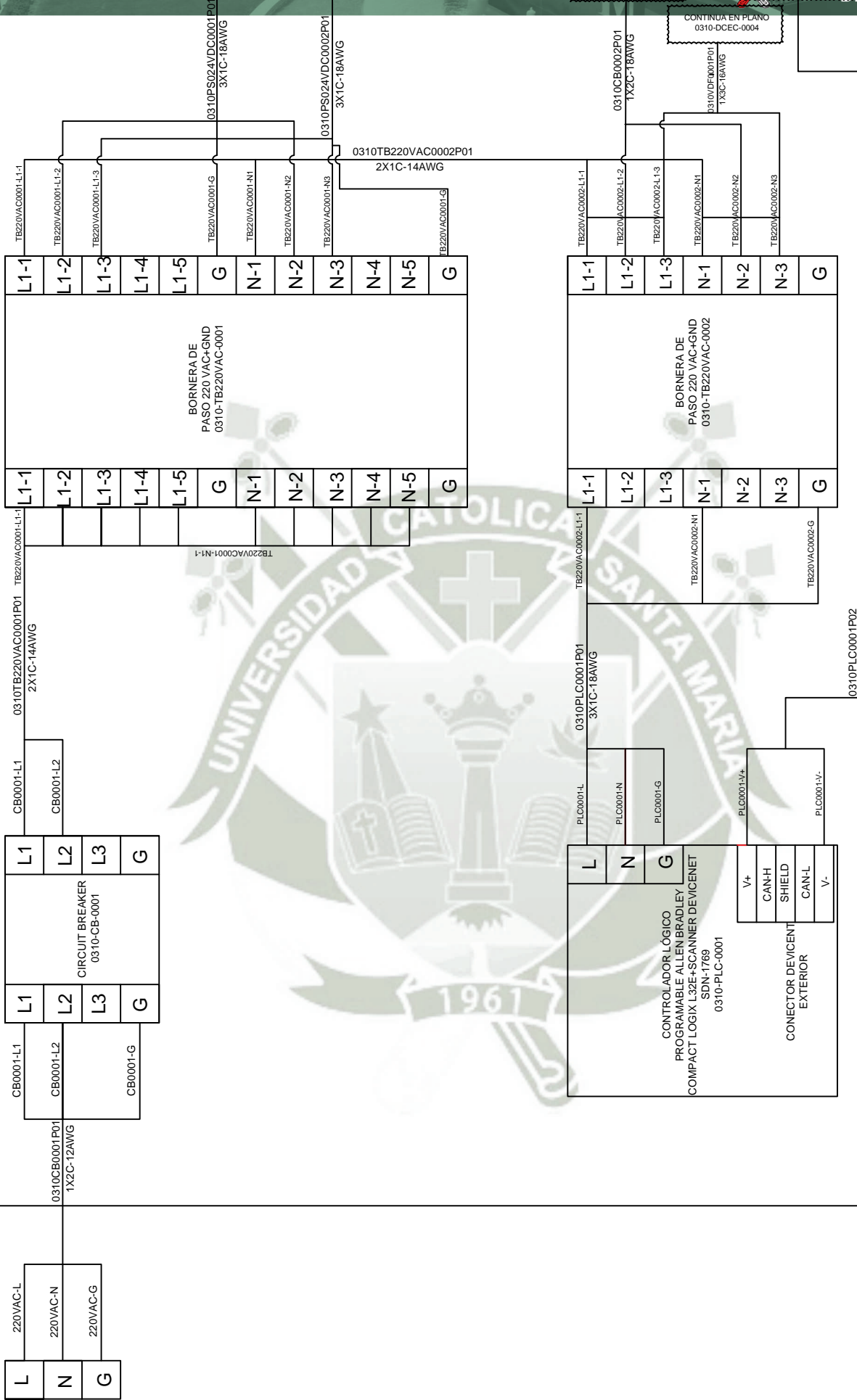
E & I SOLUTIONS S.A

REVISIÓN	DESCRIPCIÓN	FECHA	REVISIÓN	FECHA	REVISIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN
A	ÁMBITO DISEÑO DE INGENIERÍA	17/07/2015					
B	ÁMBITO DISEÑO DE INGENIERÍA	03/08/2015					
0	POWER DESIGN APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN	17/07/2015					





PANEL DE CONTROL DECENTRALIZADO 0310-DCS-0001



CONTINUA EN PLANO 0310-DCEC-0002

CONTINUA EN PLANO 0310-DCEC-0002

CONTINUA EN PLANO 0310-DCEC-0003

CONTINUA EN PLANO 0310-DCEC-0002

CONTINUA EN PLANO 0310-DCEC-0004

PROYECTO: UPGRADE BALL MILL SYSTEM 0310 AREA
DESCRIPCIÓN: DIAGRAMA DE CONEXIONADO ELÉCTRICO Y DE CONTROL
CÓDIGO DE PLANO: 0310-DCEC-0001 REV 00

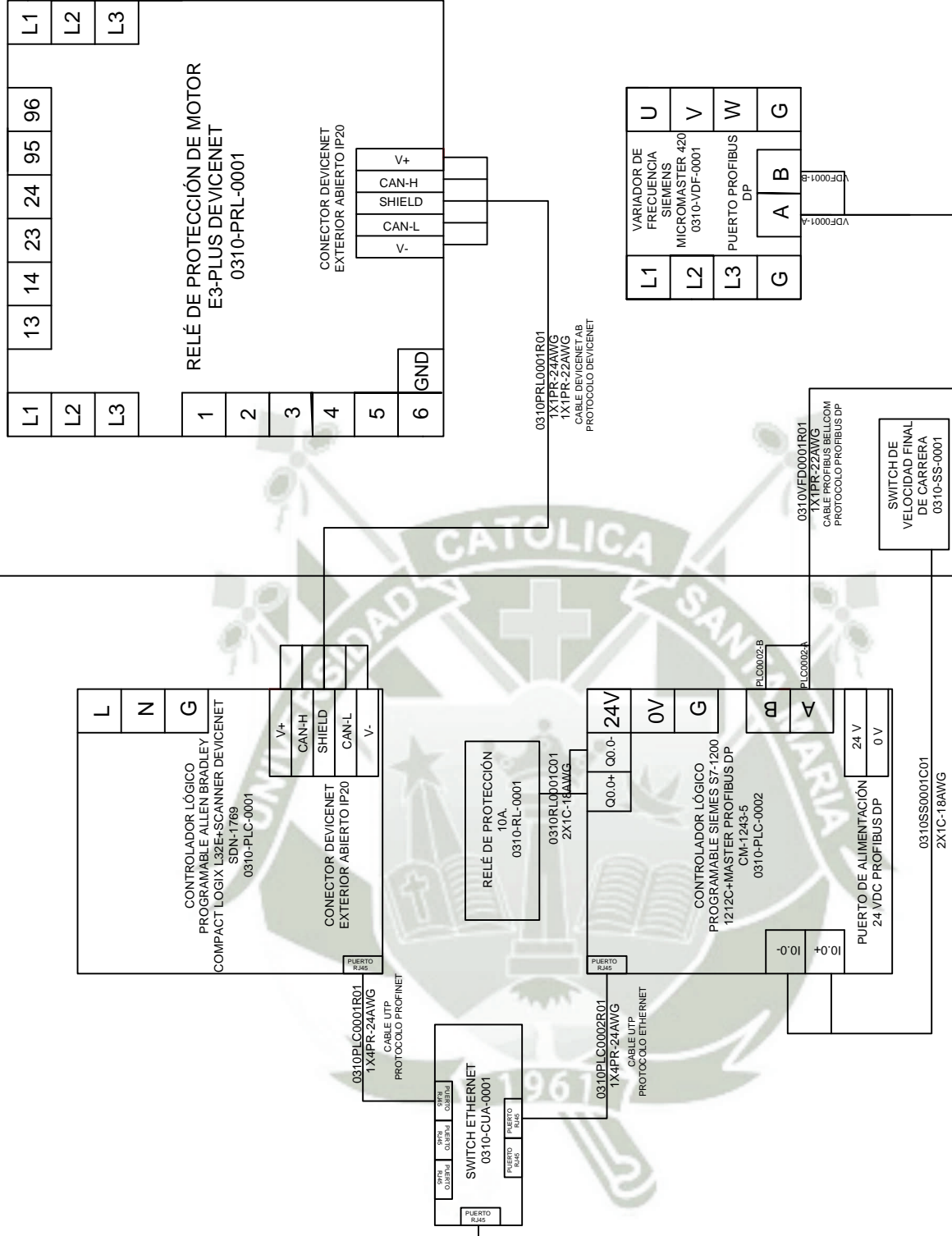
E & I SOLUTIONS S.A

REVISIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA	REVISIÓN	DESCRIPCIÓN	FECHA
A	17/07/2015	REVISIÓN DE INGENIERIA				
B	03/08/2015	ELABORADO DE INGENIERIA				
0	18/09/2015	POWER DESIGN APROBADO PARA CONSTRUCCION				

0310-JBD-0001/FIELD

0310-DCS-0001

PANEL DE CONTROL



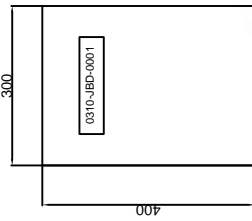
REVISIÓN	DESCRIPCIÓN	FECHA	REVISIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA
A	SE HA DISEÑADO DE INGENIERIA	17/07/2015				
B	SE HA DISEÑADO DE INGENIERIA	03/08/2015				
C	SE HA DISEÑADO APROBADO PARA CONSTRUCCION	18/09/2015				

PROYECTO: UPGRADE BALL MILL SYSTEM 0310 AREA

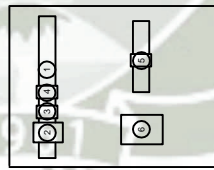
DESCRIPCIÓN: DIAGRAMA DE CONEXIONADO ELÉCTRICO Y DE CONTROL

CÓDIGO DE PLANO: 0310-DCI-0001 REV 00

E & I SOLUTIONS S.A



ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TAGUAPUNDO
1	ALAMBRE	2	INDICADA
2	PLACA DE ALUMINIO	1	0310-0001
3	PLACA DE ALUMINIO	1	0310-0002
4	PLACA DE ALUMINIO	1	0310-0003
5	PLACA DE ALUMINIO	1	0310-0004
6	PLACA DE ALUMINIO	1	0310-0005



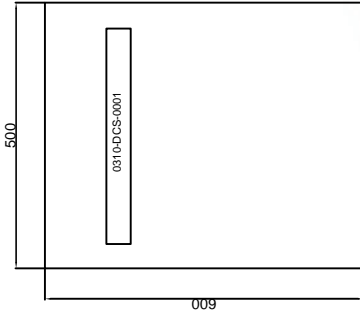
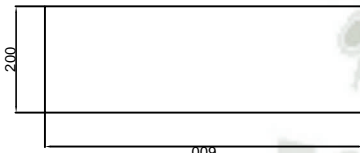
PROYECTO: UPGRADE BALL MILL SYSTEM 0310 AREA

DESCRIPCIÓN: PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO 0310-JBD-0001

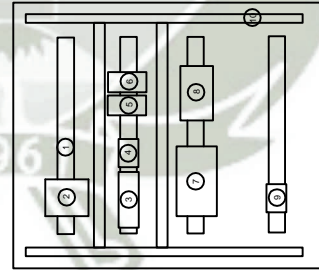
CÓDIGO DE PLANO: 0310-DG-0002 REV 00

E&I SOLUTIONS S.A

REVISIÓN	DESCRIPCIÓN	FECHA	REVISIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA
A	PRIMER DISEÑO DE INGENIERIA	17/02/2015				
B	SEGUNDO DISEÑO DE INGENIERIA	03/08/2015				
0	PRIMER DISEÑO APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN	17/02/2015				



NÚMERO DE ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TRANSFERENCIA
1	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
2	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
3	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
4	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
5	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
6	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
7	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
8	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
9	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR
10	PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO	1	NO TRANSFERIR



PROYECTO: UPGRADE BALL MILL SYSTEM 0310 AREA

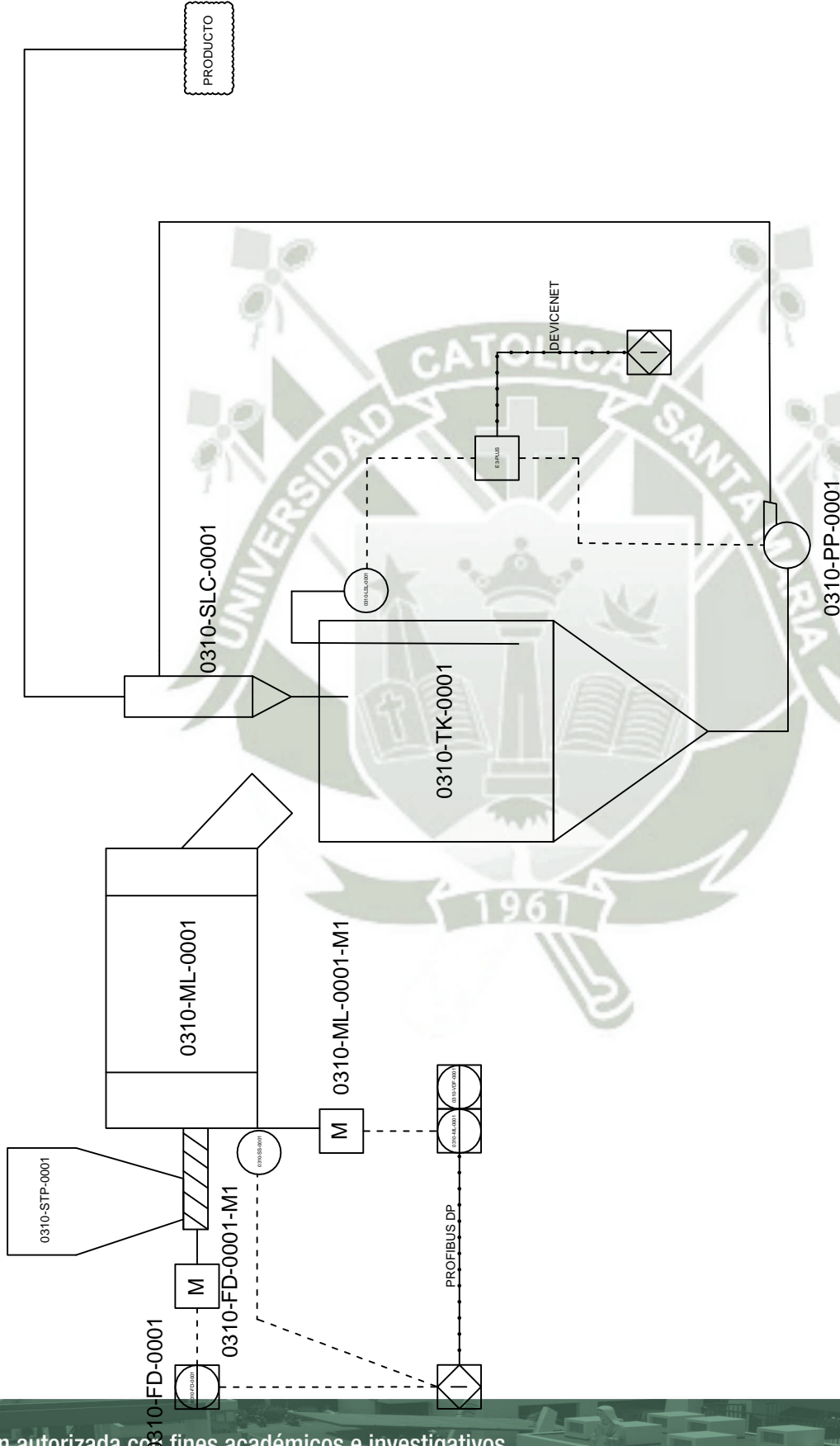
DESCRIPCIÓN: PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS DE TABLERO 0310-DCS-0001

CÓDIGO DE PLANO: 0310-DG-0001 REV 00

E&I SOLUTIONS S.A

REVISIÓN	DESCRIPCIÓN	FECHA	REVISIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA
A	PRIMER DISEÑO DE INGENIERIA	17/07/2015				
B	SEGUNDO DISEÑO DE INGENIERIA	02/08/2015				
0	PRIMER DISEÑO APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN	17/09/2015				

P&ID



PROYECTO: UPGRADE BALL MILL SYSTEM 0310 AREA
DESCRIPCIÓN: DIAGRAMA DE PROCESO 1
CÓDIGO DE PLANO: 0310-P&ID-0001 REV 00

E&I SOLUTIONS S.A

REVISIÓN	DESCRIPCIÓN	FECHA	REVISIÓN	FECHA	REVISIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN
A	PRIMER DISEÑO DE INGENIERIA	17/07/2015					
B	SEGUNDO DISEÑO DE INGENIERIA	23/08/2015					
0	PRIMER DISEÑO APROBADO PARA CONSTRUCCION	18/09/2015					

ANEXO 4 – Presupuesto de Proyecto

PRESUPUESTO DE PROYECTO				
ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO EN SOLES	
			P.U.	P.TOTAL
1	1	TABLERO ELÉCTRICO 600x500	120.00	120.00
2	1	TABLERO ELÉCTRICO 400x300	70.00	70.00
3	1	PROCESADOR PLC ALLEN BRADLEY COMPACTLOGIX L32E	7,693.83	7,693.83
4	1	FUENTE INSTRUMENTACIÓN ALLEN BRADLEY PARA COMPACTLOGIX 24 VDC 4 A 1769-PB4 1769PB4 AB	1,623.23	1,623.23
5	1	SCANNER DEVICENET 1769-SDN	2,306.50	2,306.50
6	1	RELÉ DE PROTECCIÓN E3-PLUS 0-5A	1,230.00	1,230.00
7	1	PLC SIEMENS S7-1200 1212C RL/RL/RL	1,250.30	1,250.30
8	1	MÓDULO DE COMUNICACIÓN MAESTRO PROFIBUS	1,980.35	1,980.35
9	1	VARIADOR MICROMASTER 420 2.0 HP + MODULO DE COMUNICACIÓN PROFIBUS + HMI BPOP	1,650.00	1,650.00
10	1	FUENTE DE ALIMENTACIÓN 24VDC ALLEN BRADLEY 10A	1,621.00	1,621.00
11	1	FUENTE DE ALIMENTACIÓN 24VDC ALLEN BRADLEY 1.2A	240.00	240.00
12	1	FUENTE DE LAIMENTACIÓN 24 VDC PHOENIX CONTACT 1.5A.	300.00	300.00
13	1	BREAKER TRIFÁSICO DE 30A	40.00	40.00
14	3	BREAKER MONOFÁSICOS DE 15A	25.00	75.00
15	30	BORNERAS DE PASO	2.50	75.00
16	2	M. DE CABLE TRIFÁSICO VULCANIZADO 12 AWG	6.50	13.00
17	3	M CABLE MONOFÁSICO VULCANIZADO 14 AWG	3.80	11.40
18	1.5	M CABLE DEVICENET DELGADO 24/22 AWG	18.00	27.00
19	2	CONECTORES GENÉRICOS DEVICENET	24.00	48.00
20	2	CONECTORES RS 485 PROFIBUS	105.00	210.00
21	4	M. DE CABLE PROFIBUS 24 AWG	16.60	66.40
22	2	M. RIEL DIN	6.00	12.00
23	1	PAQUETE DE CABLE INDECO 16 AWG FLEXIBLE X 100M.	95.00	95.00
24	1	MOTOR SIEMENS TRIFÁSICO 1.8 HP 220 VAC	1,100.00	1,100.00
25	1	MOTOR 24 VDC 0.4 HP	95.00	95.00
26	1	BOMBA 220 VAC MONOFÁSICA 0.5 HP	160.00	160.00
27	1	ENSAMBLE MECÁNICO MOLIENDA	850.00	850.00
28	1	ENSAMBLE MECÁNICO CICLONES	200.00	200.00

29	1	HONORARIOS PROFESIONALES ENSAMBLE ELÉCTRICO	800.00	800.00
30	1	HONORARIOS PROFESIONALES PROGRAMACIÓN	8,000.00	8,000.00
31	1	HONORARIOS PROFESIONALES GESTIÓN DE PROYECTO	19,000.00	19,000.00
			SUBTOTAL:	50,963.01
			I.G.V. 18%:	9,173.34
			TOTAL:	60,136.35

