

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE POSGRADO



**MODELAMIENTO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LAS VARIABLES  
CRÍTICAS DE UN MOLINO SEMIAUTÓGENO MEDIANTE UN SISTEMA EXPERTO  
BASADO EN CONTROL MPC Y LÓGICA DIFUSA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

Autor:

Ing. Guillermo Alonso Alfaro Rosas

Asesor:

Dr. Carlos Gustavo Pérez Zúñiga

Lima – Perú

2021

## RESUMEN

Un molino SAG, equipo principal en el circuito de molienda de minerales tiene como objetivo reducir el tamaño de su mineral alimentado del área de chancado y adaptarlo para etapa de flotación buscando la mayor eficiencia y optimización de cada una de sus variables de control y mejorando las habilidades de sus operadores de sala de control.

Esta tesis se centrará en el desarrollo de un modelo matemático comprendiendo las principales variables del molino y ajustando su respuesta según datos tomados de distintas plantas a nivel mundial.

Posteriormente se configurará y enlazará un sistema de control básico con el modelamiento previamente creado y sintonizado, dicho sistema presentará el sistema de control primario encargado de evaluar las condiciones básicas de arranque y parada del molino y sus grupos de control involucrados, así como también los lazos de control básicos para su operación. Además, se diseñará e integrará el sistema de supervisión respectivo para el control de operador y supervisor de dicho proceso modelado.

El sistema de control avanzado diseñado implementa estrategias de control de optimización en tiempo real para el proceso de molienda primaria.

La lógica de control considerada se basa en decisiones secuenciales que ejecutarán controladores predictivos basados en modelos o lógica difusa orientando el proceso a buscar estabilidad y luego optimización de cada variable crítica, esto se conseguirá extrayendo las variables de proceso del sistema de control primario y calculando su respectiva acción según cada objetivo; este sistema considera la evaluación de las variables críticas del molino SAG cuando el sistema experto esté encendido y haciendo el seguimiento respectivo cuando esté apagado.

Finalmente se realizará la evaluación y comparación de variables críticas del molino considerando dos escenarios, cuando el sistema experto se encuentre encendido teniendo este control sobre los actuadores del molino SAG y cuando el sistema experto se encuentre apagado y se pueda operar cada actuador de forma manual.



A mi padre, el mejor, lo que soy y a lo que  
pude llegar o llegaré te lo debo a ti.

1949/01/20 – 2021/08/06

## **Agradecimientos**

Mis agradecimientos, sin cuyo apoyo fundamental esta tesis no hubiera podido ser desarrollada, son para:

- Mi familia por su constante apoyo a cumplir con mis metas profesionales y personales.
- Todos mis colegas, con los que tengo o tuve la gran oportunidad de trabajar, compartir e intercambiar valiosos conocimientos tanto técnicos como personales.
- Mi asesor, Dr. Carlos Gustavo Pérez Zúñiga por su guía constante y gran apoyo en el desarrollo y finalización de esta tesis.

## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Estado del Arte de Molino SAG .....	17
1.1 Introducción .....	17
1.2 Circuito de Procesamiento de Molienda SAG .....	18
1.3 Principio de Operación de Molino SAG.....	19
1.4 Consideraciones Generales en la Operación Óptima del Molino SAG .....	21
1.4.1 Operación Óptima según Peso de Molino .....	21
1.4.2 Operación Óptima según Potencia y Eficiencia del Molino.....	22
1.4.3 Operación Óptima según Impactos Críticos .....	22
1.4.4 Operación Óptima basada en la Gestión del Operador .....	23
1.4.5 Operación Óptima según el Tipo de Mineral que Procesar .....	24
1.5 Planteamiento de Soluciones a Problemática.....	24
1.5.1 Desarrollo de Modelamiento de Molino SAG .....	27
1.5.2 Desarrollo de Sistema de Control Primario.....	27
1.5.3 Desarrollo de Sistema de Supervisión.....	28
1.5.4 Desarrollo de Sistema de Control Avanzado .....	28
1.6 Objetivos de la Tesis.....	28
1.6.1 Objetivo General .....	28
1.6.2 Objetivos Específicos.....	29
Capítulo 2. Desarrollo de Modelos Matemáticos del Molino SAG.....	30
2.1 Introducción .....	30
2.2 Modelamiento de Circuito de Molienda.....	30
2.2.1 Modelamiento de Alimentadores a Molino SAG .....	31
2.2.2 Modelamiento de Sólidos en Molino SAG .....	33
2.2.3 Modelamiento de Agua en Molino SAG.....	38
2.2.4 Resumen de Ecuaciones de Modelos .....	38
2.3 Diseño y Configuración de Modelamiento .....	40

2.3.1	Estaciones Consideradas .....	40
2.3.2	Lista de Instrumentos por Considerar.....	40
2.3.3	Puesta en Operación de Modelo en Línea .....	41
2.4	Descripción de Molino SAG a estudiar .....	41
2.5	Resumen del modelo objeto de estudio con parámetros .....	42
2.6	Validación de Modelos en base a datos simulados y datos de referencia.....	43
2.7	Conclusiones .....	45
Capítulo 3. Desarrollo de sistema de Control Primario y Sistema de Supervisión.....		47
3.1	Introducción .....	47
3.2	Diseño de Sistema de Control Primario.....	47
3.2.1	Filosofía de Operación de Controlador.....	48
3.2.2	Estaciones Consideradas .....	49
3.2.3	Puesta en Operación de Controlador Primario .....	49
3.3	Diseño de Sistema de Supervisión .....	50
3.3.1	Estaciones Consideradas .....	51
3.3.2	Puesta en Operación de Sistema de Supervisión .....	52
3.4	Ejecución de Secuencias de Entrada y Salida.....	52
3.4.1	Rutina para Digital Input – Entrada Digital.....	53
3.4.2	Rutina para Analog Input – Entrada Analógica.....	54
3.4.3	Rutina para Controlador PID – Salida Analógica.....	55
3.5	Ejecución de Secuencias de Ejecución de Equipos .....	55
3.5.1	Permisivos de Control.....	56
3.5.2	Enclavamientos de Control.....	56
3.5.3	Secuencia de Arranque .....	56
3.5.4	Secuencia de Parada.....	57
3.6	Ejecución de Secuencias de Proceso.....	57
3.6.1	Configuración de Lazo PID.....	58

3.6.2	Algoritmo PID utilizado.....	58
3.6.3	Sintonización de Lazo PID.....	59
3.6.4	Parámetros de Configuración de Bloque PIDE.....	61
3.7	Modos de Operación.....	63
3.7.1	Modo de Operación Manual - Automático .....	63
3.7.2	Modo de control: Local, Remoto, MOA.....	63
3.8	Criterio de Comunicación.....	64
3.8.1	Servidor OPC – RSLinx™ Gateway.....	64
3.8.2	Cliente OPC – Simulink OPC Data Access Server .....	64
3.9	Nomenclatura de programación.....	65
3.10	Diseño de Sistema de Supervisión .....	65
3.10.1	Arquitectura de Sistema de Supervisión.....	66
3.10.2	Niveles de Seguridad.....	67
3.10.3	Especificación de Grupos de Molino SAG .....	68
3.11	Conclusiones .....	69
Capítulo 4.	Desarrollo de Sistema de Control Avanzado .....	71
4.1	Introducción .....	71
4.2	Desarrollo de Sistema de Control Avanzado .....	72
4.2.1	Filosofía de Operación de Controlador.....	72
4.2.2	Estaciones Consideradas .....	73
4.2.3	Puesta en Operación de Controlador Primario .....	73
4.3	Definición de Grupos de Control .....	74
4.3.1	Activación de Grupos de Control Primarios .....	74
4.3.2	Activación de Grupos de Control Secundarios .....	75
4.4	Definición de Árbol de Decisión .....	76
4.4.1	Definición de Lógica de Decisión de Nodos Primarios .....	76
4.4.2	Definición de Lógica de Decisión para Nodos Secundarios .....	77

4.5	Definición de Controladores MPC.....	77
4.5.1	Estructura de Controladores MPC.....	79
4.5.2	Configuración de Controladores MPC.....	86
4.5.3	Sintonización y Resultados de Controladores MPC.....	95
4.6	Definición de Controladores de Lógica Difusa.....	101
4.6.1	Tabla de Reglas heurísticas.....	101
4.6.2	Funciones de Membresía.....	102
4.6.3	Resultados de Controlador de Lógica Difusa.....	103
4.7	Comunicación e Integración con Sistema de Supervisión Primario.....	104
4.7.1	Protocolo de Comunicación.....	105
4.7.2	Señales de Sistema de Control Avanzado.....	106
4.8	Resultados de Mejora con Sistema de Control Avanzado.....	106
4.8.1	Mejora de Alimentación y Producto de Molino SAG.....	107
4.8.2	Mejora de Impactos Críticos de Molino SAG.....	108
4.8.3	Mejora de Potencia de Molino SAG.....	108
4.8.4	Mejora Económica en Proceso.....	109
4.9	Conclusiones.....	109
	Conclusiones Generales.....	111
	Recomendaciones.....	112
	Bibliografía.....	113
	Anexos.....	117
A.1	Diseño de Pantalla de Supervisión.....	117
A.1.1	Resolución De La Pantalla.....	117
A.1.2	Color de Fondo.....	118
A.1.3	Faceplate Analógico.....	118
A.1.3.1	Calculation.....	119
A.1.3.2	Configuration.....	119

A.1.4	Faceplate de Lazo de Control .....	121
A.1.4.1	Configuration .....	122
A.2	Lista de Instrumentos .....	123
A.3	Parámetros de Estaciones .....	130
A.3.1	Servidor de Dominio .....	130
A.3.2	Servidor de Modelamiento de Planta - Matlab .....	130
A.3.3	Estación de Ingeniería.....	131
A.3.4	Servidor de Sistema de Control Avanzado.....	131
A.3.5	Servidor de Sistema de Supervisión .....	132



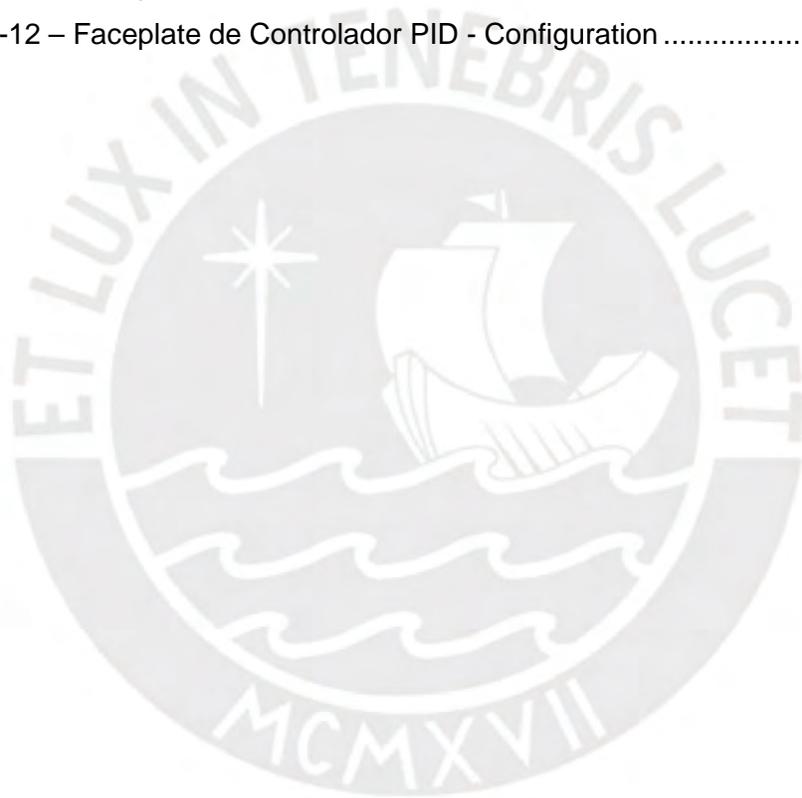
## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Entradas y Salidas de Proceso de Molienda.....	18
Figura 1-2 – Circuito de Proceso de Molienda .....	19
Figura 1-3 – Chute de alimentación del molino SAG (Apelt, 2005, págs. 36-37) .....	20
Figura 1-4 – Proceso de Molienda de Mineral en Molino SAG (Apelt, 2005, pág. 47) ..	20
Figura 1-5 – Circuito de Molino SAG (Apelt, 2005, págs. 36-37) .....	21
Figura 1-6 – Sensores de Impactómetro y Sentido de Giro .....	23
Figura 1-7 – Bloques de Comunicación de Sistema de Control .....	25
Figura 1-8 – Arquitectura del Sistema de Control Propuesto .....	26
Figura 1-9 – Circuito de Molienda Primaria Simulado en Simulink.....	27
Figura 1-10 – Bloques de Sistema de Control Primario y Modelo Matemático .....	28
Figura 1-11 – Bloques de Sistema de Control Primario y Modelo Matemático .....	28
Figura 2-1 – Circuito de Molienda Primaria a Modelar .....	30
Figura 2-2 – Circuito de Molienda Primaria Simulado en Simulink.....	31
Figura 2-3 – Configuración de Alimentadores en Simulink.....	32
Figura 2-4 – Configuración por flujo de partículas.....	33
Figura 2-5 – Diagrama de Etapas de Conmición de Molino SAG .....	33
Figura 2-6 – Arreglo matricial de flujos de alimentación.....	34
Figura 2-7 – Etapa de Molienda .....	35
Figura 2-8 – Diagrama de Etapas de Molienda.....	37
Figura 2-9 – Máscara de Configuración de Molino SAG .....	38
Figura 2-10 – Estación de Modelo de Molino SAG en Línea.....	40
Figura 2-11 – Enlace de Comunicación de Modelo Matemático en Línea. ....	41
Figura 2-12 – Parámetros a Considerar en Modelo de Estudio .....	42
Figura 2-13 – Tendencia de Variables Manipuladas de Molino SAG .....	44
Figura 2-14 – Tendencia de Variables Medidas Reales y Modeladas de Molino SAG .	45
Figura 3-1 – Arquitectura de Tareas de Controlador.....	48
Figura 3-2 – Especificaciones de Controlador 01.....	49
Figura 3-3 – Especificaciones de Estación de Ingeniería 01 .....	49
Figura 3-4 – Bloques de Comunicación de ControllogixTM .....	50
Figura 3-5 – Servidor FactoryTalk View StudioTM.....	51
Figura 3-6 – Especificaciones de Estación de Ingeniería 01 .....	51
Figura 3-7 – Especificaciones de Estación Cliente 01.....	51
Figura 3-8 – Especificaciones de Estación Cliente 02.....	51

Figura 3-9 – Bloques de Comunicación de Sistema de Supervisión.....	52
Figura 3-10 – Jerarquía de un Control Modulo en la Estructura de un CLX.....	53
Figura 3-11 – Bloque Definido por Usuario de Entrada Digital.....	53
Figura 3-12 – Bloque Definido por Usuario de Entrada Analógica.....	54
Figura 3-13 – Bloque Definido por Usuario de Control PID.....	55
Figura 3-14 – Bloque de Control PIDE.....	58
Figura 3-15 – Configuración de lazos de control de alimentadores.....	59
Figura 3-16 – Sintonización de Lazo PID Secundario 0100-WIC-0114.....	60
Figura 3-17 – Sintonización de Lazo PID Primario 0100-WIC-0431.....	61
Figura 3-18 – Respuesta de Lazos Secundarios a set point de lazo principal.....	61
Figura 3-19 – Arquitectura de Comunicación entre Simulink y RSLogix 5000TM.....	64
Figura 3-20 – Diseño de Pantalla Principal.....	66
Figura 3-21 – Arquitectura de Sistema de Supervisión Primario.....	66
Figura 3-22 – Indicación “OK” de Estado de Grupos de Molino SAG.....	68
Figura 3-23 – Indicación “FAIL” de Estado de Grupos de Molino SAG.....	68
Figura 3-24 – Diseño de Pantalla de Control de Molino SAG.....	69
Figura 4-1 – Funcionamiento de Sistema de Control Avanzado.....	71
Figura 4-2 – Servidor FLSmidth PXPTM.....	73
Figura 4-3 – Estación Cliente 01.....	73
Figura 4-4 – Estación Cliente 02.....	73
Figura 4-5 – Bloques de Comunicación del Sistema Experto.....	74
Figura 4-6 – Activación de Grupo de Control Principal.....	75
Figura 4-7 – Indicadores de Grupo de Control Principal.....	75
Figura 4-8 – Activación de Grupo de Control Secundario.....	76
Figura 4-9 – Indicadores de Grupo de Control Principal.....	76
Figura 4-10 – Árbol de Decisión de Grupo de Control Principal.....	77
Figura 4-11 – Árbol de Decisión de Grupo de Control Principal.....	77
Figura 4-12 – Diagrama de Bloques de Modelo de Planta para Controlador MPC.....	78
Figura 4-13 – Seguimiento de Iteración de Estados de Controlador MPC.....	81
Figura 4-14 – Bloques de Control de Controlador Fallback.....	86
Figura 4-15 – Bloques de Control de Controlador Normal.....	87
Figura 4-16 – Componentes de Controlador Normal.....	88
Figura 4-17 – Condición de Alto Peso desde Árbol de Decisión.....	88
Figura 4-18 – Condición de Alto Peso.....	89

Figura 4-19 – Bloques de Control de Controlador de Alto Peso.....	90
Figura 4-20 – Componentes de Controlador de Alto Peso.....	90
Figura 4-21 – Condición de Alto Potencia desde Árbol de Decisión .....	91
Figura 4-22 – Condición de Alta Potencia .....	91
Figura 4-23 – Bloques de Control de Controlador de Alta Potencia.....	92
Figura 4-24 – Componentes de Controlador de Alta Potencia.....	93
Figura 4-25 – Condición de Alto Potencia desde Árbol de Decisión .....	93
Figura 4-26 – Condición de Alta Potencia .....	94
Figura 4-27 – Bloques de Control de Controlador de Altos Impactos Críticos .....	94
Figura 4-28 – Componentes de Controlador de Altos Impactos Críticos .....	95
Figura 4-29 – Predicción de Controlador MPC de Actuadores.....	98
Figura 4-30 – Predicción de Controlador MPC de Mediciones.....	98
Figura 4-31 – Ejecución de Controlador MPC .....	99
Figura 4-32 – Control de Peso de Molino SAG sin Perturbación de Pebbles .....	100
Figura 4-33 – Control de Peso de Molino SAG con Perturbación de Pebbles .....	100
Figura 4-34 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – Low Low.....	102
Figura 4-35 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – Low .....	102
Figura 4-36 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – Medium .....	102
Figura 4-37 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – High.....	102
Figura 4-38 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – High High .....	102
Figura 4-39 – Funciones de Membresía de Potencia – Low Low.....	102
Figura 4-40 – Funciones de Membresía de Potencia – Low .....	102
Figura 4-41 – Funciones de Membresía de Potencia – Medium .....	102
Figura 4-42 – Funciones de Membresía de Potencia – High .....	102
Figura 4-43 – Funciones de Membresía de Potencia – High High .....	102
Figura 4-44 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – Low Low..	103
Figura 4-45 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – Low .....	103
Figura 4-46 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – Medium...	103
Figura 4-47 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – High .....	103
Figura 4-48 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – High High	103
Figura 4-49 – Resultados de Controlador Difuso de Control de Peso.....	104
Figura 4-50 – Ejecución de Controlador Difuso de Optimización .....	104
Figura 4-51 – Arquitectura de Sistema de Control Avanzado .....	105
Figura A-1 – Áreas de Pantalla Principal.....	117

Figura A-2 – Banner de navegación.....	117
Figura A-3 – Banner de Alarmas .....	118
Figura A-4 – Símbolo Gráfico de Valor Analógico.....	118
Figura A-5 – Símbolo Gráfico en rango normal.....	118
Figura A-6 – Símbolo gráfico en Estado de Alarma .....	118
Figura A-7 – Faceplate Analógico .....	119
Figura A-8 – Faceplate Analógico – Calculation .....	119
Figura A-9 – Faceplate Analógico – Configuration.....	120
Figura A-10 – Símbolo Gráfico de PID.....	121
Figura 0-11 – Faceplate de Controlador PID.....	121
Figura 0-12 – Faceplate de Controlador PID - Configuration .....	122



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 – Granulometría de Alimentadores .....	31
Tabla 2-2 – Tabla Resumen de Ecuaciones de Modelamiento .....	39
Tabla 2-3 – Especificaciones Técnicas de Molino SAG a modelar .....	42
Tabla 2-4 – Variables Manipuladas a Molino SAG .....	43
Tabla 2-5 – Variables Medidas de Molino SAG.....	44
Tabla 3-1 – Tabla de Variables de Entrada Digital configurados en CLX.....	54
Tabla 3-2 – Tabla de Variables de Entrada Analógica configurados en CLX.....	54
Tabla 3-3 – Tabla de Variables de Salida Analógica configurados en CLX .....	55
Tabla 3-4 – Tabla de Lazos PID configurados en Controlador Primario. ....	57
Tabla 3-5 – Tabla de Parámetros de Entrada de Bloque PIDE .....	62
Tabla 3-6 – Tabla de Parámetros de Salida de Bloque PIDE .....	62
Tabla 3-7 – Modo de Operación de Motores Secundarios.....	63
Tabla 3-8 – Señales Lectura/Escritura entre Modelo y Controlador Primario .....	65
Tabla 3-9 – Tabla de Niveles de Seguridad .....	67
Tabla 4-1 – Matriz de Mediciones/Actuadores de Controlador Normal .....	87
Tabla 4-2 – Matriz de Mediciones/Actuadores de Controlador de Alto Peso .....	90
Tabla 4-3 – Matriz de Mediciones/Actuadores de Controlador de Alta Potencia.....	92
Tabla 4-4 – Matriz Mediciones/Actuadores de Controlador de Altos Imp.Críticos.....	95
Tabla 4-5 – Parámetros de Configuración de Controlador MPC .....	96
Tabla 4-6 – Parámetros de Configuración de Modelos en Controlador MPC .....	96
Tabla 4-7 – Parámetros de Controlador MPC .....	97
Tabla 4-8 – Especificación de Respuesta de Controlador MPC.....	99
Tabla 4-9 – Especificación de Respuesta de Controlador MPC.....	100
Tabla 4-10 – Especificación de Respuesta de Controlador MPC.....	101
Tabla 4-11 – Reglas Heurísticas de Controlador Adaptativo de Peso .....	101
Tabla 4-12 – Estado de Señales entre Modelo Matemático y Controlador Primario...	106
Tabla A-1 – Lista de instrumentos IO configurados en controlador primario.....	129
Tabla A-2 – Parámetros de Servidor de Dominio.....	130
Tabla A-3 – Parámetros de Servidor de Modelamiento en Matlab.....	131
Tabla A-4 – Parámetros de Estación de Ingeniería.....	131
Tabla A-5 – Parámetros de Servidor de Sistema de Control Avanzado.....	132
Tabla A-6 – Parámetros de Servidor de Sistema de Supervisión .....	132

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ISA	Sociedad Internacional de Automatización
IC	Medición de Impactos Críticos
APC	Sistema de Control Avanzado
ECS	Flsmdith - Control Center
PXP	Flsmdith - Process Expert
CLX	Rockwell Controllogix
MPC	Control Predictivo basado en Modelo
FEA	Alimentador Secundario
CVB	Faja Principal Alimentadora
SAG	Semiautógeno
SCP	Sistema de Control Primario
SCA	Sistema de Control Avanzado
TPH	Tonelaje por Hora
RPM	Revoluciones por Minuto
PID	Controlador Proporcional - Integrativo - Derivativo
PIDE	Controlador PID Mejorado
PV	Variable de Proceso
CV	Variable de Control
SP	Set Point
PGAIN	Ganancia Proporcional
IGAIN	Ganancia Integrativa
DGAIN	Ganancia Derivativa
KP	Término Proporcional
KI	Término Integrativo
KD	Término Derivativo
WIC	Controlador de Flujo Másico
CM	Módulo de Control

REM	Modo de Control Remoto
LOC	Modo de Control Local
ETH	Comunicación Ethernet
AI	Entrada Analógica
AO	Salida Analógica
DI	Entrada Digital
DO	Salida Digital
ROM	Mineral Run of Mine
DCS	Sistema de Control Distribuido
HD	Alta Definición
RGB	Códificación de Color Red-Green-Blue
OPC	ODBC for Process Control
HMI	Interfaz Humano Máquina
OK	Sin Fallas
HIHI	Alarma Muy Alta
HI	Alarma Alta
LO	Alarma Baja
LOLO	Alarma Muy Baja

## CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DE MOLINO SAG

### 1.1 Introducción

Las plantas industriales de procesamiento de mineral por concentración cuentan con distintas áreas las cuales cuentan con equipos críticos o principales, en el caso del área de molienda primaria, es el molino semi-autógeno (SAG), en el cual se basará esta tesis, que está encargado de la molienda semiautógena del mineral proveniente del área de chancado primario.

El mineral ingresante al molino es inicialmente acumulado en un stockpile, distribuido a una serie de alimentadores que desembocan en un alimentador principal hacia el molino SAG y cuyo producto es enviado hacia el proceso de molienda secundaria, donde será acumulado y bombeado hacia el nido de ciclones, siendo su producto enviado a flotación como se aprecia en la Figura 2-1.

El objetivo principal de un molino SAG es reducir el tamaño del mineral ingresante para hacerlo apto para la etapa de flotación considerando la mayor capacidad de procesamiento de mineral siendo reflejado en un mayor flujo de pulpa de salida y al menor consumo de energía posible (L.Austin & F.Concha, 1994).

Este tipo de molino, por su mayor tamaño y uso de bolas para la molienda, reduce el tiempo e incrementa el volumen de procesamiento permitiendo la construcción de plantas industriales cada vez más grandes y a la importancia del molino SAG por sus dimensiones, costos de mantenimiento, consumo de energía y capacidad de procesamiento de hasta 3000 tph, es que el mejorar continuamente su eficiencia para obtener la mayor recuperación de mineral posible y cumplir con las altas metas impuestas se ha vuelto un trabajo crítico. Ante esto, es necesario e indispensable utilizar estrategias de control avanzado dependiendo menos del error humano y más de técnicas certificadas y probadas, ayudando tanto al personal de planta en su operación como a la recuperación económica de planta.

Por tanto, es necesario que los encargados del área de control de procesos y los operadores de planta sepan cómo el sistema experto instalado funciona y sus fundamentos básicos de operación, logrando que los usuarios a nivel operador e ingeniería puedan controlar y entender el sistema experto incrementando su porcentaje de uso diario y aumentando la eficiencia del sistema que incremente los índices de producción (L.Austin & F.Concha, 1994).

Para que los operadores e ingenieros encargados del sistema de control de planta se familiaricen con el sistema experto a instalar es necesario que ellos lo operen, siendo un simulador de entrenamiento enlazado al proceso una alternativa efectiva para su operación en línea, realizando una correcta interacción tanto a nivel de usuario como a nivel de ingeniería; teniendo esto como objetivo se ha diseñado un modelo matemático que simule el funcionamiento de un molino SAG teniendo en cuenta las principales variables de medición y actuadores involucrados.

Con un modelo lo suficientemente preciso se podrá realizar su integración hacia el sistema experto a instalar y probar técnicas de control y operación del mismo haciendo que el usuario final y usuario de ingeniería comprendan su funcionamiento ante cualquier tipo de escenario de operación generando mayor confianza en el sistema y reconociendo sus eventuales beneficios.

## 1.2 Circuito de Procesamiento de Molienda SAG

El proceso de molienda comprende desde la acumulación del mineral proveniente de chancado hasta antes del proceso de flotación comprendiendo las siguientes etapas: acopio de mineral proveniente de la etapa de chancado, transporte de mineral, molienda SAG, chancado de Pebbles, molienda secundaria considerando molino de bolas y nido de hidrociclones, y envío a flotación (Ver Figura 1-1).



Figura 1-1 – Entradas y Salidas de Proceso de Molienda.

La alimentación al acopio de mineral se da mediante distintos tipos de transporte, ferrocarril o fajas transportadoras siendo esta última la más utilizada; el circuito de molienda utiliza fajas alimentadoras independientes y paralelas de velocidad variable que alimentan directamente al molino SAG, la siguiente etapa del proceso (T.A. Apelt, 2005).

El circuito de molienda SAG se encuentra descrito por bloques en la Figura 1-2 y está compuesto por el molino SAG, el cual cuenta con un chute de alimentación donde se agrega la carga de mineral en conjunto con una solución de lechada de cal. Adicionalmente, el molino está provisto de un trommel corto con aberturas para filtrado

del mineral molido cuyo “sobretamaño” o “oversize” alimenta a una zaranda vibratoria para clasificación. A la salida de molienda SAG el trommel de descarga clasifica o separando por tamaño el mineral liberando el mineral fino, “bajotamaño” o “undersize” hacia el cajón alimentador del nido de hidrociclones, y el sobretamaño en enviado a un hacia el chancador de pebbles que retornan finalmente al molino SAG (Apelt, 2005). Tanto el “bajotamaño” del trommel del molino SAG como el de la zaranda son conducidos hacia un cajón receptor de pulpa y mediante bombas de alimentación de velocidad variable hacia las baterías de ciclones de clasificación. Por otra parte, el “sobretamaño” del mineral de la zaranda es enviado al circuito de chancado de pebbles para su procesamiento y posterior retorno a la molienda SAG.

Cada ciclón debido a fuerza centrífuga tendrá un flujo descendente llamado “underflow” de forma gravitacional ingresa al molino de bolas junto con la adición de lechada de cal, bolas al circuito y su producto regresará al cajón alimentador o de recepción de pulpa. La descarga del molino de bolas se realiza a través de un trommel magnético que permite coleccionar y eliminar las bolas expulsadas del molino por desgaste, o chips acumulados en el interior del molino, este equipo cuenta con un sistema de velocidad de giro variable y operará con un volumen de llenado de mineral variable para alcanzar una distribución de tamaño de partícula con un óptimo P80, tamaño de tamiz que deja pasar 80% de las partículas del producto del circuito y medido en micrones, finalmente el rebose de los ciclones u “overflow”, se realiza directamente hacia un cajón de separación previo a la alimentación de la flotación “rougher”.

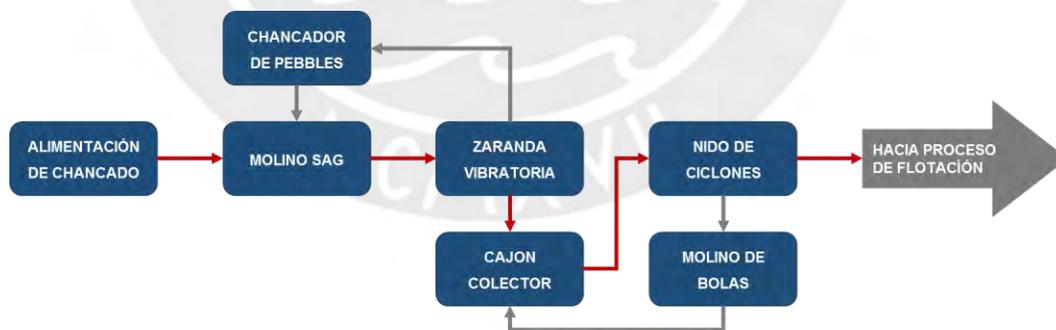


Figura 1-2 – Circuito de Proceso de Molienda.

### 1.3 Principio de Operación de Molino SAG

La carga de alimentación que proviene de la etapa de chancado primario se encuentra compuesta por (Ver Figura 1-3)

- Mineral fresco proveniente del área de chancado.

- Bolas de acero
- Pebbles chancados recirculados que fueron rechazados a la salida del molino.
- Lechada de cal
- Agua de Proceso

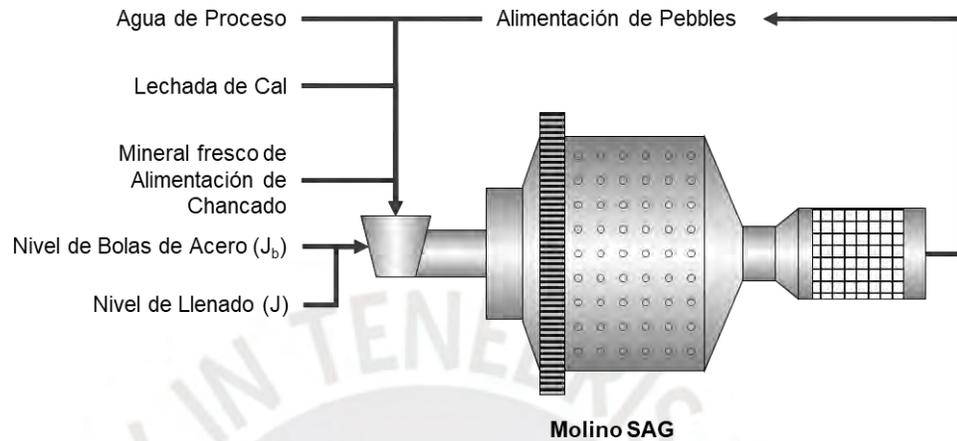


Figura 1-3 – Chute de alimentación del molino SAG (Apelt, 2005, págs. 36-37)

El control de volumen óptimo dependerá del flujo controlado de ingreso de mineral y su dureza la que condiciona el tiempo de retención dentro del molino, evitando una condición de acumulación de carga en el molino.

Cuando el molino se acciona girando en sentido horario o antihorario genera la molienda del mineral que es cuando la masa interna descrita anteriormente es elevada por la forma ondulada de los liners o revestimientos interiores hasta una altura definida por la velocidad del molino, desde donde impacta contra sí misma y contra los liners generando impactos por frotación y abrasión (impacto entre el mineral y las bolas de acero), este movimiento se muestra en la Figura 1-4.

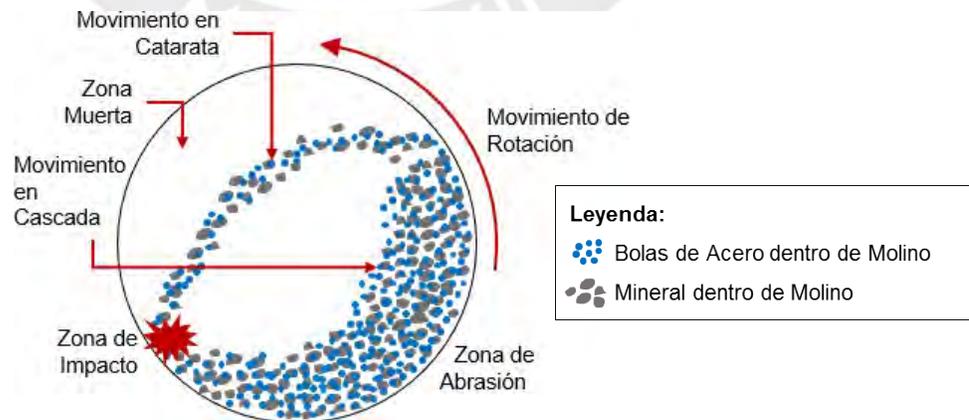


Figura 1-4 – Proceso de Molienda de Mineral en Molino SAG (Apelt, 2005, pág. 47)

La pulpa a la descarga del molino SAG, conformada por mineral y agua, va por las parrillas a la salida del molino SAG a través del muñón de descarga y posteriormente por la malla del trommel; el mineral más pequeño pasa a través de ella junto con la mayor parte de agua en la pulpa hasta el sumidero de descarga del molino SAG (Ver Figura 1-5) y hacia el sumidero desde donde es enviado al circuito de molienda secundaria.

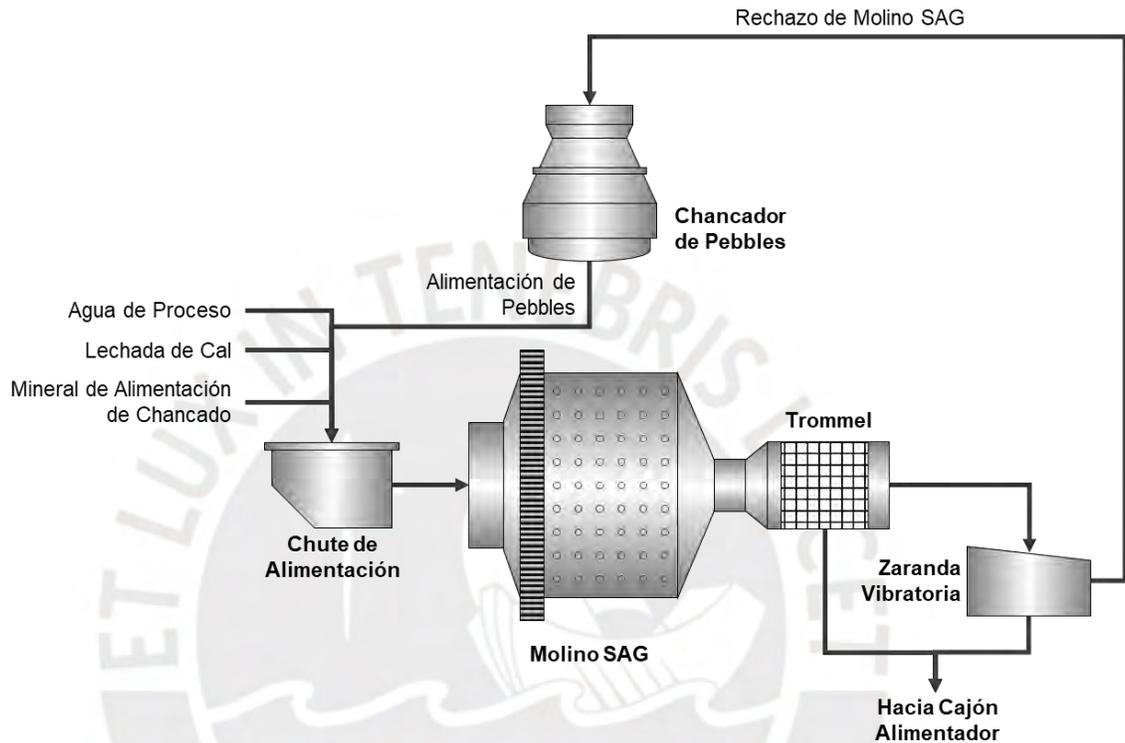


Figura 1-5 – Circuito de Molino SAG (Apelt, 2005, págs. 36-37)

El material más grueso (que no atraviesa la malla del trómel) alimenta a una zaranda vibratoria donde el material es nuevamente clasificado, el mineral pasante o undersize es enviado, al igual que el material pasante del trómel, al circuito de molienda secundaria y el producto grueso u oversize es enviado al chancador de pebbles.

#### 1.4 Consideraciones Generales en la Operación Óptima del Molino SAG

##### 1.4.1 Operación Óptima según Peso de Molino

El peso del molino SAG, parámetro importante que debe ser evaluado constantemente tanto el valor actual como su razón de cambio evitando tener eventos de alto peso que pueden causar que el molino se detenga.

Este parámetro puede ser controlado tanto con la velocidad de giro del molino o la alimentación, la variable a utilizar dependerá de la cercanía a los límites máximo y mínimos de operación de cada actuador, su prioridad y del tipo de mineral a tratar.

Este parámetro debe ser mantenido lo más estable y cercano a su rango de operación posible evitando incidentes de alto peso que obliguen a disminuir drásticamente la alimentación afectando la eficiencia de procesamiento de mineral del molino (E.Bartsch, G.Comeau, & C.Hardie, 2008, pág. 452).

#### 1.4.2 Operación Óptima según Potencia y Eficiencia del Molino

Es otra variable crítica del molino y muestra el consumo total de energía del molino por hora, guarda relación al tipo de mineral, peso, la velocidad de giro y las dimensiones físicas del molino, su valor máximo dependerá del criterio de diseño del equipo.

La condición ideal, por tanto, es mantener el consumo de energía lo más óptimo posible con el mayor *“throughput”* posible buscando así mejorar la eficiencia de procesamiento del molino.

De misma forma que el alto peso, este tipo de molinos tienen un enclavamiento eléctrico por alta potencia configurado en el sistema eléctrico que, de activarse, detendría el equipo con la carga en ese momento debiendo desocuparlo de forma manual (E.Bartsch, G.Comeau, & C.Hardie, 2008, pág. 452).

#### 1.4.3 Operación Óptima según Impactos Críticos

Los Impactos Críticos en un molino SAG brindan información sobre el movimiento y la zona de impacto de las bolas y el mineral en el interior del molino mediante el análisis de frecuencia y energía del sonido generado por micrófonos instalados alrededor del molino (W.Valderrama, y otros, 2000), por el choque entre el revestimiento interno del molino o liners y la carga interna de molino (compuesto por las bolas de acero y el mineral).

Este análisis se realiza mediante el equipo llamado Impactómetro o “ImpactMeter” © (FLSmidth Copyright, 2019) el cual identifica y filtra los impactos de mayor intensidad y los cuantifica generando una señal numérica que indica la cantidad de impactos de bolas de acero contra el revestimiento interno o liners por minuto.

Las señales sonoras son capturadas mediante 4 micrófonos instalados a cada lado al frente del manto molino al pie de carga, según su sentido de giro dependiendo de la zona de impacto del molino (Ver Figura 1-6).

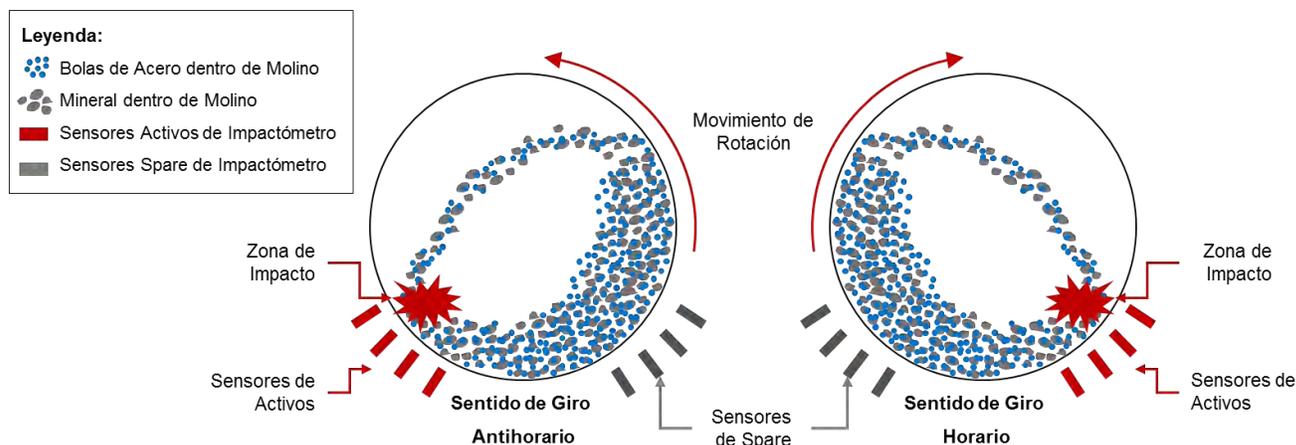


Figura 1-6 – Sensores de Impactómetro y Sentido de Giro  
(Flsmidth Knowledgebase, 2019)

El uso de múltiples micrófonos compensa el efecto de las variaciones según la posición del pie de la carga, buscando mantener un micrófono lo más cerca posible de la zona relevante de medición.

Los problemas principales de esta variable son los siguientes:

- Mantener un valor medio dependiendo del tipo de mineral y porcentaje de llenado del molino evitando cualquier de estos escenarios:
  - El tener un valor muy bajo, implica que el molino se está sobrecargando por lo que su efecto posterior será un aumento de peso y potencia.
  - El tener un valor muy alto, implica que el llenado del molino se encuentra bajo lo que indica la alta presencia de impactos entre bolas de acero y liners acortando el tiempo de vida de estos últimos y disminuyendo la eficiencia del molino ya que podría recibir una mayor cantidad de alimentación, incrementando su throughput.
- Reducir el costo de mantenimiento del molino alargando la vida de los revestimientos internos o liners al evitar escenarios de altos impactos críticos que implican una alta cantidad de bolas de acero impactando directamente a los liners.

#### 1.4.4 Operación Óptima basada en la Gestión del Operador

Una vez que todas las variables descritas en el proceso se encuentren debidamente establecidas, se debe considerar la gestión operación del molino basada en la experiencia del operador, la cual puede ser complementada mediante el uso de sistemas de control avanzado aprovechando al máximo sus funciones por lo que será necesario que el operador sepa como operarlo en paralelo al molino; para esto, debido a lo

complicado que pueden ser este tipo de sistemas, a la desconfianza o al desconocimiento que su funcionamiento pueda generar se deben tener en cuenta los siguientes problemas identificados:

- Falta de entrenamiento a los operadores de molino SAG para el entendimiento del sistema de control avanzado.
- Comprobar los beneficios del sistema de control avanzado contra la operación del sistema en modo manual.

#### 1.4.5 Operación Óptima según el Tipo de Mineral que Procesar

Se debe considerar que eventualmente, en el circuito de molienda SAG, se procesarán rocas de distinta dureza a la habitual, afectando la capacidad de procesamiento y la obtención del producto final hacia el área de flotación; desde esta perspectiva, la limitante del circuito está dada por el molino SAG.

El procesamiento de distintos tipos de rocas, blandas, duras, finos o gruesos implicará distintas capacidades de tratamiento en la molienda SAG el cual será controlado mediante la velocidad o revoluciones, la alimentación hacia el molino y la recirculación del mineral grueso a la salida del molino SAG mediante la chancadora de Pebbles, al igual que se reflejará un producto de distintos gruesos en la molienda de bolas.

El problema de este parámetro es la dificultad de reducir la variación de los demás parámetros planteados (peso, potencia, eficiencia, impactos críticos) debido a la alta variación de tipo de mineral que alteran de manera significativa el comportamiento del molino.

### 1.5 **Planteamiento de Soluciones a Problemática**

Con la finalidad de solucionar los problemas planteados en la sección anterior, se plantea inicialmente el desarrollo de un modelo matemático del molino SAG considerando las señales presentadas previamente, el cual será utilizado en línea representando el funcionamiento aproximado de un molino real.

Este modelo se enlazará con un sistema de control primario el que se encargará de controlar la operación básica del molino (permisivos y enclavamientos de operación) así como los lazos primarios de control.

Se desarrollará un sistema de control primario que permitirá al usuario el control primordial del molino tal como arranque, parada y seguimiento de fallas mediante un sistema de supervisión propietario y, a su vez, permitirá la operación y sintonización de lazos de control primarios configurados.

Finalmente se diseñará un sistema de control avanzado, también llamado control experto, que constará de una lógica integrada de controladores MPC o Control Predictivo Basado en Modelos y controladores “fuzzy” o difusos, este sistema gobernará el sistema de control primario permitiendo mejorar el control sobre el peso, la potencia, impactos críticos y mejorando la eficiencia del molino. (Ver Figura 1-7).



Figura 1-7 – Bloques de Comunicación de Sistema de Control.

La arquitectura de este sistema de control propuesto (Ver Figura 1-8) contará con las estaciones necesarias para desarrollar el sistema modelado del molino SAG, el sistema de control primario y el sistema de control avanzado con sus respectivas estaciones de operación para usuarios a nivel operador y usuario a nivel de soporte.

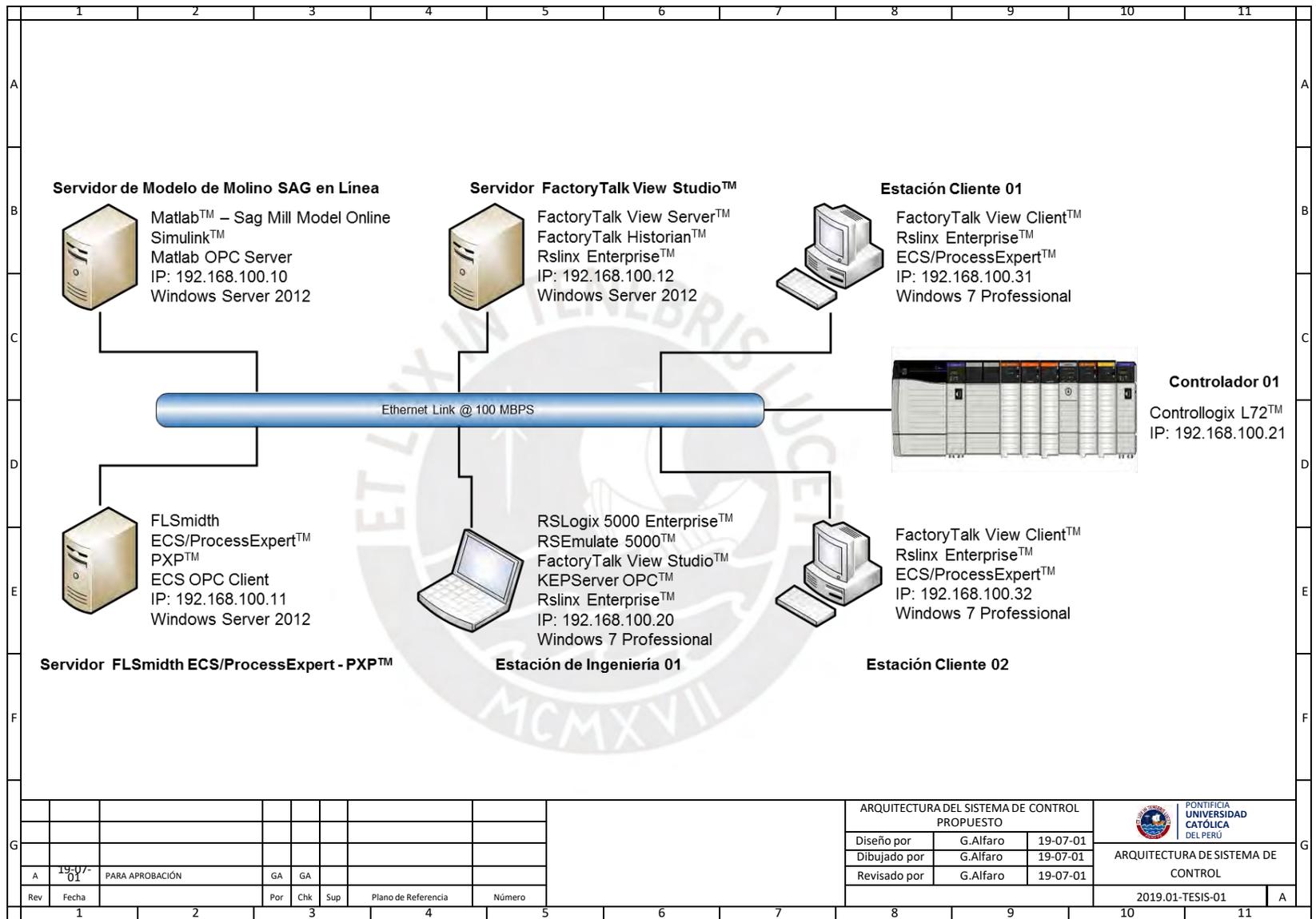


Figura 1-8 – Arquitectura del Sistema de Control Propuesto.



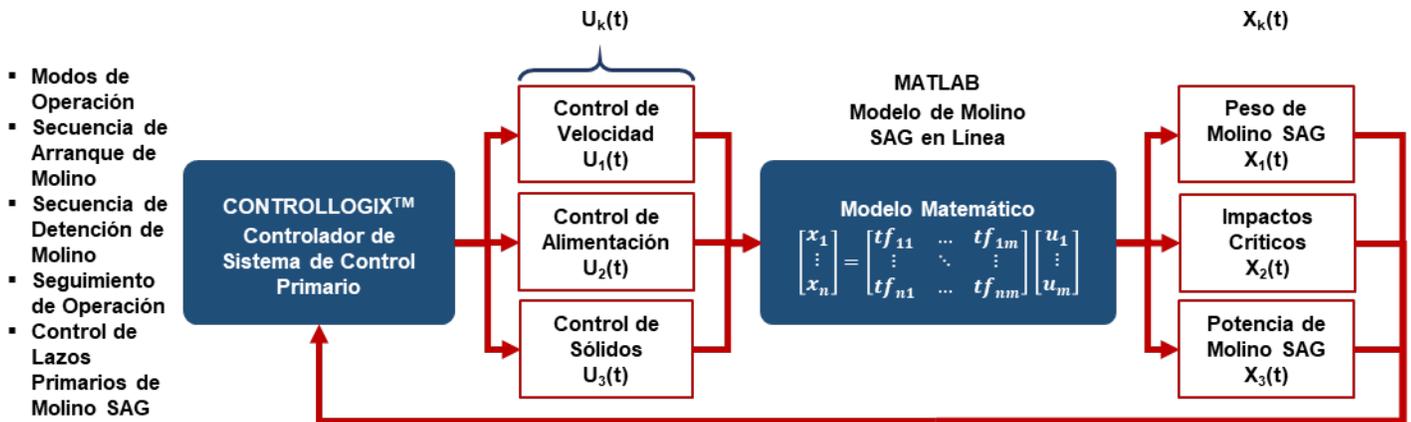


Figura 1-10 – Bloques de Sistema de Control Primario y Modelo Matemático

### 1.5.3 Desarrollo de Sistema de Supervisión

Este sistema de supervisión considera la integración directa con el controlador primario y brindará al operador la interfaz necesaria para controlar las funciones básicas del molino SAG y la capacidad de gestión e historización propia de un sistema de este tipo.



Figura 1-11 – Bloques de Sistema de Control Primario y Modelo Matemático

### 1.5.4 Desarrollo de Sistema de Control Avanzado

El sistema de control avanzado servirá como la capa más alta de control para el Molino SAG, será el encargado de mejorar la eficiencia mientras evalúa todas las condiciones o la problemática definida en el punto 1.4, el tiempo de escaneo considerado para este sistema en tiempo real será de 30 segundos evaluando la carga de procesamiento de los núcleos del servidor.

## 1.6 **Objetivos de la Tesis**

### 1.6.1 Objetivo General

Desarrollo de sistema de entrenamiento integrando un sistema de simulación por modelamiento matemático multivariable no lineal de un circuito de molienda primaria, un sistema de control primario y finalmente a un sistema de control experto que utilice técnicas de control predictivo basado en modelos y lógica difusa, este sistema será

orientado a usuarios de nivel operador y de nivel ingeniería mejorando el dominio y confianza hacia el sistema a instalar.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

Para poder alcanzar este objetivo se deberán cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Obtener el modelo matemático multi variable que se aproxime al comportamiento de un molino SAG.
- Diseño de un sistema de control primario para su integración con el molino SAG a modelar utilizando un controlador lógico programable simulado.
- Diseño de un sistema de supervisión integrado al sistema de control primario para el control y monitoreo del molino SAG.
- Diseño de un sistema de control experto para la mejora en la eficiencia del molino SAG y entrenamiento de operadores de cuarto de control y usuario de nivel de ingeniería para su dominio y confianza en el sistema a instalar.
- Implementar el sistema de control experto diseñado con el software FLSmith ECS/ProcessExpert ® v.8.4 propiedad de FLSmith Inc.
- Realizar pruebas experimentales que permitan demostrar las ventajas del uso de técnicas de control avanzado y la importancia de un control primario debidamente instalado y seguro.

## CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS DEL MOLINO SAG

### 2.1 Introducción

Este capítulo explicará el modelamiento matemático del molino SAG que se desarrollará mediante la revisión de distintas fuentes dedicadas a este rubro y el uso de datos históricos reales.

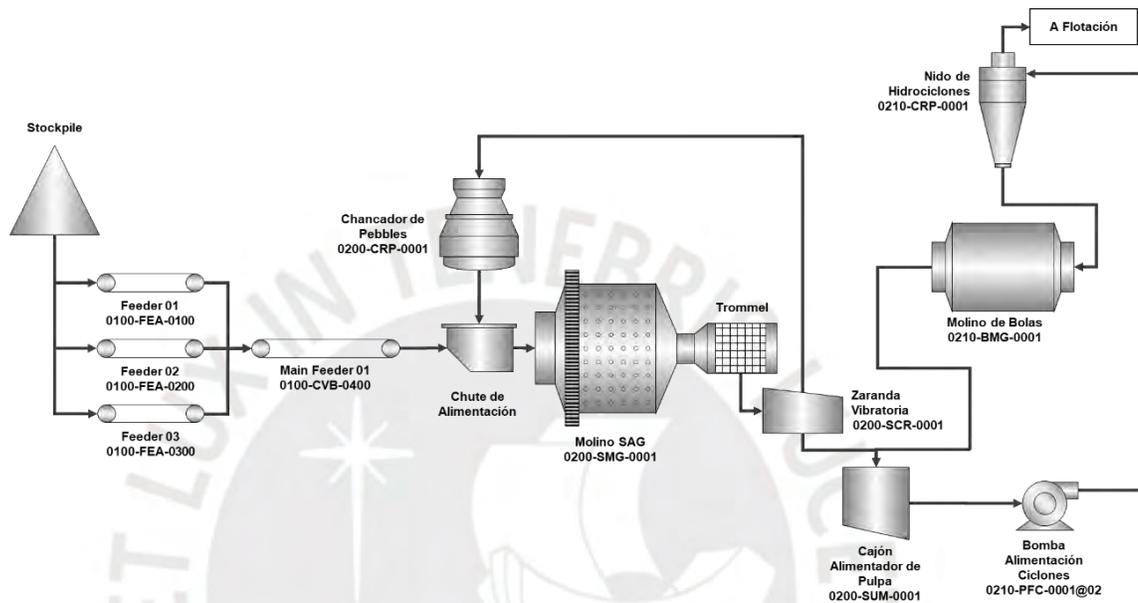


Figura 2-1 – Circuito de Molienda Primaria a Modelar

El enfoque de este modelamiento se centrará en el circuito descrito en la Figura 2-1 y descrito anteriormente en el punto 1.2 - Circuito de Procesamiento de Molienda SAG.

### 2.2 Modelamiento de Circuito de Molienda

El modelamiento del circuito de molienda se ha desarrollado mediante funciones embebidas en bloques y agrupados de forma enmascarada con su propio faceplate de configuración en el entorno simulado de Matlab, Simulink (L.Austin & F.Concha, 1994, págs. 253-310), (Roux, Simplified Grinding Circuit Models for use in Process Control, 2012, págs. 24-28), (Coetzee, 2009, págs. 142-169).

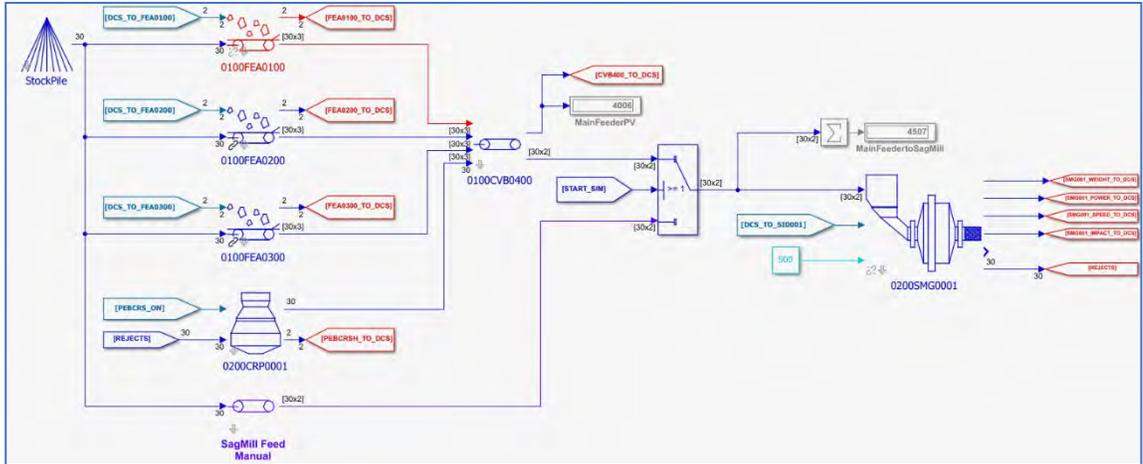


Figura 2-2 – Circuito de Molienda Primaria Simulado en Simulink

## 2.2.1 Modelamiento de Alimentadores a Molino SAG

### 2.2.1.1 Modelamiento de Stockpile

El modelamiento de Stockpile se encargará de setear la granulometría con la que se trabajará con el resto de la simulación, esta granulometría se ve reflejada en la Tabla 2-1 (R.Klimpel, 1994, pág. 78) y será la considerada para el mineral transportado en cada alimentador.

Nº	Tamaño	Nº	Tamaño	Nº	Tamaño
1	0.015 mm	11	0.359 mm	21	8.604 mm
2	0.021 mm	12	0.494 mm	22	11.821 mm
3	0.028 mm	13	0.678 mm	23	16.240 mm
4	0.039 mm	14	0.932 mm	24	22.310 mm
5	0.053 mm	15	1.280 mm	25	30.650 mm
6	0.073 mm	16	1.758 mm	26	42.108 mm
7	0.101 mm	17	2.415 mm	27	57.849 mm
8	0.139 mm	18	3.318 mm	28	79.475 mm
9	0.190 mm	19	4.559 mm	29	109.184 mm
10	0.261 mm	20	6.263 mm	30	150.000 mm

Tabla 2-1 – Granulometría de Alimentadores

### 2.2.1.2 Modelamiento de Alimentador Principal y Alimentadores de Placas

El modelamiento considerará los 03 alimentadores de placas descritos, 0100-FEA-0100, 0100-FEA-0200 y 0100-FEA-0300, que transportan el mineral del stockpile y el alimentador principal, 0100-CVB-0400, al que confluyen los 03 alimentadores de placas. Todos estos alimentadores considerarán la granulometría indicada en la Tabla 2-1.

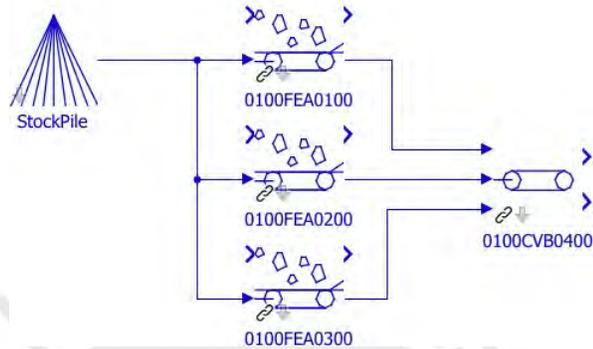


Figura 2-3 – Configuración de Alimentadores en Simulink

El modelamiento se ha realizado considerando 06 grupos de flujo másico y siendo cada uno asignado a 05 tamaños de partículas completando los 30 tamaños de partícula indicados, cada grupo cuenta con los siguientes parámetros de configuración.

- Modelo de función de 1er grado.
- Función para variación automática de flujo.
- Habilitador de ruido a señal.
- Alimentación máxima configurada.

Los alimentadores de placas también contarán con el parámetro de velocidad de flujo con el que se controlará la alimentación total hacia el molino SAG.

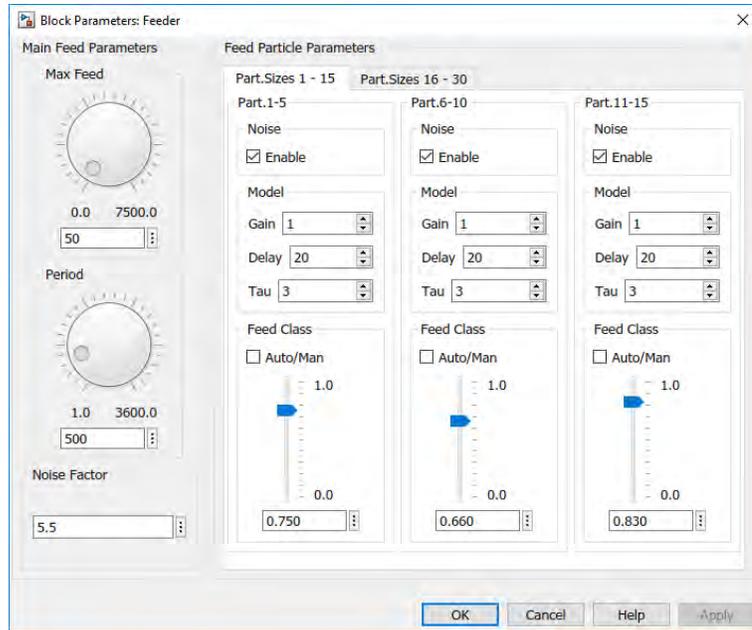


Figura 2-4 – Configuración por flujo de partículas

### 2.2.2 Modelamiento de Sólidos en Molino SAG

El modelamiento del flujo de sólidos del molino SAG se divide en 2 etapas retroalimentadas (J.L.Salazara, 2013, págs. 93,94) según se muestra en la siguiente figura:



Figura 2-5 – Diagrama de Etapas de Connición de Molino SAG

Para el modelamiento del molino, se utilizarán fórmulas matriciales de forma acumulativa de acuerdo con cada tamaño de partícula y el flujo de mineral que pasa por cada una de ellas (W.Valery Jnr, 1995).

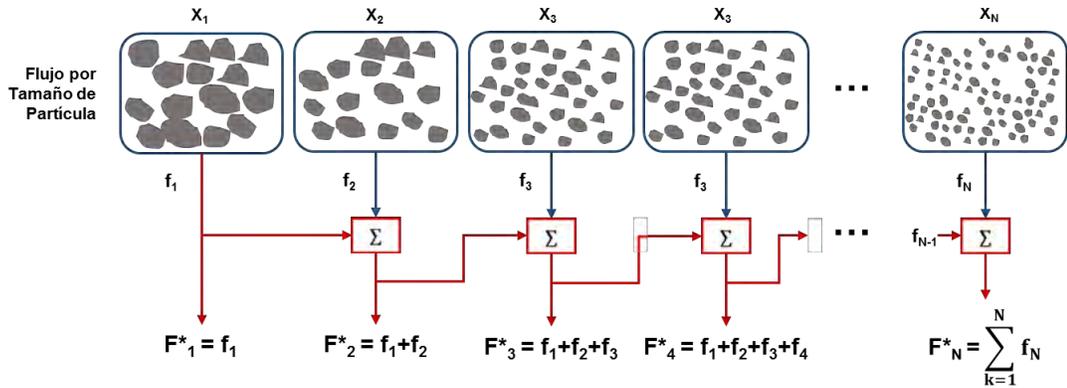


Figura 2-6 – Arreglo matricial de flujos de alimentación

De esta forma el flujo de ingreso correspondiente al tamaño  $i$  corresponderá a la suma de los flujos de mayor tamaño y la forma matricial será el arreglo de ellos, ( 2-1 ) el flujo producto del molino tendrá el mismo concepto matricial ( 2-2 ).

$$F^*_i = \sum_{k=1}^i f_k \quad (2-1)$$

$$F = [F^*_1 \ F^*_2 \ F^*_3 \ F^*_4 \ \dots \ F^*_N]$$

$$P^*_i = \sum_{k=1}^i p_k \quad (2-2)$$

$$P = [P^*_1 \ P^*_2 \ P^*_3 \ P^*_4 \ \dots \ P^*_N]$$

La masa dentro del mineral será la acumulación por tamaño de partícula y su forma matricial será la correspondiente a cada uno ( 2-3 ), la masa total será la suma de cada elemento de la matriz.

$$M = \sum_{k=1}^n m_k \quad (2-3)$$

$$m = [m^*_1 \ m^*_2 \ m^*_3 \ \dots \ m^*_N]$$

### 2.2.2.1 Etapa de Molienda

Etapa de impacto entre bolas y material para reducir tamaño de mineral. A esta etapa ingresa el flujo de mineral ( $F$ ) más el rechazo ( $R$ ) de la siguiente etapa y resultando en el producto ( $P$ ) a dicha etapa.

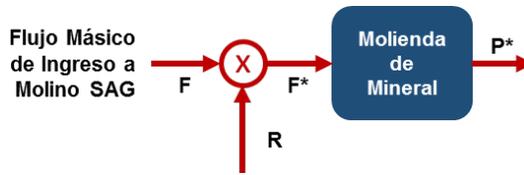


Figura 2-7 – Etapa de Molienda

El balance del “*hold-up*” del mineral o balance de sólidos se indica en la ecuación ( 2-4 ) donde el flujo de ingreso y el material de salida son relacionados con la masa actual dentro del molino y la tasa de molienda **K** que transforma el tipo de mineral en cada interacción (S.Morrell, págs. 9-15), (Loutjie C. Coetzee, 2010, págs. 20-22).

$$\frac{dm^*(t)}{dt} = F^*(t) - P^*(t) - K_{ii} * m^*(t) \quad (2-4)$$

La tasa de molienda es representada por una matriz diagonal de  $n \times n$  ( 2-5 ), donde  $n$  es la cantidad del tamaño de partículas consideradas y cuyo valor  $K_{nn}$  será igual a cero.

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$K_{nn} = 0$$

La tasa de molienda se calcula utilizando la ecuación ( 2-6 ) considerando los siguientes parámetros  $\hat{\alpha}, \hat{\mu}, \hat{\lambda}, \hat{\beta}$  en función del nivel de llenado del molino  $J_b$  (R.Klimpel, 1994, págs. 77-79).

$$K_{ii} = \hat{\alpha} \left( \frac{X_i}{X_n} \right)^{\hat{\alpha}} + \frac{1}{1 + \left( \frac{X_i}{\hat{\mu}} \right)^{\hat{\lambda}}} + \hat{\beta} \left( \frac{X_i}{X_n} \right)^{\hat{\beta}} \quad (2-6)$$

A continuación se calcula la tasa de molienda específica utilizando la masa total y la potencia consumida como indica la ecuación ( 2-7 ).

$$K^E = \frac{M}{M_P} K \quad (2-7)$$

Para trabajar matricialmente con la alimentación y el producto del molino, la tasa de molienda **K** debe ser convertida en una matriz triangular inferior utilizando una matriz **R** ( 2-8 ) como se indica en ( 2-9 ) para calcular la matriz **D**.

$$R_{ij} = \begin{cases} 0 & i < j \\ 1 & i \geq j \end{cases} \quad (2-8)$$

$$D = R^{-1} * K * R \quad (2-9)$$

$$D_{ij} = \begin{cases} 0 & i < j \\ K_{ij} & i = j \\ K_{ij} - K_{i-1, i-1} & i > j \end{cases}$$

La potencia del molino es calculada como indica la ecuación ( 2-10 ) en kW (Apelt, 2005, págs. 577-580)

$$M_P = K * D^{2.5} * L * (1 - AJ) * f(\phi_c) * J\rho_c \quad (2-10)$$

Donde los siguientes parámetros son considerados:

- $\phi_c$  es la fracción de velocidad crítica.
- $f(\phi_c)$  es la función de la fracción de velocidad crítica ( 2-11 ).

$$f(\phi_c) = \phi_c * \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10*\phi_c}}\right) \quad (2-11)$$

- $J\rho_c$  se calcula según la ecuación ( 2-12 ) donde M es la masa en el molino,  $q_{mill}$  es el agua retenida en el molino,  $W_B$  es la cantidad de bolas y V es el volumen dentro del molino.

$$J\rho_c = \frac{M + q_{mill} + W_B}{V} \quad (2-12)$$

- D es el diámetro interno del molino (m); L es el largo interno del molino (m).
- J es la fracción de carga interna total del molino; Jb es la fracción de llenado de bolas.
- A es una constante adimensional que relaciona el ángulo de inclinación efectivo de la carga y el ángulo medio que subtiende su superficie de deslizamiento.
- K es una constante ajustada según los datos del molino.

Expresando la ecuación ( 2-4 ) con los términos descritos y en forma matricial se tendrá la ecuación( 2-13 ).

$$\frac{dm(t)}{dt} = F(t) - P(t) - D_{ij} * m(t) \quad (2-13)$$

### 2.2.2.2 Etapa de Clasificación

Considera la parrilla interna del molino y sus liners calculando que el mineral descargado desde el molino es una fracción del contenido en él, el mineral rechazado permanece en el molino siendo reducido nuevamente por la etapa de clasificación anterior.



Figura 2-8 – Diagrama de Etapas de Molienda

La fórmula de clasificación de mineral se encarga de calcular la matriz de producto de molino SAG **P** y los rechazos de esta etapa **R** que regresarán a la etapa de Molienda para ser nuevamente reducido.

$$P^* = k_P * \sqrt{M} \quad (2-14)$$

$$P_i^* = m_i^* * \left(\frac{P}{M}\right) \quad (2-15)$$

El producto del molino total se calcula utilizando la ecuación ( 2-14 ) ajustando  $k_P$  según la respuesta del modelo y la masa total dentro del molino, para hallar el producto según tamaño de mineral se utiliza la relación indicada en la ecuación ( 2-15 ) donde se utiliza la masa acumulada por cada tamaño de partícula  $m_i$ .

Calculado el producto total del molino, se calcula la matriz C de clasificación según la siguiente ecuación:

$$c_i = \psi \beta (x_i W)^{\beta-1} \exp(-\psi (x_i M)^\beta) + \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_{50}}\right)^z} \quad (2-16)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \psi &= \exp(-13.12 * \ln(\%Solid) - 6.61) \\ W &= \exp(16.53 * \ln(\%Solid) + 5.54) \end{aligned} \quad (2-17)$$

Calculada la matriz C y se pueden calcular las matrices de rechazo **r** y de producto de molino **P** según indican las ecuaciones ( 2-18 ) y ( 2-19 ), (L.Austin H. b., 2002, pág. 97).

$$r_i = c_i * P_i^* \quad (2-18)$$

$$P_i = (1 - c_i) * P_i^* \quad (2-19)$$

### 2.2.2.3 Entorno de Simulación de Molino SAG

Los parámetros descritos en los puntos pasado podrán ser ajustado en línea mientras se ejecuta la simulación mediante la máscara diseñada para el molino SAG.

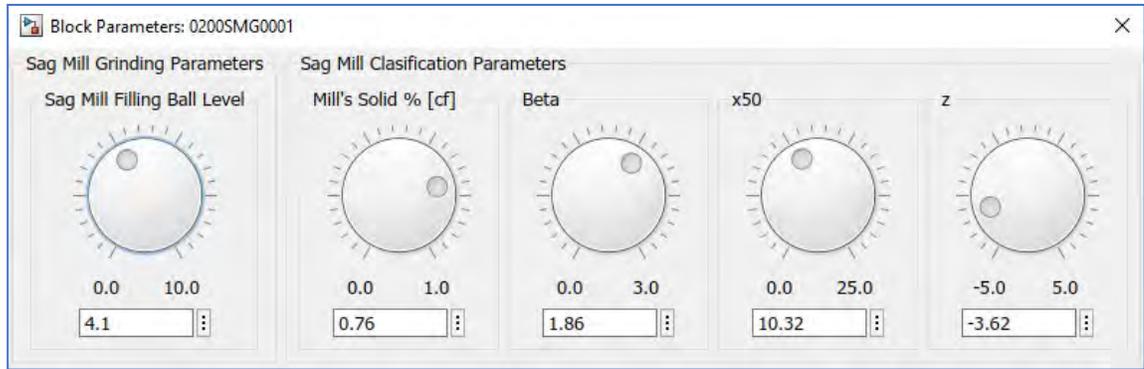


Figura 2-9 – Máscara de Configuración de Molino SAG

### 2.2.3 Modelamiento de Agua en Molino SAG

El modelamiento de agua y el posterior cálculo del porcentaje de sólidos es calculado según los flujos de entrada y salida de agua y el “*hold-up*” de agua en el molino, la ecuación general es:

$$\frac{dq_{\text{mill}}(t)}{dt} = q_f(t) - q_p(t) \quad (2-20)$$

Considerando las propiedades del agua que ingreso al molino como particulables, donde  $q_p$  es el flujo de descarga,  $q_f$  el flujo de ingreso al molino.

$q_p$  viene calculado por el “*hold-up*” de agua en el molino y una constante  $k_{\text{qmill}}$  que viene calculada por la masa actual y 2 constantes  $k_{q1}$  y  $k_{q2}$  ajustables según el comportamiento del molino.

$$k_{\text{qmill}} = k_{q1} + \frac{k_{q2}}{m^4} \quad (2-21)$$

$$q_p = k_{\text{qmill}} * q_{\text{mill}} \quad (2-22)$$

### 2.2.4 Resumen de Ecuaciones de Modelos

Ecuaciones de Modelos	
Modelamiento de Sólidos en Molino SAG	
(2-1)	$F_i^* = \sum_{k=1}^i f_k; F = [F_1^* F_2^* F_3^* F_4^* \dots F_N^*]$
(2-2)	$P_i^* = \sum_{k=1}^i p_k; P = [P_1^* P_2^* P_3^* P_4^* \dots P_N^*]$
(2-3)	$M = \sum_{k=1}^n m_k; m = [m_1^* m_2^* m_3^* \dots m_N^*]$
(2-4)	$\frac{dm_i^*(t)}{dt} = F_i^*(t) - P_i^*(t) - K_{ii} * m_i^*(t)$

(2-5)	$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & K_{nn} \end{bmatrix}; K_{nn} = 0$
(2-6)	$K_{ii} = \frac{\alpha_i \left( \frac{x_i}{x_n} \right)^a + \frac{1}{1 + \left( \frac{x_i}{x_n} \right)^\lambda}}{\alpha_i \left( \frac{x_i}{x_n} \right)^s}$
(2-7)	$K^E = \frac{M}{M_P} K$
(2-8)	$D = R^{-1} * K * R; R_{ij} = \begin{cases} 0 & i < j \\ 1 & i \geq j \end{cases}$
(2-9)	$D_{ij} = \begin{cases} 0 & i < j \\ K_{ii} & i = j \\ K_{ii} - K_{i-1, i-1} & i > j \end{cases}$
(2-10)	$M_P = K * D^{2.5} * L * (1 - A) * f(\phi_c) * J\rho_c$
(2-11)	$f(\phi_c) = \phi_c * \left( 1 - \frac{0.1}{2^{9-10*\phi_c}} \right)$
(2-12)	$J\rho_c = \frac{M + q_{mill} + W_B}{V}$
(2-13)	$\frac{dm(t)}{dt} = F(t) - P(t) - D_{ij} * m(t)$
(2-14)	$P^* = k_P * \sqrt{M}$
(2-15)	$P_i^* = m_i^* * \left( \frac{P}{M} \right)$
(2-16)	$c_i = \psi \beta_i (x_i W)^{\beta-1} \exp(-\psi (x_i M)^\beta) + \left( 1 + \left( \frac{x_i}{x_{50}} \right)^Z \right)^{-1}$
(2-17)	$\psi = \exp(-13.12 * \ln(\%Solid) - 6.61)$ $W = \exp(16.53 * \ln(\%Solid) + 5.54)$
(2-18)	$r_i = c_i * P_i^*$
(2-19)	$P_i = (1 - c_i) * P_i^*$
<b>Modelamiento de Agua en Molino SAG</b>	
(2-20)	$\frac{dq_{mill}(t)}{dt} = q_f(t) - q_p(t)$
(2-21)	$k_{qmill} = k_{q1} + \frac{k_{q2}}{m^4}$
(2-22)	$q_p = k_{qmill} * q_{mill}$

Tabla 2-2 – Tabla Resumen de Ecuaciones de Modelamiento

## 2.3 Diseño y Configuración de Modelamiento

Con la intención de realizar un sistema de control avanzado para un molino SAG, se necesitará un modelo correctamente diseñado y acertado del molino que se desarrollará mediante la revisión de distintas tesis que se han dedicado a este rubro y el uso de datos históricos reales.

### 2.3.1 Estaciones Consideradas

- Servidor de Modelo de Molino SAG en Línea



Matlab™ – Sag Mill Model Online  
Simulink™  
Matlab OPC Server  
IP: 192.168.100.10  
Windows Server 2012

Figura 2-10 – Estación de Modelo de Molino SAG en Línea.

Este modelamiento se desarrollará en Matlab/Simulink y su enlace hacia el sistema de control será mediante el protocolo de comunicación OPC siendo aprovechado el servidor OPC embebido en el Simulink.

### 2.3.2 Lista de Instrumentos por Considerar

Según el circuito del proceso definido en el punto 1.2 se ha establecido la siguiente instrumentación necesaria con este objetivo:

- Tonelaje de alimentación fresca a Molino SAG.
- Potencia de Molino SAG
- Presión de descansos de Molino SAG o su proporcional peso de Molino.
- Ingreso de Agua al Molino SAG
- Tonelaje de Rechazos desde Molino SAG hacia Chancadora de Pebbles
- Tonelaje de Pebbles desde Chancado
- Impactos Críticos en Molino SAG
- Velocidad de Giro de Molino SAG

Mediante el uso de estas variables se pueden inferir otras variables del molino SAG para su posterior análisis:

- Nivel de Llenado Total de Molino SAG
- Nivel de Llenado de Bolas en Molino SAG
- Moliendabilidad de Mineral (ton/kw-h)

### 2.3.3 Puesta en Operación de Modelo en Línea

El modelo trabajará en línea enviando señales de las mediciones considerados en el punto 2.3.2:

- Potencia de Molino SAG
- Presión de descansos de Molino SAG o su proporcional peso de Molino.
- Tonelaje de Rechazos desde Molino SAG hacia Chancadora de Pebbles
- Tonelaje de Pebbles desde Chancado
- Impactos Críticos en Molino SAG

A su vez, capturarán las señales enviadas por el controlador como actuadores:

- Tonelaje de alimentación fresca a Molino SAG.
- Ingreso de Agua al Molino SAG
- Velocidad de Giro de Molino SAG

En enlace se producirá mediante comunicación OPC como indica la Figura 2-11



Figura 2-11 – Enlace de Comunicación de Modelo Matemático en Línea.

## 2.4 Descripción de Molino SAG a estudiar

El Área de Molienda recibe el mineral con una dimensión máxima de 7", transportado por una faja, hasta el chute de alimentación del molino SAG, de 40' de diámetro por 20' de longitud, se alimenta con bolas de 5" de diámetro, donde también ingresa agua de proceso y lechada de cal (pulpa de ingreso al molino) lo cual es reducido por la acción del molino ya descrita previamente en el punto 1.3 y descargado a un trommel corto hasta una zaranda vibratoria.

El producto grueso con un tamaño máximo de 1.3", es enviado al chancado de Pebbles; por una ruma de 2000 toneladas; el producto fino menor a 0.5", pasa al cajón de alimentación de los hidrociclones (donde se junta con la pulpa de salida del molino de bolas de 25' x 40') y la pulpa es bombeada hacia los hidrociclones.

El resumen de las especificaciones técnicas del equipo a desarrollar es:

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Datos generales	
Tamaño de Molino	40 [pies] de Diámetro x 20 [pies] de Largo
Capacidad (Según Diseño)	4, 600 [ton/h]
Tipo de Molienda	Molienda húmeda
Tipo de Descarga	Rejillas ranuradas
Apertura de Rejilla	65 [mm]
Diámetro de bolas	5 [inch]
% de Volumen de Bolas	Hasta 20 [%]
% de Volumen de Carga de Mineral	Hasta 30 [%]
Velocidad de Giro	9.055 [rpm] manipulable

Tabla 2-3 – Especificaciones Técnicas de Molino SAG a modelar

## 2.5 Resumen del modelo objeto de estudio con parámetros

Los parámetros por considerar, según el modelo descrito en los puntos anteriores, serán los siguientes:

- Variables de Medición
  - Peso de Molino SAG
  - Impactos Críticos
  - Potencia de Molino SAG
- Variables de Control
  - Control de Velocidad de Molino SAG
  - Control de Alimentación hacia Molino SAG



Figura 2-12 – Parámetros a Considerar en Modelo de Estudio

## 2.6 Validación de Modelos en base a datos simulados y datos de referencia

	Sag Mill Total Feed	Sag Mill Speed	Sag Mill Critical Speed	Sag Mill Solid%
1	3953.90	9.27	0.76	73.11
2	3960.47	9.29	0.76	73.10
3	3986.15	9.29	0.76	73.17
4	3968.32	9.28	0.76	73.24
5	4005.41	9.28	0.76	73.05
6	3956.69	9.30	0.76	73.85
7	4012.47	9.21	0.75	74.03
8	3985.98	9.19	0.75	74.39
9	4130.65	9.23	0.75	74.60
10	3995.67	9.22	0.75	76.05
11	3903.85	9.25	0.76	75.98
12	3906.26	9.25	0.76	75.94
13	4025.12	9.22	0.75	76.28
14	4016.19	9.21	0.75	76.25
15	4055.02	9.23	0.75	76.15
16	4023.01	9.19	0.75	75.80
17	4016.67	9.20	0.75	75.00
<b>Average</b>	3994.22	9.24	0.75	74.70

Tabla 2-4 – Variables Manipuladas a Molino SAG

La Tabla 2-4 muestra las variables manipuladas sobres el molino SAG promediada por hora de la alimentación total (alimentación fresca y Pebbles); velocidad de rotación total y velocidad crítica calculada y el porcentaje de sólidos, la tendencia de cada variable manipulada puede ser observada en la Figura 2-13.

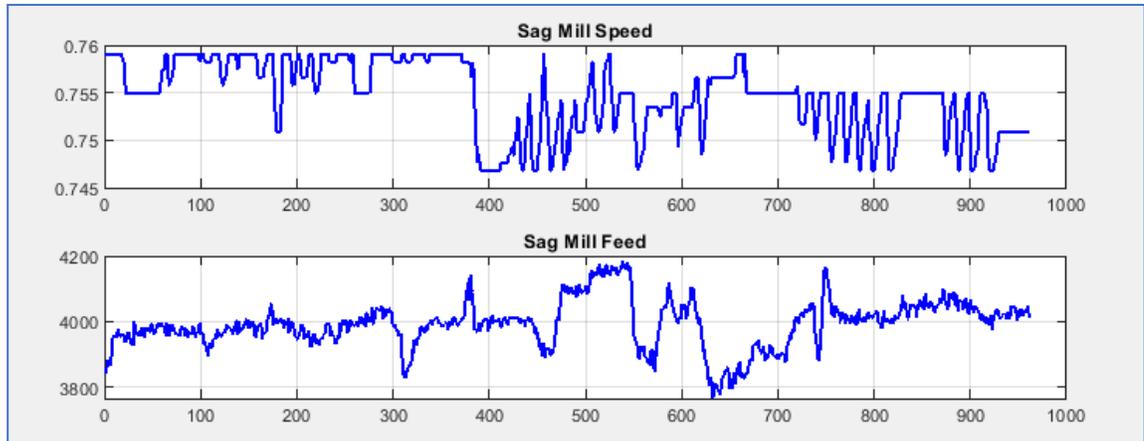


Figura 2-13 – Tendencia de Variables Manipuladas de Molino SAG

La Tabla 2-5 muestra las variables medidas del molino SAG, peso y potencia, reales comparadas con sus valores calculados según cada modelo promediadas por hora, la tendencia de cada variable medida real y calculada pueden ser observadas en la Figura 2-14.

	Sag Mill Power	Sag Mill Model Power	Sag Mill Weight	Sag Mill Model Weight	Sag Mill Weight Variation
1	20.44	20.30	2877.30	2875.94	-0.02
2	20.64	20.43	2885.23	2883.23	-0.17
3	20.46	20.36	2877.27	2878.94	-0.12
4	20.68	20.49	2890.43	2887.21	0.38
5	20.40	20.33	2875.68	2877.59	0.12
6	20.34	20.32	2871.95	2876.37	-0.62
7	20.32	20.38	2882.93	2882.54	0.43
8	20.56	20.54	2896.60	2892.95	0.27
9	20.71	20.94	2909.05	2916.58	0.05
10	20.31	20.47	2886.07	2887.64	-0.40
11	20.78	20.64	2904.10	2897.25	0.48
12	20.79	20.69	2905.68	2900.77	-0.07
13	20.63	20.79	2905.93	2907.59	-0.03
14	20.45	20.62	2896.10	2897.16	-0.32
15	20.43	20.52	2889.13	2890.62	0.13
16	20.78	20.89	2913.60	2914.39	0.58
17	20.96	21.25	2928.00	2936.99	-2.50
<b>Average</b>	20.57	20.58	2893.83	2894.34	

Tabla 2-5 – Variables Medidas de Molino SAG

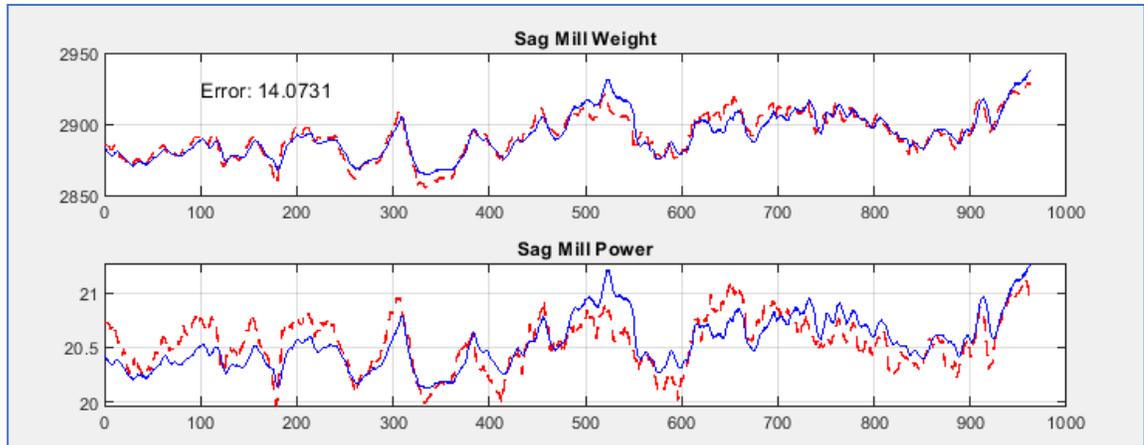


Figura 2-14 – Tendencia de Variables Medidas Reales y Modeladas de Molino SAG

En general, se tiene un error menor del 15% como se muestra en las tendencias siendo producidos por los siguientes motivos:

- La variación de mineral en cuanto a dureza influye significativamente en el proceso, al no tener una variable medible, ha sido calculada mediante una red neuronal.
- El P80 muestra una desviación significativa del modelo de simulación atribuidas a errores de interpolación y errores en las aproximaciones de modelos.
- Se asume como alimentación total a la alimentación proveniente de la pila y de los chancadores de Pebbles.
- Se ha calculado un error de 14.07% con respecto a las variables medibles principales lo cual es aceptable para las simulaciones y el módulo de entrenamiento.

## 2.7 Conclusiones

- En base al circuito descrito, se ha planteado el modelamiento en base a la potencia y el peso del molino.
- Se han definido las estaciones consideradas en base a la necesidad de la arquitectura de control planteada para trabajar con el modelo matemático en línea
- Se han definido las variables medidas y controladas a considerar para el control del molino SAG.
- Con los datos obtenidos se han aproximado los modelos matemáticos disminuyendo el error de cada variable en base a los valores simulados siendo los siguientes.

- Modelo matemático de Función de Velocidad de Molienda

$$\frac{dm_i^*(t)}{dt} = F_i^*(t) - P_i^*(t) - K_{ii} * m_i(t)$$

- Modelo matemático de Clasificación de Mineral

$$c_i = \psi \beta (x_i W)^{\beta-1} \exp(-\psi(x_i M)^\beta) + \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_{50}}\right)^Z}$$

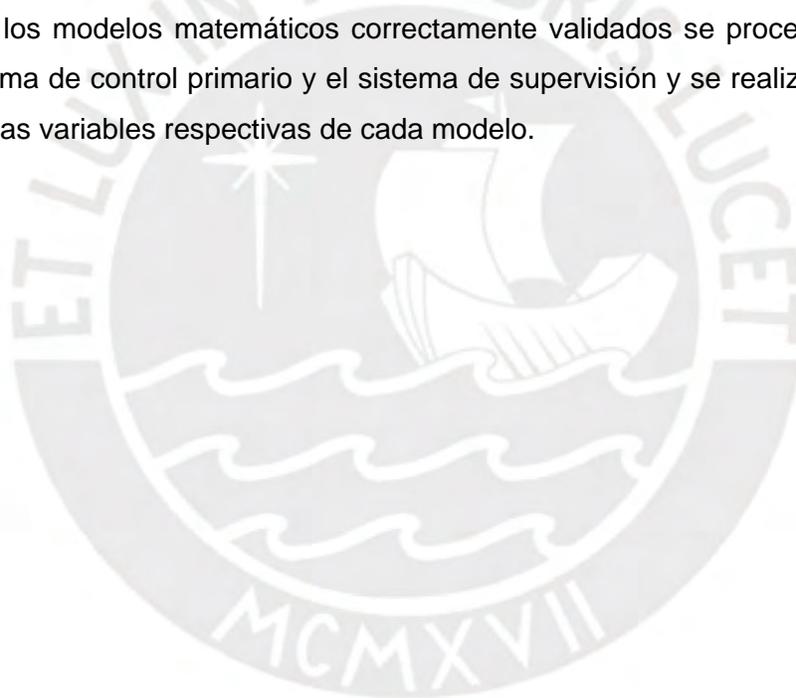
- Modelo matemático de Potencia de Molino

$$M_P = K * D^{2.5} * L * (1 - AJ) * f(\phi_c) * J\rho_c$$

- Modelo matemático de Hold-up de Agua en Molino

$$\frac{dq_{mill}(t)}{dt} = q_f(t) - \left[ k_{q1} + \frac{k_{q2}}{m^4} \right] * q_{mill}$$

- Con los modelos matemáticos correctamente validados se procederá a diseñar el sistema de control primario y el sistema de supervisión y se realizará la integración con las variables respectivas de cada modelo.



## **CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE SISTEMA DE CONTROL PRIMARIO Y SISTEMA DE SUPERVISIÓN**

### **3.1 Introducción**

El sistema de control primario será el encargado de monitorear el arranque, parada y funcionamiento de molino SAG, así como los lazos de control básicos necesarios para su operación regular, todas las señales modeladas mediante el software de Matlab, como se explicó en el punto 2.3.3, la comunicación entre la estación de ingeniería y la estación de modelamiento será OPC.

La lógica de control será descargada en un controlador virtual mediante el software Studio 5000 Logix Emulate™. (Logix 5000 Controllers Common Procedures, 2018), (Logix 5000 Controllers General Instructions Reference Manual, 2018)

### **3.2 Diseño de Sistema de Control Primario**

Para el diseño del sistema de control, se ha tomado en cuenta que la ejecución del programa en tiempo real de la gama Controllogix se realiza mediante un mecanismo de definición de tareas, cada tarea cuenta con su propia configuración y ejecutará distintos programas.

Cada tarea puede ser configurada para ser ejecutada de forma continua, periódica o activada por un evento considerando los siguientes criterios de ejecución:

- Tareas de mayor prioridad que interrumpan todas las tareas de menor prioridad.
- Tareas de mayor prioridad pueden interrumpir las tareas de menor prioridad varias veces.
- Tareas con el mismo nivel de prioridad que se ejecutan en intervalos de tiempo de 1 mseg.
- Las tareas continuas se ejecutan en el nivel de prioridad más bajo; todas las demás tareas interrumpen esta tarea.

Dado esto se han considerado tareas de ejecución para la mejor operación de controlador, sea en un ambiente simulado o en un ambiente real como se indica a continuación.

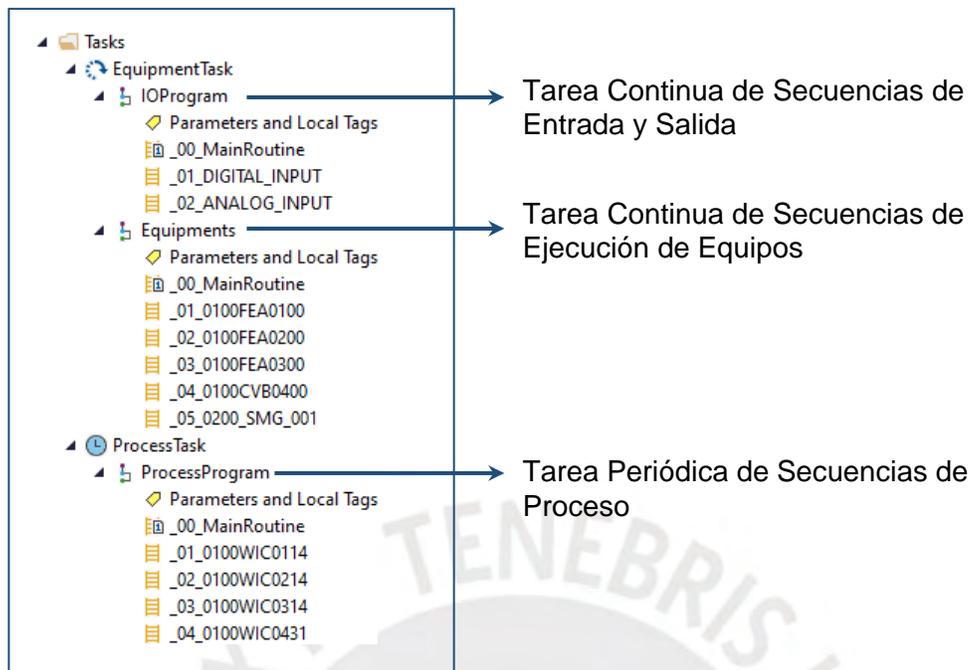


Figura 3-1 – Arquitectura de Tareas de Controlador

El sistema de control primario servirá como el primer enlace entre el modelo matemático en línea (que simula una planta en funcionamiento) con el resto de las soluciones, así como incluirá la filosofía de operación básica del Molino SAG.

### 3.2.1 Filosofía de Operación de Controlador

Este controlador contará con la siguiente filosofía de operación para el molino SAG.

- Modos de Operación
  - Modo de Control Local
  - Modo de Control Remoto
  - Modo de Control de Mantenimiento.
- Secuencia de Arranque de Molino
  - Evaluación de permisos
  - Secuencia Preoperacional para Arranque de Molino
  - Evaluación de estado de Molino
  - Evaluación de subsistemas de control de molino SAG
- Secuencia de Detención de Molino
  - Evaluación de Enclavamientos
  - Secuencia de Detención completa
  - Secuencia de Detención por Emergencia

- Secuencia de Detención por Falla de Energía
- Seguimiento de Operación
  - Verificación de Rutinas de Funcionamiento de Molino SAG
  - Control de Operación de Molino SAG
  - Control de Rotación de Molino SAG
  - Control de Carga y Descarga de Molino SAG
- Control de Lazos Primarios de Molino SAG
  - Lazo de Control PID de Alimentación a Molino SAG
  - Lazo de Control PID de Velocidad de Molino SAG
  - Lazo de Control PID de Ingreso de Agua al Molino SAG

### 3.2.2 Estaciones Consideradas

- Controlador 01



Controllogix L72™  
IP:  
192.168.100.21

Para realizar el control primario del molino SAG se desarrollará un sistema de control en un controlador modelo Controllogix™ de marca Rockwell™ cuyas características básicas se describen en la Figura 3-2.

Figura 3-2 – Especificaciones de Controlador 01

- Estación de Ingeniería 01



RSLogix 5000 Enterprise™  
RSEmulate 5000™  
FactoryTalk View Studio™  
KEPServer OPC™  
Rslinx Enterprise™  
IP: 192.168.100.20  
Windows 7 Professional

La estación considerada para configurar el controlador contará con las características y programas descritas en la Figura 3-3, estos softwares servirán como enlace entre el control primario, el sistema de supervisión y el de control avanzado.

Figura 3-3 – Especificaciones de Estación de Ingeniería 01

### 3.2.3 Puesta en Operación de Controlador Primario

Este control primario servirá como núcleo de la arquitectura de control planteada en la Figura 1-7, sus enlaces serán los siguientes:

- El Controllogix™ se integrará con el Modelo Matemático en Línea a través de un enlace OPC, el cliente OPC será configurado en la Estación de Ingeniería 01 y enviará los datos mediante su protocolo propietario al controlador.
- El Controllogix™ se integrará con el sistema de supervisión primario mediante el enlace propietario RSLinx Enterprise y desde esta estación los operadores controlarán las funciones básicas del Molino SAG.
- El Controllogix™ tendrá configurado los lazos de control primarios sobre los cuales actuará el sistema de control avanzado o control experto, el enlace entre ambos se realizará nuevamente por un protocolo de comunicación OPC siendo el servidor OPC instalado en la Estación de Ingeniería 01 y el cliente OPC en el Servidor FLSmidth ECS/ProcessExpert – PXP™.

La Figura 3-4 muestra la integración descrita del Controllogix™:

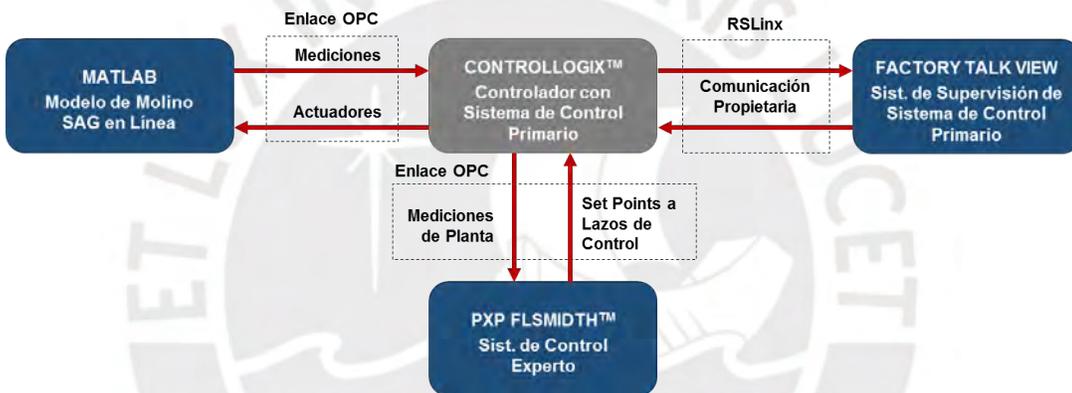


Figura 3-4 – Bloques de Comunicación de Controllogix™.

### 3.3 Diseño de Sistema de Supervisión

Este sistema de supervisión considera la integración directa con el controlador primario y brindará al operador la interfaz necesaria para controlar las funciones básicas del molino SAG descritas en el punto 3.2.1 y la capacidad de gestión e historización propia de un sistema de este tipo (FactoryTalk View Site Edition User's Guide, 2019).

### 3.3.1 Estaciones Consideradas

- Servidor FactoryTalk View Studio™



FactoryTalk View Server™  
FactoryTalk Historian™  
Rslinx Enterprise™  
IP: 192.168.100.12  
Windows Server 2012

Servidor que contendrá la configuración y base de datos del sistema de supervisión diseñado y datos históricos del funcionamiento de planta y el sistema de control primario.

Figura 3-5 – Servidor FactoryTalk View Studio™.

- Estación de Ingeniería 01

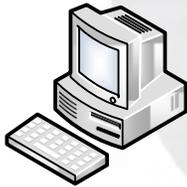


RSLogix 5000 Enterprise™  
RSEmulate 5000™  
FactoryTalk View Studio™  
KEPServer OPC™  
Rslinx Enterprise™  
IP: 192.168.100.20  
Windows 7 Professional

Esta estación será considerada para la edición y configuración del sistema de supervisión mediante el software FactoryTalk View Studio™.

Figura 3-6 – Especificaciones de Estación de Ingeniería 01

- Estación Cliente 01

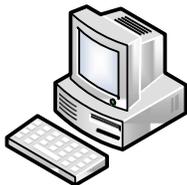


FactoryTalk View Client™  
Rslinx Enterprise™  
ECS/ProcessExpert™  
IP: 192.168.100.31  
Windows 7 Professional

Esta estación será considerada para la operación del sistema de supervisión mediante el software FactoryTalk View Studio™ Client.

Figura 3-7 – Especificaciones de Estación Cliente 01

- Estación Cliente 02



FactoryTalk View Client™  
Rslinx Enterprise™  
ECS/ProcessExpert™  
IP: 192.168.100.32  
Windows 7 Professional

Esta estación será considerada para la operación del sistema de supervisión mediante el software FactoryTalk View Studio™ Client.

Figura 3-8 – Especificaciones de Estación Cliente 02

### 3.3.2 Puesta en Operación de Sistema de Supervisión

La Figura 3-9 muestra la integración descrita del Sistema de Supervisión:

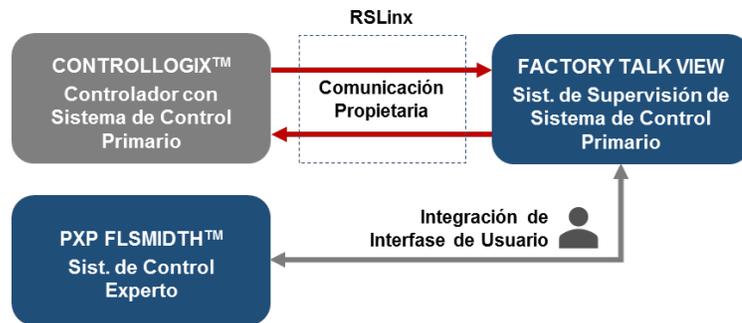


Figura 3-9 – Bloques de Comunicación de Sistema de Supervisión.

Este sistema de supervisión servirá como la interfaz de usuario de la arquitectura de control planteada en la Figura 1-7, sus enlaces serán los siguientes:

- El sistema de supervisión se integrará al controlador primario permitiendo al operador el control básico del molino SAG, así como control de equipos críticos y lazos de control primario.
- El sistema de supervisión se integrará con el sistema de control avanzado permitiendo que el operador pueda encenderlo desde su interfaz, evaluar sus enclavamientos y configurar los lazos PID en modo remoto permitiendo su uso desde el sistema experto.

### 3.4 Ejecución de Secuencias de Entrada y Salida

Esta tarea se ejecutará de forma continua y será la encargada de capturar las señales digitales y analógicas provenientes de planta.

Esta configuración se divide en 4 niveles de ejecución; Unit Modules (UMs), Equipment Phases (EPs), Equipment Modules (EMs) y Control Modules (CMs), siendo un control module el elemento de control más pequeño en el modelo físico dentro del estándar ISA S88.01, por ejemplo, bloques de válvula, motor, entrada analógica y salida analógica y cada uno realiza un control básico.

Esta tarea adicionalmente contendrá las secuencias de calibración y designación de señales de acuerdo con el estándar definido anteriormente permitiendo su configuración en línea desde el sistema de supervisión.



Figura 3-10 – Jerarquía de un Control Modulo en la Estructura de un CLX

### 3.4.1 Rutina para Digital Input – Entrada Digital

La rutina configurada como entrada digital utiliza el siguiente bloque definido por el usuario, el cual proveerá la configuración estándar y señales necesarias para su visualización y control desde el sistema de supervisión configurado.

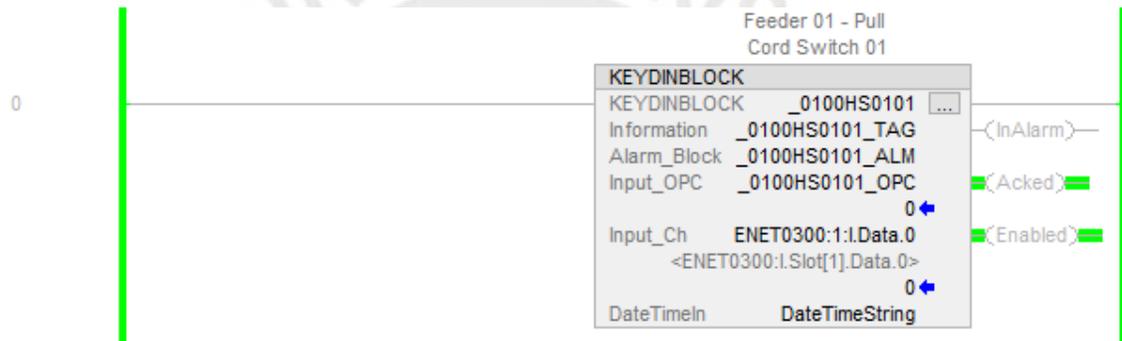


Figura 3-11 – Bloque Definido por Usuario de Entrada Digital

Las señales configuradas con este tipo de bloque definido serán:

Tag Equipo	Equipo	Descripción	Tag Instrumento
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 01 to 10	0100-HS-0101 to 0110
0100-FEA-0100	Feeder 01	Low Speed Switch	0100-SSL-0111
0100-FEA-0100	Feeder 01	Discharge Level High	0100-LSH-0112
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 01 to 10	0100-HS-0201 to 0210
0100-FEA-0200	Feeder 02	Low Speed Switch	0100-SSL-0211
0100-FEA-0200	Feeder 02	Discharge Level High	0100-LSH-0212
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 01 to 10	0100-HS-0301 to 0310
0100-FEA-0300	Feeder 03	Low Speed Switch	0100-SSL-0311
0100-FEA-0300	Feeder 03	Discharge Level High	0100-LSH-0312
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 01 to 10	0100-YS-0401 to 0410

0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 01 to 10	0100-HS-0411 to 0420
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Misalignment Switch 01 to 10	0100-ZS-0421 to 0430

Tabla 3-1 – Tabla de Variables de Entrada Digital configurados en CLX

La lista completa de señales digitales de entrada configuradas se encuentra en la Tabla A-1 de la sección de Anexos.

### 3.4.2 Rutina para Analog Input – Entrada Analógica

La rutina configurada como entrada analógica utiliza el siguiente bloque definido por el usuario, el cual proveerá la configuración estándar y señales necesarias para su visualización y control desde el sistema de supervisión configurado.

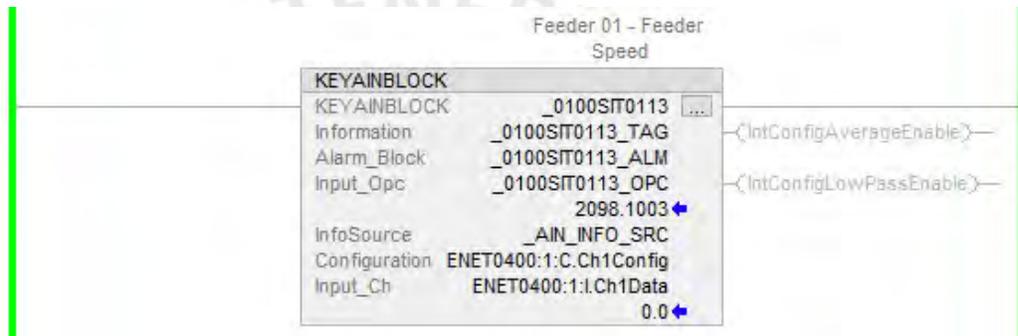


Figura 3-12 – Bloque Definido por Usuario de Entrada Analógica

Las señales configuradas con este tipo de bloque definido serán:

Tag Equipo	Equipo	Descripción	Tag Instrumento
N/A	Stockpile	Stockpile Level	0100-LI-0010
0100-FEA-0100	Feeder 01	Feeder Speed	0100-SIT-0113
0100-FEA-0100	Feeder 01	Feeder Mass Flow	0100-WIT-0114
0100-FEA-0200	Feeder 02	Feeder Speed	0100-SIT-0213
0100-FEA-0200	Feeder 02	Feeder Mass Flow	0100-WIT-0214
0100-FEA-0300	Feeder 03	Feeder Speed	0100-SIT-0313
0100-FEA-0300	Feeder 03	Feeder Mass Flow	0100-WIT-0314
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Feeder Weight Flow	0100-WIT-0431
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Weight	0200-WIT-0001
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Power	0200-UIT-0001
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Critical Impact	0200-UIT-0002

Tabla 3-2 – Tabla de Variables de Entrada Analógica configurados en CLX

La lista completa de señales analógicas de entrada configuradas se encuentra en la Tabla A-1 y la descripción del faceplate diseñado se encuentra en el anexo A.1.3.

### 3.4.3 Rutina para Controlador PID – Salida Analógica

La rutina configurada como salida analógica se encuentra incluida en la lógica de control PID y se utiliza el siguiente bloque que proveerá la configuración estándar y señales necesarias para su visualización y control desde el sistema de supervisión configurado.

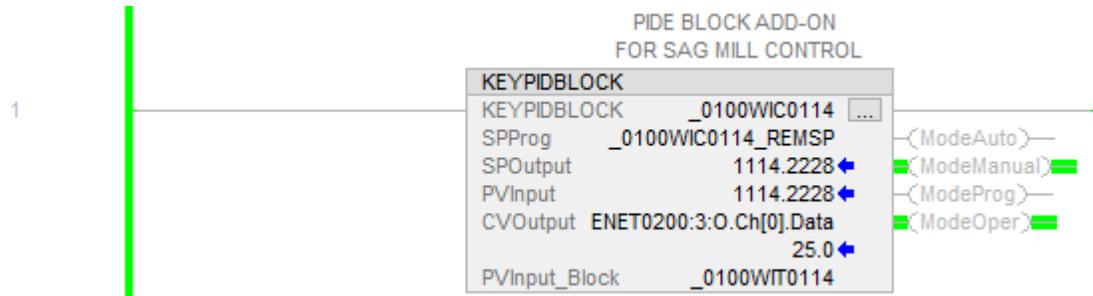


Figura 3-13 – Bloque Definido por Usuario de Control PID

Las señales configuradas con este tipo de bloque definido serán:

Tag Equipo	Equipo	Descripción	Tag Instrumento
0100-FEA-0100	Feeder 01	Feeder Speed Control	0100-WIC-0114
0100-FEA-0200	Feeder 02	Feeder Speed Control	0100-WIC-0214
0100-FEA-0300	Feeder 03	Feeder Speed Control	0100-WIC-0314
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Feeder Speed Control	0100-WIC-0431
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Speed Control	0200-SIC-0001
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Water Control	0200-FIC-0002

Tabla 3-3 – Tabla de Variables de Salida Analógica configurados en CLX

La lista completa de señales analógicas de salida en cada bloque PIDE configuradas se encuentra en la Tabla A-1 y la descripción del faceplate diseñado se encuentra en el anexo A.1.4.

## 3.5 Ejecución de Secuencias de Ejecución de Equipos

Esta tarea se ejecutará de forma continua y estará encargada de las tareas de activación y desactivación de cada equipo según el modo de control definido en el punto 3.7 de modos de operación.

Esta tarea adicionalmente contendrá las secuencias de permisivos y enclavamiento y su respectiva designación de señales de acuerdo con el estándar definido anteriormente permitiendo su configuración en línea desde el sistema de supervisión.

### 3.5.1 Permisivos de Control

<b>Permisivo</b>	<b>Valor</b>
▪ Grupo de Lubricación - Nivel de Aceite en Depósito adecuado.	20%
▪ Grupo de Lubricación – Temperatura de Aceite en Deposito adecuada.	40°C
▪ Grupo de Lubricación – Presión de Acumulador adecuada.	9000Kpa
▪ Grupo de Freno Hidráulico – Temperatura de Tanque adecuada.	65°C
▪ Grupo de Freno Hidráulico – Nivel de Tanque adecuada.	250%

### 3.5.2 Enclavamientos de Control

<b>Enclavamiento</b>	<b>Valor</b>
▪ Grupo de Lubricación – Válvula de descarga abierta	---
▪ Grupo de Lubricación - Nivel de Aceite en Depósito menor a:	18%
▪ Grupo de Lubricación – Temperatura de aceite menor a:	35°C
▪ Grupo de Lubricación – Bombas de Lubricación arrancadas.	---
▪ Grupo de Lubricación – Presión de Acumulador adecuada.	9000Kpa
▪ Grupo de Freno Hidráulico – Temperatura de Tanque menor a:	60°C
▪ Grupo de Freno Hidráulico – Flujo de aceite menor a:	350 lpm
▪ Grupo de Freno Hidráulico – Nivel de Tanque adecuada.	250%
▪ Grupo de Freno Hidráulico – Frenos de Molino liberados.	---

### 3.5.3 Secuencia de Arranque

- Verificación que Sistema de Lubricación se encuentra operando en condiciones normales.
- Verificación que Sistema de Frenos se encuentra operando en condiciones normales.
- Operación de Liberación de Frenos de molino exitosa.
- Verificación que enclavamiento y permisivos de Molino SAG se encuentran operativos o en rangos normales.
- Verificación que tiempo entre arranque de Molino es mayor al configurado.
- Arranque molino y acelerarlo hasta su velocidad de arranque y mantenerla por 1 minuto.
- Verificación de la carga del molino.

- Verificación que enclavamientos de Molino SAG no se encuentran activos o fuera de sus rangos de operación.

#### 3.5.4 Secuencia de Parada

- Liberación de carga interna del molino.
- Verificación de potencia de molino durante liberación.
- Inicio de rampa de bajada de velocidad de molino SAG.
- Verificación de velocidad zero de molino SAG.
- Inicio de secuencia de posicionamiento de frenos en Molino SAG.
- Verificación que Sistema de Frenos en condiciones normales.
- Operación de Posicionamiento de Frenos de molino exitosa.

### 3.6 Ejecución de Secuencias de Proceso

Esta tarea se ejecutará de forma periódica a un tiempo de muestreo de 2,500 ms y estará encargada de la ejecución de lazos de control PID locales que forman parte del sistema primario.

	Estado
<b>Flujo de lechada de cal</b>	Simulado
<b>Temperatura de aceite del tanque de acondicionamiento</b>	Simulado
<b>Presión de aceite a la entrada de la válvula de descarga</b>	Simulado
<b>Presión del fluido a la entrada del manifold principal</b>	Simulado
<b>Presión del fluido a la entrada a conjunto de freno.</b>	Simulado
<b>Alimentación de Feeders a Molino SAG</b>	Modelado
<b>Flujo de agua de proceso al molino SAG</b>	Modelado

Tabla 3-4 – Tabla de Lazos PID configurados en Controlador Primario.

Adicionalmente contendrá las designaciones de señales de acuerdo con el estándar definido anteriormente permitiendo la configuración y sintonización en línea de cada lazo de control desde el sistema de supervisión.

### 3.6.1 Configuración de Lazo PID



Figura 3-14 – Bloque de Control PIDE

Para la configuración de cada lazo PID se utilizará el bloque de función PIDE propio del controlador Controllogix de gama avanzada considerando la siguiente configuración.

El algoritmo PID regula la salida de la variable controlada (CV) para mantener cada variable de proceso (PV) en su respectivo set point (SP) cuando la instrucción se ejecuta en los modos cascada o automático.

Los parámetros básicos utilizados son los siguientes

- Parámetro Proporcional (PGAIN) - Ganancia proporcional sin unidades.
- Parámetro Integral (IGAIN) - Ganancia integrativa con unidad 1/minutos.
- Parámetro Derivativo (DGAIN) - Ganancia derivativa de unidad de minutos.

### 3.6.2 Algoritmo PID utilizado

El cálculo del nuevo valor de cada variable de control (CV) se da sumando los valores calculados de variación del término proporcional y de término integrativo y derivativo con el valor previo de la variable de control (CV).

$$CV_n = CV_{n-1} + \Delta P_{Term} + I_{Term} + D_{Term} \quad (3-1)$$

La instrucción PIDE utiliza un algoritmo PID de forma de velocidad similar al utilizado en la mayoría de los sistemas DCS esta forma considera cambios de ganancia adaptativa sin saltos y esquemas de control de múltiples bucles que puede implementar una limitación cruzada entre bucles manipulando el término CVn-1.

El algoritmo PID utilizado es de forma independiente y cada término del algoritmo (proporcional, integral y derivado) tiene una ganancia separada.

$$CV_n = CV_{n-1} + K_P \Delta E + \frac{K_I}{60} E \Delta t + 60 K_D \frac{E_n - \Delta E_{n-1} + E_{n-2}}{\Delta t} \quad (3-2)$$

Donde, CV es la variable de control variable, E es el error en porcentaje del intervalo definido o spam, Dt es el tiempo de actualización en segundos usado por el lazo,  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $K_i$  es la ganancia integral en  $\text{min}^{-1}$  y  $K_D$  es la Ganancia derivada en minutos.

### 3.6.3 Sintonización de Lazo PID.

La sintonización de cada lazo de control será considerada el tiempo de muestreo definido para esta tarde de 2500 ms, el lazo principal de control a sintonizar en el sistema de control primario será el de alimentación total hacia el molino SAG y ha sido modelado de la siguiente forma.

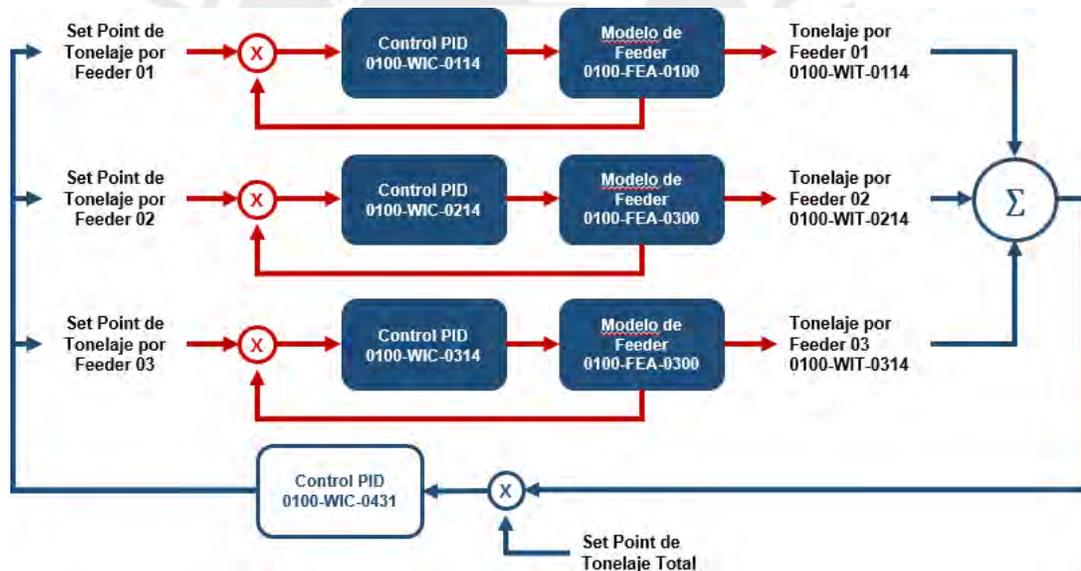


Figura 3-15 – Configuración de lazos de control de alimentadores

Donde cada lazo de alimentación a los alimentadores 01, 02 y 03 estarán conectados en forma de cascada al lazo del alimentador principal sobre el cual actuará el set point de alimentación total al molino SAG.

### 3.6.3.1 Sintonización de lazo de alimentadores secundarios

Cada alimentador secundario será sintonizado de forma independiente teniendo su lazo en modo automático – local, la sintonización se ha realizado mediante el ajuste fino de los parámetros proporcional e integral en base al modelo matemático de cada alimentador.

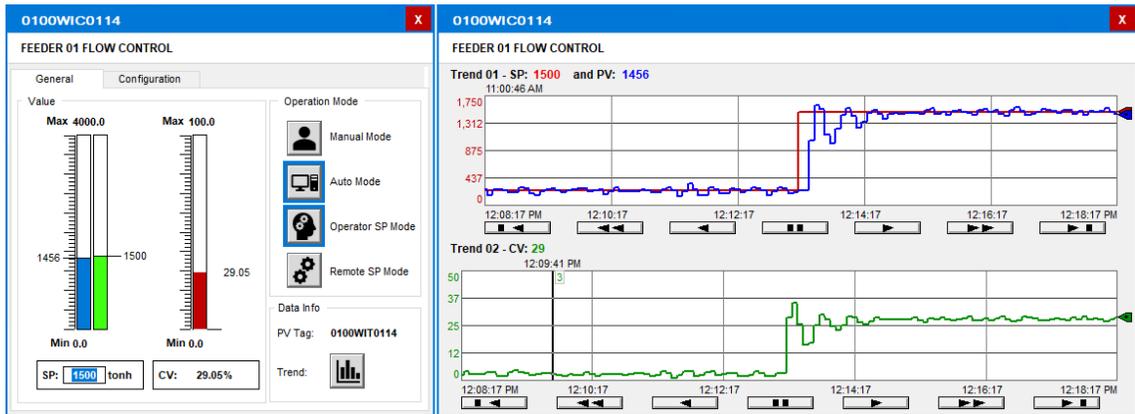


Figura 3-16 – Sintonización de Lazo PID Secundario 0100-WIC-0114

Los parámetros de sintonización ajustados para los lazos secundarios son:

$$\text{Lazo 0100-WIC-0114: } CV_n = CV_{n-1} + 0.725 * \Delta E + \frac{2.51}{60} E \Delta t \quad (3-3)$$

$$\text{Lazo 0100-WIC-0214: } CV_n = CV_{n-1} + 0.629 * \Delta E + \frac{2.12}{60} E \Delta t \quad (3-4)$$

$$\text{Lazo 0100-WIC-0314: } CV_n = CV_{n-1} + 0.625 * \Delta E + \frac{1.01}{60} E \Delta t \quad (3-5)$$

### 3.6.3.2 Sintonización de lazo de alimentador principal

Una vez que todos los alimentadores secundarios se encuentren sintonizados de forma independiente, se procederá a sintonizar el lazo principal colocando cada lazo secundario en modo automático – remoto recibiendo el set point calculado del lazo principal 0100-WIC-0431 como se indica en la Figura 3-15.

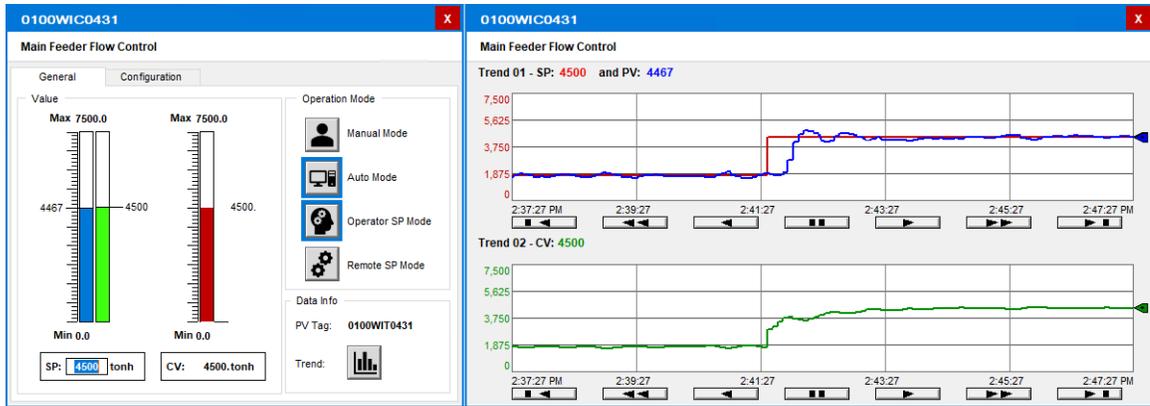


Figura 3-17 – Sintonización de Lazo PID Primario 0100-WIC-0431

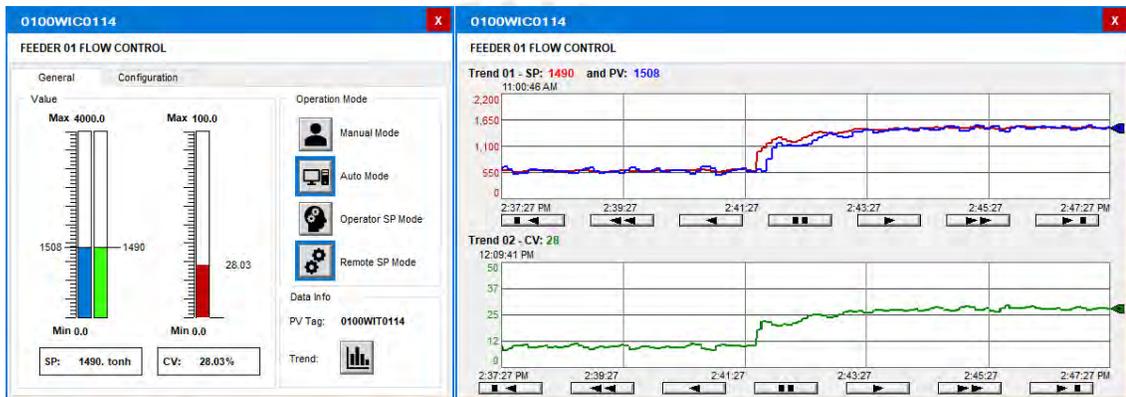


Figura 3-18 – Respuesta de Lazos Secundarios a set point de lazo principal.

Los parámetros de sintonización ajustados son:

$$\text{Lazo 0100-WIC-0631: } CV_n = CV_{n-1} + 0.425 * \Delta E + \frac{1.050}{60} E \Delta t \quad (3-6)$$

Una vez que todos los alimentadores secundarios se encuentren sintonizados de forma independiente, se procederá a sintonizar el lazo principal colocando cada lazo secundario en modo automático – remoto recibiendo el set point calculado del lazo principal 0100-WIC-0431 como se indica en la Figura 3-15.

### 3.6.4 Parámetros de Configuración de Bloque PIDE

Los parámetros utilizados para la configuración de cada bloque de control PIDE han sido definidos como de entrada y de salida siendo los siguientes:

- Parámetros de Entrada

Parámetro	Tipo de Dato	Descripción
<b>PV</b>	Flotante	Variable de entrada de proceso escalada.
<b>PVEUMax</b>	Flotante	Valor máximo de variable de proceso escalada.
<b>PVEUMin</b>	Flotante	Valor mínimo de variable de proceso escalada.
<b>SPProg</b>	Flotante	El lazo de control trabaja de forma remota, este parámetro es ingresado directamente por el algoritmo del sistema de control avanzado respetando los límites configurados en el mismo
<b>SPOper</b>	Flotante	El lazo de control trabaja de forma local, este set-point es ingresado por el operador según su preferencia respetando los límites configurados previamente.
<b>SPHLimit</b>	Flotante	Valor máximo de set-point a ingresar.
<b>SPLLimit</b>	Flotante	Valor mínimo de set-point a ingresar.
<b>CVHLimit</b>	Flotante	Valor máximo de variable controlada calculada.
<b>CVLLimit</b>	Flotante	Valor mínimo de variable controlada calculada.
<b>PVTracking</b>	Booleano	Cuando lazo se encuentra en modo manual, el SP seguirá al valor de PV actual.
<b>ProgOperReq</b>	Booleano	Define el modo de operación del lazo, si está activado el lazo estará en modo manual sino estará en modo automático.
<b>ProgAutoReq</b>	Booleano	Define el modo de operación del lazo, si está activado el lazo estará en modo remoto sino estará en modo local.

Tabla 3-5 – Tabla de Parámetros de Entrada de Bloque PIDE

- Parámetros de Salida

Parámetro	Tipo de Dato	Descripción
<b>CVEU</b>	Flotante	Variable de control escalada según parámetros CVEUMax y CVEUMin.
<b>CVHAlarm</b>	Booleano	Indicador de variable de control mayor a límite máximo.
<b>CVLAlarm</b>	Booleano	Indicador de variable de control menor a límite mínimo.

Tabla 3-6 – Tabla de Parámetros de Salida de Bloque PIDE

### 3.7 Modos de Operación

#### 3.7.1 Modo de Operación Manual - Automático

Existen 2 modos de operación: **Manual (Man)** y **Automático (Auto)**, estos conceptos serán aplicados a cada CM cuando se encuentren en modo de control **Remoto (REM)**, para términos de control **Local (LOC)** no se hará uso del controlador para su funcionamiento.

Para el arranque de equipos secundarios, la selección preliminar para habilitar el control por controlador es la posición del selector de campo de cada equipamiento en remoto, para el arranque del molino SAG no existirá arranque en modo Local, solamente en modo Remoto, por la complejidad y cantidad de permisivos necesarios.

#### 3.7.2 Modo de control: Local, Remoto, MOA

El Modo de Control principal determina si el dispositivo será controlado por el procesador CLX (modo Remoto) o por una lógica cableada (modo Local). Este modo de operación podrá ser elegido a través de un selector en campo el cual tendrá tres posiciones “Local-Off-Remoto”.

Igualmente existen submodos de control lo cual podrá ser elegido a través de los faceplates de cada módulo de control, esto estará disponible en forma de botones o selectores. Las posiciones que se consideran como subprocesos en modo remoto son “Manual-Off-Auto”.

La siguiente tabla muestra los modos de operación según lo descrito anteriormente:

Modo de Operación	Submodo de Operación	Filosofía de Control
<b>Local</b>		El control local se hace a través de las botoneras de arranque y parada ubicadas en la instalación de cada motor, el CLX no tiene control sobre el mismo.
<b>Remoto</b>	<b>Automático</b>	En modo automático el CLX controla el arranque de motores según la secuencia configurada.
	<b>Manual</b>	El operador arranca los motores o válvulas a través del CLX de forma manual remota

Tabla 3-7 – Modo de Operación de Motores Secundarios

### 3.8 Criterio de Comunicación

La comunicación entre la estación de ingeniería y la estación de modelamiento será OPC considerando el software propietario de Rockwell, RSLINX™ como servidor OPC y el Bloque de Simulink como cliente OPC para su comunicación directa.



Figura 3-19 – Arquitectura de Comunicación entre Simulink y RSLogix 5000™

#### 3.8.1 Servidor OPC – RSLinx™ Gateway

El servidor de datos OPC de Rockwell Automation es el RSLinx™ el cual proporciona un mejor rendimiento para la comunicación con los controladores Logix5000 físicos o simulados, y con muchos clientes, a su vez, puede ser utilizado para extraer datos desde y hacia una base de dispositivos de alarmas y eventos.

#### 3.8.2 Cliente OPC – Simulink OPC Data Access Server

El bloque de control Simulink se encuentra conectado directamente a los bloques de modelamiento matemático descritos previamente y se comunicará directamente con los tags del controlador mediante enlace OPC de igual forma que sería conectadas a una señal de campo real, esto se refiere a que se considerará las señales analógicas de entrada y salida respectivamente.

	Tipo de Señal	Read / Read & Write	Servidor OPC
<b>Peso de Molino SAG</b>	Analógica	Read	RSLinx
<b>Impactos Críticos de Molino SAG</b>	Analógica	Read	RSLinx
<b>Potencia de Molino SAG</b>	Analógica	Read	RSLinx
<b>Velocidad de Molino SAG</b>	Analógica	Read & Write	RSLinx
<b>Alimentación al Molino SAG</b>	Analógica	Read & Write	RSLinx
<b>Flujo de Agua al Molino SAG</b>	Analógica	Read & Write	RSLinx
<b>Molino Encendido</b>	Digital	Read	RSLinx
<b>Molino en Emergencia</b>	Digital	Read	RSLinx
<b>Molino Detenido</b>	Digital	Read	RSLinx

Tabla 3-8 – Señales Lectura/Escritura entre Modelo y Controlador Primario

### 3.9 Nomenclatura de programación

Cada módulo y secuencia seguirá el siguiente estándar de nomenclatura para mantener un orden visual de ejecución y ser de fácil reconocimiento para su seguimiento.

- Nombre de Controlador Configurado: \_2020\_PUCP\_GAR
- Nombre de Módulo de Comunicación Ethernet: \_2020\_PUCP\_GAR\_ETH
- Nombre de Módulo de Entrada Analógica: \_2020\_PUCP\_GAR\_AI\_04
- Nombre de Módulo de Salida Analógica: \_2020\_PUCP\_GAR\_AO\_05
- Nombre de Módulo de Entrada Digital: \_2020\_PUCP\_GAR\_DI\_06
- Nombre de Módulo de Salida Digital: \_2020\_PUCP\_GAR\_DO\_07

### 3.10 Diseño de Sistema de Supervisión

El sistema de control diseñado contempla la operación y supervisión básica del molino SAG, con este sistema el molino puede operar normalmente ya que el operador podrá arrancar o detener equipos, supervisar las variables críticas, supervisar el resto del proceso e ingresará los setpoints manualmente según su consideración.

El uso de cada faceplate y de la pantalla principal se encuentran detalladas en el

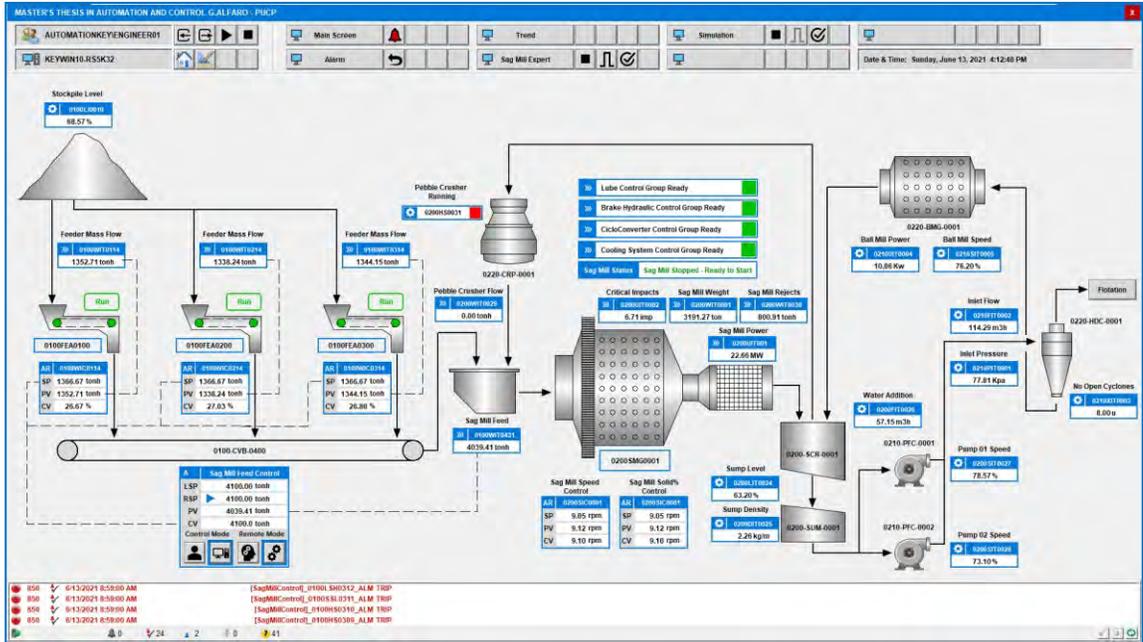


Figura 3-20 – Diseño de Pantalla Principal

### 3.10.1 Arquitectura de Sistema de Supervisión

La arquitectura del sistema de supervisión será del modo Cliente – Servidor y se puede visualizar en la siguiente figura.

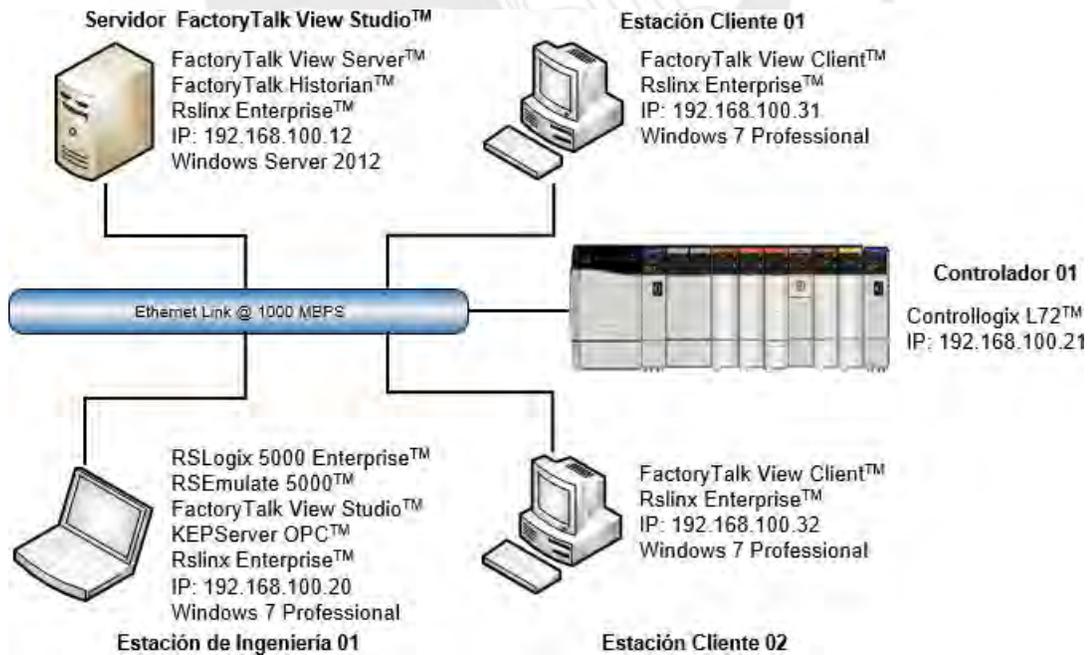


Figura 3-21 – Arquitectura de Sistema de Supervisión Primario

El software de comunicación a utilizar será Rslinx Enterprise™ propietario de Rockwell Software el que permite una mejor integración entre las señales del controlador y el sistema de supervisión.

Este sistema de supervisión puede también incluir sistemas de diagnóstico de fallas del molino SAG (Pérez-Zuniga et al, 2015; Pérez et al 2016, Pérez-Zuniga, 2017, 2018; Pérez-Zuñiga 2019).

### 3.10.2 Niveles de Seguridad

La cual nos muestra todo el proceso de molienda primaria modelada, para poder ver los estados de cada variable dependerá del acceso que se le asigne al usuario, de acuerdo con su nivel de funcionalidad, y estos son:

- Operador
- Ingeniería
- Mantenimiento

Los niveles de acceso para cada usuario se detallan en la siguiente tabla

Nivel de Acceso	Operador	Mantenimiento	Ingeniería
<b>Peso de Molino SAG</b>	X		X
<b>Acceso a pantallas de proceso</b>	X		X
<b>Modificación de set point de controladores</b>	X		X
<b>Cambio de modo de operación de equipos</b>	X		X
<b>Arranque o parada de secuencias</b>	X		X
<b>Reconocimiento de Alarmas</b>	X		X
<b>Apertura de tendencias</b>	X		X
<b>Cambio de parámetros de controladores</b>		X	X
<b>Forzado de salidas de sistema</b>		X	X
<b>Habilitación o deshabilitación de enclavamientos</b>		X	X
<b>Acceso a lógica de control de PLC's</b>		X	X
<b>Modificación de Pantallas en Estaciones de Operación</b>		X	X

Tabla 3-9 – Tabla de Niveles de Seguridad

### 3.10.3 Especificación de Grupos de Molino SAG

De acuerdo con la secuencia de arranque y detención del molino SAG, se depende del estado de grupos que cumplen distintas funciones específicas, el bit de estado de cada grupo será simulado desde el sistema de supervisión y representará tanto un permisivo como un enclavamiento para el funcionamiento del molino, los grupos considerados son los siguientes:

- Grupo de Lubricación - Este grupo provee aceite de lubricación a alta presión para los cojinetes del Molino SAG
- Grupo de Freno Hidráulico – Este grupo es utilizado para detener o soportar el molino mientras se encuentre detenido.
- Grupo de Cicloconvertidor – Grupo encargado de controlar directamente el molino, posee su propio controlador que monitorea sus variables críticas y modos de operación.
- Grupo de Impactómetro – Grupo encargado de controlar el estado del sensor avanzado de medición de impactos críticos o impactómetro,

La visualización del estado de cada grupo se encuentra en el faceplate principal; cada grupo posee 2 estados en total, “OK” indicando que el grupo se encuentra operativo y “FAIL” que indica que el grupo presenta alguna falla.



Figura 3-22 – Indicación “OK” de Estado de Grupos de Molino SAG



Figura 3-23 – Indicación “FAIL” de Estado de Grupos de Molino SAG



Figura 3-24 – Diseño de Pantalla de Control de Molino SAG

### 3.11 Conclusiones

- El sistema de control primario considerará la integración con el modelo matemático del molino SAG y la lógica básica de configuración de señales de entradas y salidas, configuración de cada equipo y los lazos de control PID.
- El sistema de supervisión primario estará conectado con el sistema de control primario siguiendo estándares de nomenclatura y conexionado previamente definidos.
- Se ha definido el diseño del sistema de control primario en base a la técnica de control a utilizar siguiendo las prioridades de las tareas a ejecutar.
- Cada tarea ha sido definida basándose en su prioridad de ejecución y el orden de variables recomendadas por el proveedor.
- Las tareas de ejecución de configuración de señales de entrada y salida, así como la configuración de cada equipo han sido consideradas del tipo continuo, es decir, de ejecución constante y de baja prioridad.
- Las tareas de ejecución de lazos de control han sido consideradas de tipo periódico, teniendo alta prioridad cada vez que se ejecute, su tiempo de ejecución o de muestreo es de 2500 ms.
- Los lazos de control PID fueron sintonizados utilizando el método de ajuste manual y considerando cada variable de control, su variable de proceso y su modelo matemático respectivo.

- El sistema de supervisión se integrará con el sistema de control primario utilizando los protocolos propietarios de la marca Allen Bradley y el protocolo OPC para la integración con el sistema de control avanzado.
- Cada señal descrita tendrá su propio faceplate de control y supervisión, su descripción y manual de uso de cada uno se encuentra en el anexo de este documento.
- Se han definido los grupos de control para el arranque y parada del molino SAG, cuyas señales serán simuladas.



## CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE SISTEMA DE CONTROL AVANZADO

### 4.1 Introducción

El sistema de control avanzado diseñado implementa estrategias de control de optimización en tiempo real para el proceso de molienda primaria.

La lógica de control considerada se basa en decisiones secuenciales las cuales ejecutarán controladores basados en MPC o lógica difusa.

El sistema de control avanzado extraerá las señales del sistema de control primario directamente donde procesará, en intervalos de 30 segundos, cada medición y su respectiva acción de la siguiente forma:

- Validación de Datos – Evaluará cada variable de medición capturada de acuerdo con los parámetros preestablecidos de estabilidad, cambio según el tiempo, estado de variable y límites ingresado.
- Evaluar desempeño de variable – Evalúa, según el modelo de la variable, su respectiva predicción para el siguiente escaneo.
- Calculo de acciones – Según el modelo del actuador, la predicción de su medición su objetivo y la sintonización del controlador se calcula la acción a ejecutar.
- Generación de Set-Point – Una vez calculada la acción a ejecutar, está es indexada a su set-point respectivo para ser enviada al sistema de control primario.

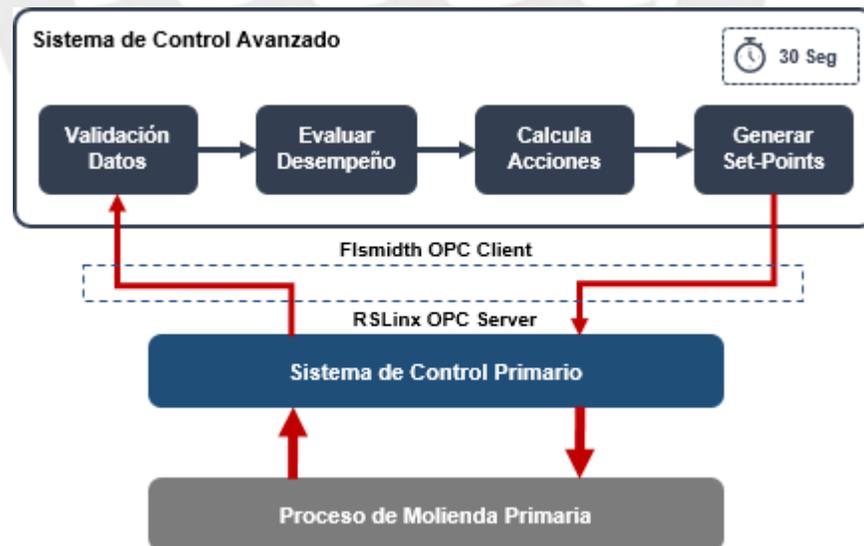


Figura 4-1 – Funcionamiento de Sistema de Control Avanzado

## 4.2 Desarrollo de Sistema de Control Avanzado

El sistema de control avanzado servirá como la capa más alta de control para el Molino SAG, será el encargado de mejorar la eficiencia mientras evalúa todas las condiciones o la problemática definida en el punto 1.4, el tiempo de escaneo considerado para este sistema en tiempo real será de 30 segundos evaluando la carga de procesamiento de los núcleos del servidor.

### 4.2.1 Filosofía de Operación de Controlador

Este nivel de control contará con la siguiente filosofía de operación para el molino SAG, siendo listada en orden prioritaria de más importante a menos importante:

- Control de Potencia: El control de potencia del molino ante un evento de alto valor mantendrá la velocidad en su valor actual y reducirá la alimentación hasta llevar
- Control de Peso; el sistema mantendrá el peso del molino en su rango controlando tanto la velocidad, la alimentación o el porcentaje de sólidos.
  - Alto Peso de Molino; en caso el peso supere el límite alto, la velocidad del molino será maximizada y la alimentación será reducida hasta regresar el peso del molino hacia su rango de operación óptima.
- Control de Impactos Críticos: El sistema mantendrá el control de impactos críticos dentro de su rango controlando como variable principal la velocidad del molino SAG.
  - Bajos Impactos Críticos: Ante el evento de bajos impactos críticos, la velocidad del molino se maximizará y la alimentación será reducida hasta tener el valor de impactos dentro de su rango normal de operación.
  - Altos Impactos Críticos: Ante el evento de altos impactos críticos, la alimentación se incrementará y la velocidad del molino se mantendrá constante a menos que la alimentación llegue a su límite máximo.
- Control de Pebbles: Si los rechazos del molino son muy elevados, se reducirá la alimentación del molino manteniendo la velocidad constante
- Mejora de Producción de Molino SAG; Si no hay ninguna condición de control por algún evento, el controlador maximizará la alimentación al molino mientras monitorea el resto de las variables dentro de su rango de control.

#### 4.2.2 Estaciones Consideradas

- Servidor FLSmidth ECS/ProcessExpert - PXP™

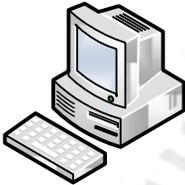


FLSmidth  
ECS/ProcessExpert™  
PXP™  
ECS OPC Client  
IP: 192.168.100.11  
Windows Server 2012

Servidor que contendrá la configuración, base de datos, controladores, interfaz del sistema y datos históricos de control avanzado.

Figura 4-2 – Servidor FLSmidth PXPTM.

- Estación Cliente 01



FactoryTalk View Client™  
Rslinx Enterprise™  
ECS/ProcessExpert™  
IP: 192.168.100.31  
Windows 7 Professional

Esta estación será considerada para la operación del sistema de control avanzado mediante el software ECS/ProcessExpert™.

Figura 4-3 – Estación Cliente 01

- Estación Cliente 02



FactoryTalk View Client™  
Rslinx Enterprise™  
ECS/ProcessExpert™  
IP: 192.168.100.31  
Windows 7 Professional

Esta estación será considerada para la operación del sistema de control avanzado mediante el software ECS/ProcessExpert™.

Figura 4-4 – Estación Cliente 02

#### 4.2.3 Puesta en Operación de Controlador Primario

Este control experto se encontrará en el nivel más alto de la arquitectura de control a diseñar con las siguientes consideraciones:

- El sistema de control experto se integrará con el sistema de control básico mediante la interfaz embebida en el sistema experto junto con el sistema de supervisión para el encendido/apagado del sistema experto y monitoreo de enclavamientos.
- El sistema de control experto se integrará al controlador diseñado mediante comunicación OPC recibiendo señales de mediciones consideradas para la filosofía de control del punto 4.2.1 y enviando los setpoints remotos a los lazos de control primarios designados.

La Figura 4-5 muestra la integración del sistema de control experto:

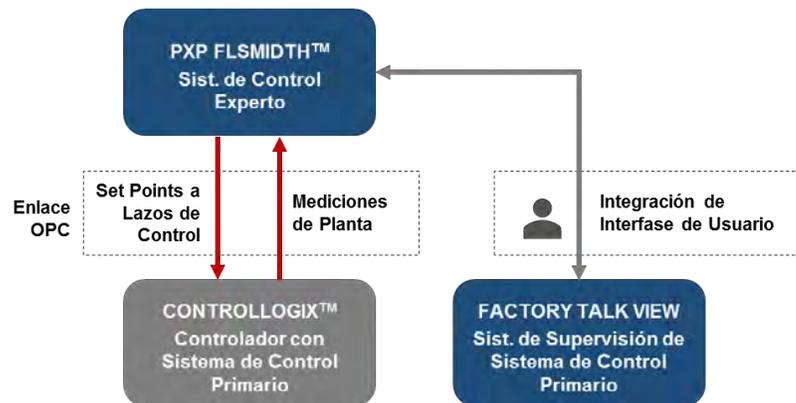


Figura 4-5 – Bloques de Comunicación del Sistema Experto.

### 4.3 Definición de Grupos de Control

Un grupo de control se define como la unidad de control que integra cada parte del sistema de control avanzado, se divide en 02 grupos de control, principales y secundarios.

- Sistema de Control Primario – Grupos de control que requieren activación desde el sistema de control primario.
- Sistema de Control Secundario - Grupos de control que puede ser activado solo si su grupo principal se encuentra activado, el comando de activación se realiza desde el sistema de control avanzado.

#### 4.3.1 Activación de Grupos de Control Primarios

La activación del grupo de control principal se realiza desde el sistema de control de Antapaccay; la activación del grupo de control requiere de los siguientes requisitos.

- Watchdog de comunicación entre Sistemas de Control Primario y Avanzado activado
- Grupo de Control listo para arrancar – Considerando los siguientes enclavamientos
  - Molino SAG encendido.
  - Molino SAG encendido por más de 30 minutos
  - Velocidad de Molino SAG mayor a 8.5 RPM
- Comando de activación desde sistema de control primario.

Al enviar el comando de activación, el SCP (Sistema de Control Primario) enviará dicho comando al SCA (Sistema de Control Avanzado), el cual activará el grupo respectivo enviando la confirmación nuevamente al SCP.



Figura 4-6 – Activación de Grupo de Control Principal

Las indicaciones del estado del grupo de control principal se muestran en la pantalla principal como se indica a continuación:

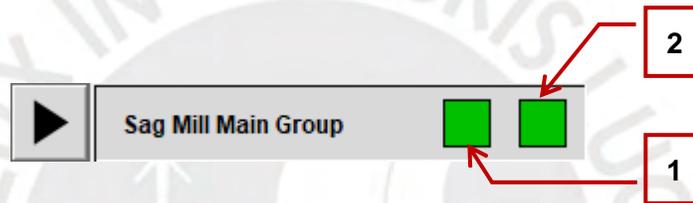


Figura 4-7 – Indicadores de Grupo de Control Principal

**1. Enclavamiento de Grupo de Control**

- Grupo de Control listo para arrancar
- Grupo de Control no listo

**2. Estado de Grupo de Control**

- Grupo de Control activado
- Grupo de Control no activado

**4.3.2 Activación de Grupos de Control Secundarios**

La activación del grupo de control secundario se realiza desde el sistema experto PXP; sus requisitos de activación, igual que un grupo principal, son los siguientes:

- Watchdog de comunicación entre SCP y SCA activado
- Grupo de Control listo para arrancar – Considerando los siguientes enclavamientos
  - Molino de Control Principal activado.
  - Peso de Molino dentro del rango de límites normales.
- Comando de activación desde Sistema de Control Avanzado.

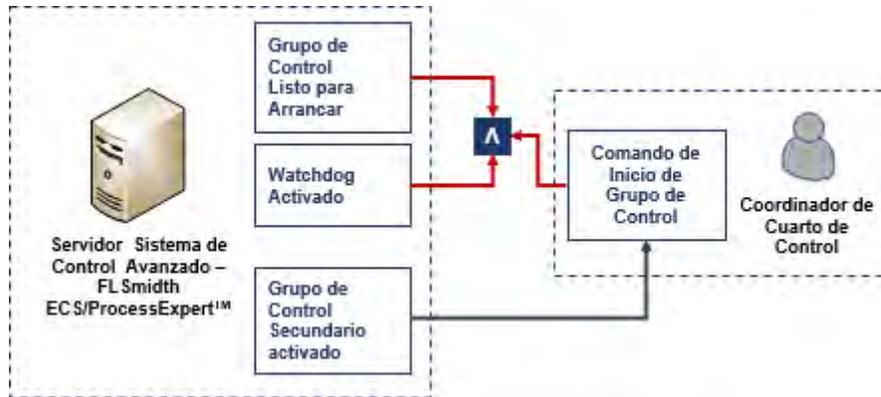


Figura 4-8 – Activación de Grupo de Control Secundario

Al activar el grupo de control secundario, se activará el controlador respectivo y las indicaciones serán como se muestra a continuación.



Figura 4-9 – Indicadores de Grupo de Control Principal

**1. Activación de Grupo de Control**

- Comando activado
- Comando no activado

**2. Enclavamiento de Grupo de Control**

- Grupo listo para arrancar
- Grupo de Control no listo

**3. Estado Activo de Grupo de Control**

- Grupo de Control activado
- Grupo de Control no activado

**4.4 Definición de Árbol de Decisión**

Cada grupo de control contará con su propio árbol de decisión (primario o secundario respectivamente), cada uno contará con su propia lógica como es descrita a continuación.

**4.4.1 Definición de Lógica de Decisión de Nodos Primarios**

El árbol de decisión del grupo de control principal tiene la siguiente lógica de control.

- **¿Sag Mill encendido?**
  - Si: Evalúa sgte. condición
  - No: Controlador Fallback
- **¿Alto Peso en Molino?**
  - Si: Controlador Alto Peso
  - No: Evalúa sgte. condición
- **¿Alta Potencia en Molino?**
  - Si: Controlador Alta Potencia
  - No: Evalúa sgte. condición
- **¿Altos Impactos Críticos?**
  - Si: Controlador de Altos IC
  - No: Controlador Normal

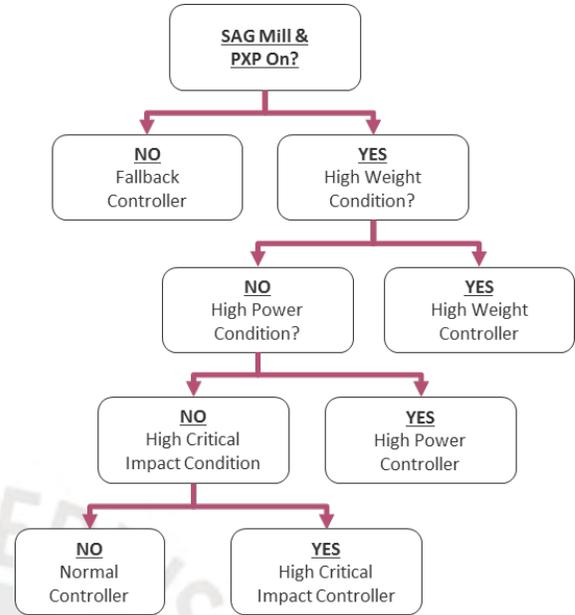


Figura 4-10 – Árbol de Decisión de Grupo de Control Principal

Cada bloque del árbol de decisión puede contener una condición Verdadera o Falsa, siguiendo la ruta izquierda si la pregunta es Falsa y la derecha si es Verdadera, o un controlador específico.

El funcionamiento de cada controlador se considerará en el punto 4.5.2.

#### 4.4.2 Definición de Lógica de Decisión para Nodos Secundarios

- **¿Sag Mill y SCA encendido?**
  - Si: Controlador Adaptativo de Target de Peso activado
  - No: Controlador Fallback activado



Figura 4-11 – Árbol de Decisión de Grupo de Control Principal

### 4.5 Definición de Controladores MPC

El control predictivo basado en modelo o MPC por sus siglas en inglés es una técnica avanzada de control frecuentemente utilizado en el sector industrial que hace uso de

modelos matemáticos de proceso para predecir las salidas futuras de la planta y basadas en ellas se busca estabilizar y optimizar las acciones de control futuras.

Este tipo de estrategia aborda en conjunto distintas técnicas de control como control óptimo y el control de procesos con tiempos muertos y multivariables, en la librería se tienen los siguientes tipos de controladores MPC (A.Bemporad, 2020).

- Diseño de MPC Adaptativo - Control adaptativo de la planta no lineal mediante la actualización del modelo interno durante ejecución de controlador.
- Diseño de MPC explícito - Control predictivo de modelo rápido utilizando soluciones pre calculadas optimizando el tiempo de ejecución.
- Diseño de MPC programado por ganancia – Control de ganancia programada de plantas no lineales mediante cambio de controladores durante ejecución.
- Diseño de MPC no lineal – Diseño de controladores predictivos de modelos con modelos de predicción no lineal y uso de función de costos y restricciones.

Para la presente tesis se utilizará el diseño de MPC no lineal al tener varios sistemas no lineales, se requerirá de un controlador que pueda linealizar y estabilizar cada variable medible en rangos definidos o restricciones (Roux, R.Padhi, & K.Craig, 2014, pág. 7).

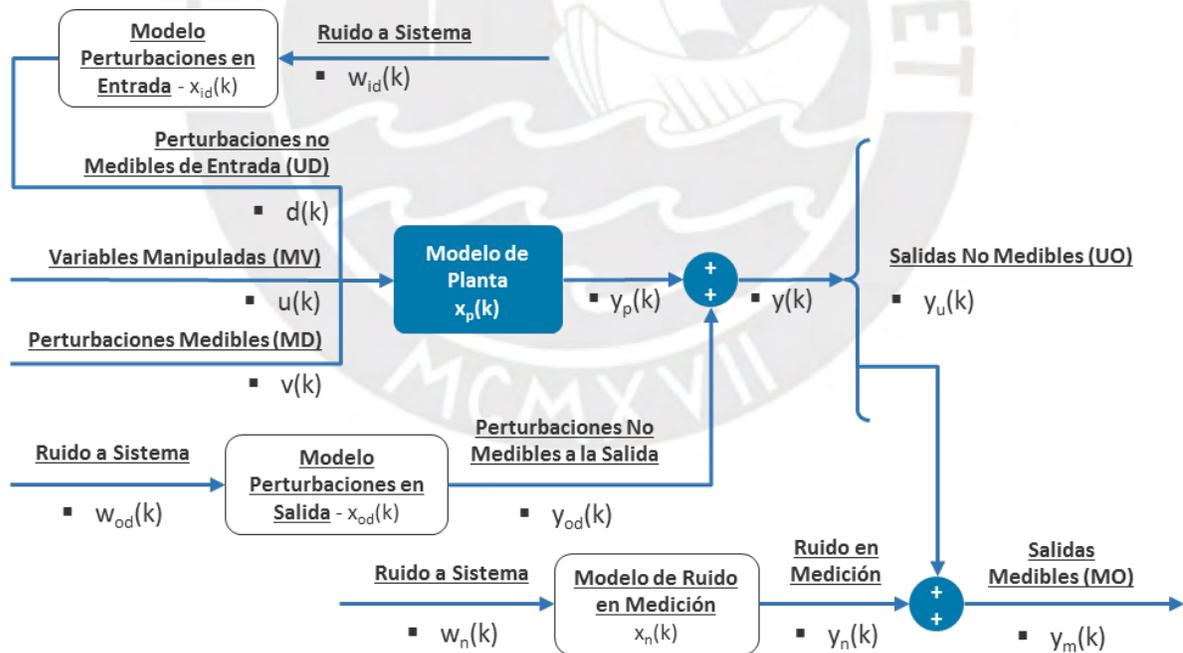


Figura 4-12 – Diagrama de Bloques de Modelo de Planta para Controlador MPC<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Rivas, Sotomayor, Pérez, & Soto, 2019)

#### 4.5.1 Estructura de Controladores MPC

Para el seguimiento del funcionamiento de cada controlador MPC se deben considerar los siguientes parámetros (Rivas-Perez, 2016; Rivas-Perez, 2017; Rivas-Perez 2019; Loayza, 2019; Bemporad, 2020):

- $T_s$  – Tiempo de Muestreo
- $p$  – Horizonte de Predicción, cantidad de iteraciones que el controlador MPC debe seguir para evaluar por predicción de cada salida medible y sus valores de referencia optimizando las variables manipuladas respectivas.
- $m$  – Horizonte de Control, cantidad de acciones (1 por cada iteración) a realizar en las variables manipuladas a optimizar según las referencias a seguir de cada salida medible disponible.
- $k$  – Intervalo de Control según horizonte de predicción y tiempo de muestreo.
- $x(k|k)$  – Estado de Controlador estimado.
- $(k)$  – Perturbaciones de Entrada Medibles.
- $(k + i|k)$  – Predicción de Perturbaciones de Entrada Medibles.
- $A; B_u; B_v; C; D_v$  – Constantes de Observador de Estados
- $z_k$  – Constantes de Observador de Estados

##### 4.5.1.1 Vectores de Bloques de Control

###### a. Variables de Controlador de Estado

Las variables consideradas se encuentran en el modelo de la Figura 4-12.

Donde el vector de estado de modelo  $x_c(k)$  está compuesto por los siguientes

$$\text{vectores: } x_c^T(k) = [x_p^T(k) \quad x_{id}^T(k) \quad x_{od}^T(k) \quad x_n^T(k)] \quad (4-1)$$

- $[x_p(k)]_{px1}$  = Vector de estado de modelo de planta.
- $[x_{id}(k)]_{idx1}$  = Vector de estado de modelo de perturbaciones de entrada.
- $[x_{od}(k)]_{odx1}$  = Vector de estado de modelo de perturbaciones de salida.
- $[x_n(k)]_{nx1}$  = Vector de estado de modelo de ruido en mediciones.

Donde el vector de ingreso al modelo  $u_g(k)$  está compuesto por los siguientes

$$\text{vectores: } u_g^T(k) = [u^T(k) \quad v^T(k) \quad w_{id}^T(k) \quad w_{od}^T(k) \quad w_n^T(k)] \quad (4-2)$$

- $[u(k)]_{ux1}$  = Vector de ingreso de variables manipuladas a modelo de planta.
- $[v(k)]_{vx1}$  = Vector de ingreso de perturbaciones medibles a modelo de planta.
- $[w_{id}(k)]_{idx1}$  = Vector de ingreso de modelo de perturbaciones de entrada.
- $[w_{od}(k)]_{odx1}$  = Vector de ingreso de modelo de perturbaciones de salida.

- o  $[w_n(k)]_{n \times 1}$  = Vector de ingreso de modelo de ruido en mediciones.

b. Observador de Estado

El observador de estado tiene la siguiente estructura:

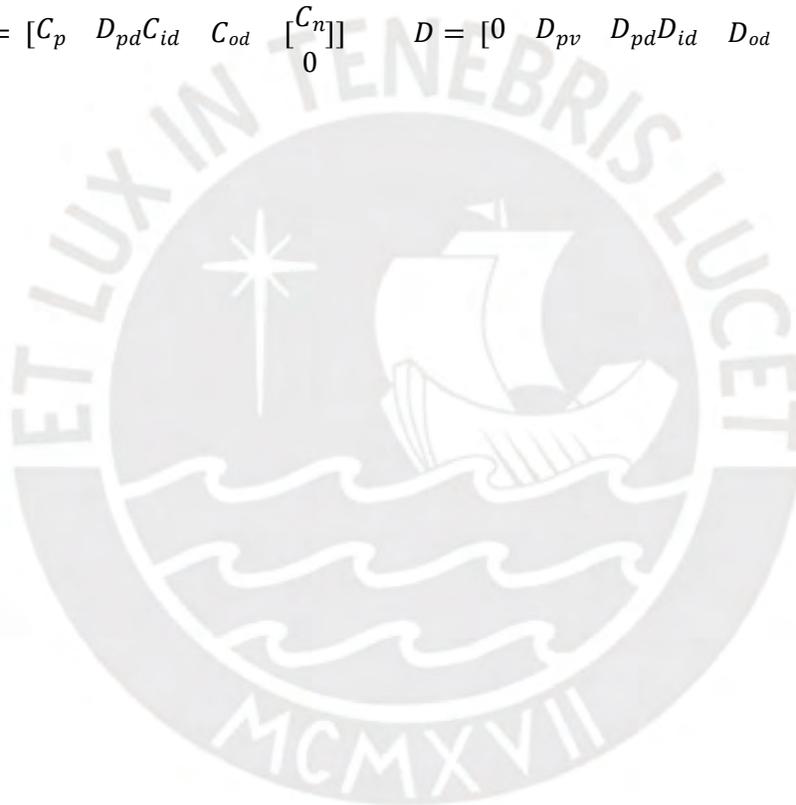
$$x(k+1) = Ax_c(k) + Bu_o(k) \quad (4-3)$$

$$y(k) = Cx_c(k) + Du_o(k)$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} A_p & B_{pd}C_{id} & 0 & 0 \\ 0 & A_{id} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{od} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_n \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_{pu} & B_{pv} & B_{pd}D_{id} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{id} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{od} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_n \end{bmatrix}$$

$$C = [C_p \quad D_{pd}C_{id} \quad C_{od} \quad \begin{bmatrix} C_n \\ 0 \end{bmatrix}] \quad D = [0 \quad D_{pv} \quad D_{pd}D_{id} \quad D_{od} \quad \begin{bmatrix} D_n \\ 0 \end{bmatrix}]$$



#### 4.5.1.2 Seguimiento de Iteraciones para Estimación y Predicción de Estados

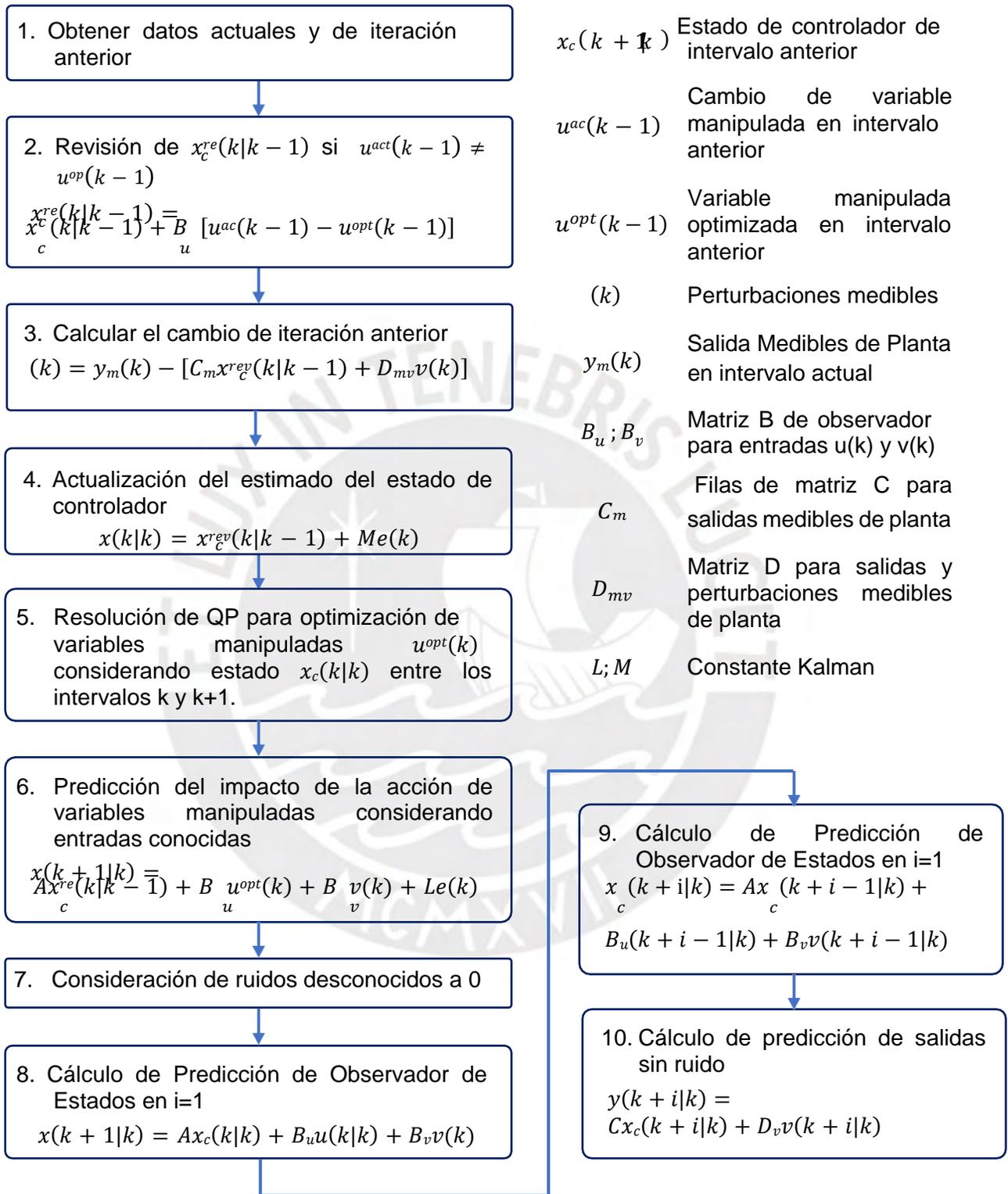


Figura 4-13 – Seguimiento de Iteración de Estados de Controlador MPC

#### 4.5.1.3 Optimización de Controlador – Matriz QP

##### a. Función Objetivo

La función objetivo es la suma de 4 términos, cada uno basado en un aspecto del controlador donde  $z_k$  es la decisión calculada de la matriz QP junto con el peso sintonizable de cada objetivo.

$$J(z_k) = J_y(z_k) + J_u(z_k) + J_{\Delta u}(z_k) + J_\varepsilon(z_k) \quad (4-4)$$

Donde:

$$z_k^T = [(k|k)^T \ u(k+1|k)^T \ \dots \ u(k+p-1|k)^T \ \varepsilon_k]$$

- Seguimiento a Variable de Referencia

$$J_y(z_k) = \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^p \left\{ \frac{w_j^y}{s_j^y} [r_j(k+i|k) - y_j(k+i|k)] \right\}^2 \quad (4-5)$$

Donde

$n_y$  – Número de Variables de Salida de Planta

$y_j(k+i|k)$  – Valor de predicción de la salida de planta  $j$  en la iteración  $i$  del horizonte de predicción.

$r_j(k+i|k)$  – Valor de referencia de la salida de planta  $j$  en la iteración  $i$  del horizonte de predicción.

$s_j^y$  – Factor de escalamiento para la salida de planta  $j$ .

$w_j^y$  – Parámetro de sintonización para el valor de predicción de la salida de planta  $j$  en la iteración  $i$  del horizonte de predicción.

- Seguimiento de Variables Manipuladas

$$J_u(z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \left\{ \frac{w_j^u}{s_j^u} [u_j(k+i|k) - u_{j,target}(k+i|k)] \right\}^2 \quad (4-6)$$

$n_u$  – Número de Variables Manipuladas de Planta

$u_{j,target}(k+i|k)$  – Objetivo de la variable manipulada  $j$  en la iteración  $i$  del horizonte de predicción.

$s_j^u$  – Factor de escalamiento para variable manipulada  $j$ .

$w_j^u$  – Parámetro de sintonización para la variable manipulada  $j$  en la iteración  $i$  del horizonte de predicción.

- Supresión de Acción sobre Variable Manipulada

$$J_{\Delta u}(z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \left\{ \frac{w_j^{\Delta u}}{s_j^u} [u_j(k+i|k) - u_{j,target}(k+i|k)] \right\}^2 \quad (4-7)$$

$n_u$  – Número de Variables Manipuladas de Planta

$u_{j,target}(k+i|k)$  – Objetivo de la variable manipulada  $j$  en la iteración  $i$  del horizonte de predicción.

$s_j^y$  – Factor de escalamiento para variable manipulada  $j$ .

$w_j^{\Delta u}$  – Parámetro de sintonización para la acción de la variable manipulada  $j$  en la iteración  $i$  del horizonte de predicción.

- Violación de Restricciones

$$J_{\varepsilon}(z_k) = \rho_{\varepsilon} \varepsilon_k^2 \quad (4-8)$$

$\varepsilon_k$  – Variable de holgura en el intervalo de control  $k$ .

$\rho_{\varepsilon}$  – Peso de penalidad sobre la violación de restricción.

#### b. Manejo de Restricciones

A su vez, las restricciones se aplican sobre cada variable manipulada, así como su acción, y cada salida medible como se describe a continuación.

$$\frac{y_{i,in}(i)}{s_j^y} - \varepsilon V_{k,j,min}^y (i) \leq \frac{y_j(k+i|k)}{s_j^y} \leq \frac{y_{i,max}(i)}{s_j^y} + \varepsilon V_{k,j,max}^y (i); i = 1:p, j = 1:n_y$$

$$\frac{u_{j,in}(i)}{s_j^u} - \varepsilon V_{k,j,min}^u (i) \leq \frac{u_j(k+i|k)}{s_j^u} \leq \frac{u_{j,max}(i)}{s_j^u} + \varepsilon V_{k,j,max}^u (i); i = 1:p, j = 1:n_u$$

$$\frac{\Delta u_{j,in}(i)}{s_j^u} - \varepsilon V_{k,j,min}^{\Delta u} (i) \leq \frac{\Delta u_j(k+i|k)}{s_j^u} \leq \frac{\Delta u_{j,max}(i)}{s_j^u} + \varepsilon V_{k,j,max}^{\Delta u} (i); i = 1:p, j = 1:n_u$$

Por método de sintonización las restricciones suavizadas sobre las manipuladas y su respectiva acción serán igualadas a 0 dejando solamente las restricciones estrictas dejando las ecuaciones de la siguiente forma

$$\frac{y_{i,in}(i)}{s_j^y} - \varepsilon V_{k,j,min}^y (i) \leq \frac{y_j(k+i|k)}{s_j^y} \leq \frac{y_{i,max}(i)}{s_j^y} + \varepsilon V_{k,j,max}^y (i); i = 1:p, j = 1:n_y$$

$$\frac{u_{j,in}(i)}{s_j^u} \leq \frac{u_j(k+i|k)}{s_j^u} \leq \frac{u_{j,max}(i)}{s_j^u} (i); i = 1:p, j = 1:n_u$$

$$\frac{\Delta u_{j,in}(i)}{s_j^u} \leq \frac{\Delta u_j(k+i|k)}{s_j^u} \leq \frac{\Delta u_{j,max}(i)}{s_j^u}; i = 1:p, j = 1:n_u$$

Donde:

$\varepsilon_k$  – Factor de holgura para las restricciones suaves.

$y_{j,ax}(i), y_{j,min}(i)$  – Límites bajos y altos para la salida de planta j en la iteración i del horizonte de predicción.

$u_{j,ax}(i), u_{j,min}(i)$  – Límites bajos y altos la variable manipulada j en la iteración i del horizonte de predicción.

$\Delta u_{j,ax}(i), \Delta u_{j,min}(i)$  – Límites bajos y altos la acción de cada variable manipulada j en la iteración i del horizonte de predicción.

### c. Definición y Solución de Matriz QP

Para el proceso de resolución de optimización según Programación Cuadrática (QP) se definirá las matrices de predicción y posteriormente su resolución óptima.

#### ▪ Definición de Matrices de Predicción

Asumiendo que las perturbaciones definidas son solamente ganancias, es decir que  $n_d(k) = n_d(k)$  se asume como ruido, el modelo de predicción será:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax_c(k) + B_u u(k) + B_v v(k) + B_d n_d(k) \\ y(k) &= Cx_c(k) + D_v v(k) + D_d n_d(k) \end{aligned} \quad (4-9)$$

Donde:

$$x \leftarrow \begin{matrix} x \\ x_d \end{matrix}; A \leftarrow \begin{bmatrix} A & B_d G \\ 0 & \bar{A} \end{bmatrix}; B \leftarrow \begin{bmatrix} B_u \\ 0 \end{bmatrix}; B \leftarrow \begin{bmatrix} B_v \\ 0 \end{bmatrix}; B \leftarrow \begin{bmatrix} B_d D \\ 0 \end{bmatrix}; B \leftarrow \begin{bmatrix} C & D & G \\ & d & \bar{B} \end{bmatrix}$$

Calculando la predicción de las trayectorias futuras desde el tiempo  $k = 0$  se asume que  $n(i) = 0$  para cada i se obtiene:

$$y(i|0) = C \left[ A^i x(0) + \sum_{h=0}^{i-1} A^{i-1-h} (B_u (u(-1) + \sum_{j=0}^h \Delta u(j)) + B_v v(h)) \right] + D_v v(i) \quad (4-10)$$

Dando la siguiente solución

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(p) \end{bmatrix} = S_x x(0) + S_{u1} u(-1) + S_u \begin{bmatrix} \Delta u(0) \\ \vdots \\ \Delta u(p-1) \end{bmatrix} + H_v \begin{bmatrix} v(0) \\ \vdots \\ v(p) \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Donde:

$$S_x = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^p \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{pny \times nx} \quad (4-12)$$

$$S_{u1} = \begin{bmatrix} CB_u \\ CB_u + CAB_u \\ \vdots \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{pn \times n_u} \quad (4-13)$$

$$S_u = \begin{bmatrix} \sum_{h=0}^{p-1} CA^h B_u \\ CB_u & 0 & \dots & 0 \\ CB_u + CAB_u & CB_u & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{pn_y \times n_u} \quad (4-14)$$

$$H_v = \begin{bmatrix} \sum_{h=0}^{p-1} CA^h B_u & \sum_{h=0}^{p-1} CA^h B_u & \dots & CB_u \\ CB_v & D_v & 0 & \dots & 0 \\ CAB_v & CB_u & D_v & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{p-1} B_v & CA^{p-2} B_v & CA^{p-3} B_v & \dots & D_v \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{pn_y \times (p+1)n_v} \quad (4-15)$$

Y siendo sus variables de optimización

$$\begin{bmatrix} \Delta u(0) \\ \vdots \\ \Delta u(p-1) \end{bmatrix} = J_M \begin{bmatrix} z_0 \\ \vdots \\ z_{m-1} \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

▪ Resolución a QP

Este solucionador convierte un problema de optimización MPC lineal a la forma general de un problema de programación cuadrática (QP).

$\text{Min}_{x^2} (x^T H x + f^T x)$  sujeto a las desigualdades de restricción lineal  $Ax \leq b$ ,

donde:

$x$  – Es el vector de solución.

$H$  – Es la matriz Hessiana calculada según los modelos y parámetros de sintonización ingresados.

$A$  – Es una matriz lineal que considera los coeficientes de restricción ingresados.

$b; f$  – Son vectores.

## 4.5.2 Configuración de Controladores MPC

### 4.5.2.1 Controlador Fallback

Este controlador se activa cuando el SCA se encuentra apagado de forma que realiza el seguimiento a los set-points manuales ingresados por el operador desde el SCP, dado esto, al encender el SCA no se producirá ningún salto en el proceso.

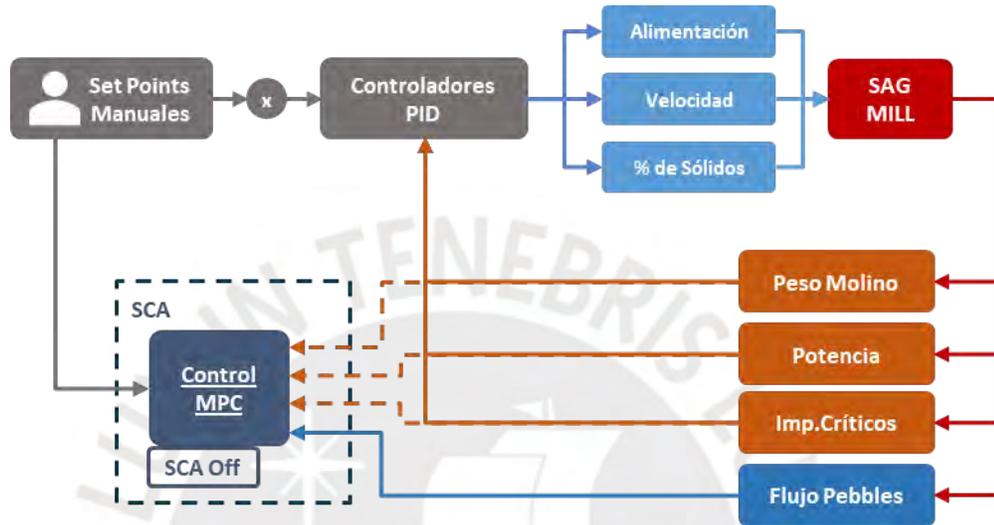


Figura 4-14 – Bloques de Control de Controlador Fallback

### 4.5.2.2 Controlador Normal

Controlador por ejecutar cuando las condiciones en el molino se encuentran en sus rangos normales, los objetivos de este controlador son los siguientes (Forbes & Gough, 2009):

- Maximizar la velocidad del molino, optimizar la alimentación del mineral mejorando el flujo de salida y procurando minimizar los rechazos.
- Mantener los impactos críticos lo más cercano posible a su objetivo cuidando de los liners del molino y asegurando una buena molienda.
- Mantener el peso del molino en su objetivo controlando la alimentación y asumiendo la alimentación de Pebbles como perturbación del sistema.
- Utilizar el % de sólidos como restricción de control

El control MPC configurado se da considerando la siguiente matriz de desarrollo.

		Alimentación	Velocidad	% de Sólidos	Flujo Pebbles
		Actuador	Actuador	Actuador	Perturbación
Medición	Sag Mill - Peso	X		X	X
Medición	Sag Mill - Potencia	X			
Medición	Sag Mill - Imp.Críticos		X		

Tabla 4-1 – Matriz de Mediciones/Actuadores de Controlador Normal

Los bloques de control de este controlador son los siguientes (Garrido & Sbarbaro, 2009, pág. 39):

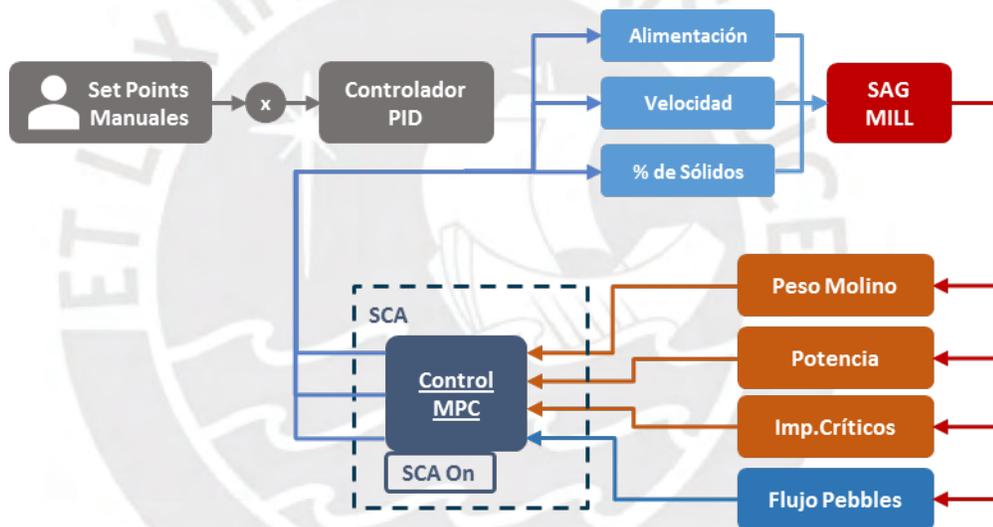


Figura 4-15 – Bloques de Control de Controlador Normal

En base a los componentes definidos para el controlador y su estructura definida en la Figura 4-7 la estructura de este controlador sería como se indica en la Figura 4-16

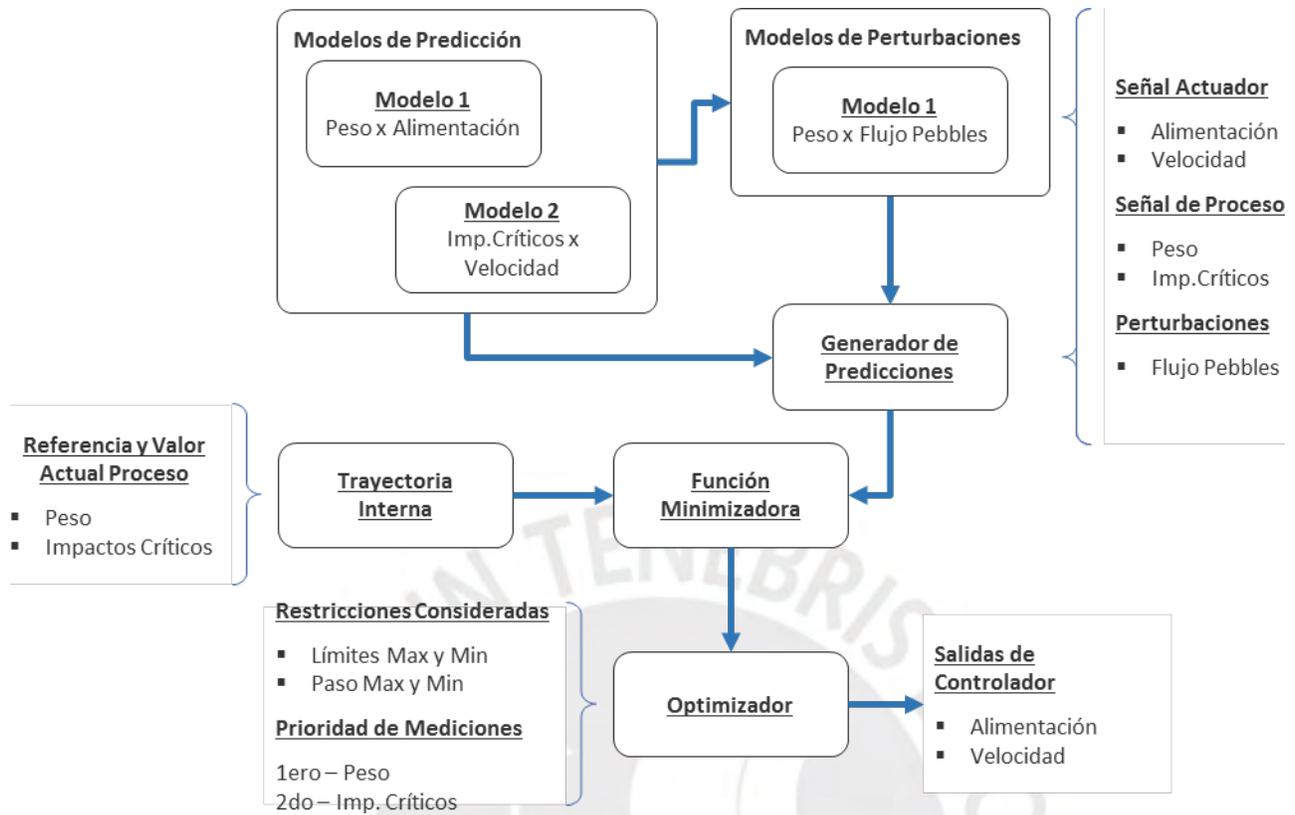


Figura 4-16 – Componentes de Controlador Normal

#### 4.5.2.3 Controlador de Alto Peso

Según su posición en el árbol de decisión, el alto peso en el molino será la mayor prioridad antes que cualquier otra condición anormal, su vista una vez activada será:



Figura 4-17 – Condición de Alto Peso desde Árbol de Decisión

La función principal de este controlador será reducir el peso hasta su función objetivo de manera prioritaria y agresiva, su condición de activación tendrá 2 niveles:

- Si el peso del molino es mayor al límite alto por una cantidad de tiempo, ambos configurables, el molino entrará en condición del alto peso donde su función principal será reducirlo hasta su función objetivo.
- Si el peso del molino es mayor al límite muy alto, también configurable, el molino entrará inmediatamente en condición del alto peso donde cumplirá la misma función.
- La condición regresará a su normalidad una vez que el peso del molino se encuentre bajo su límite alto por una cantidad de tiempo.

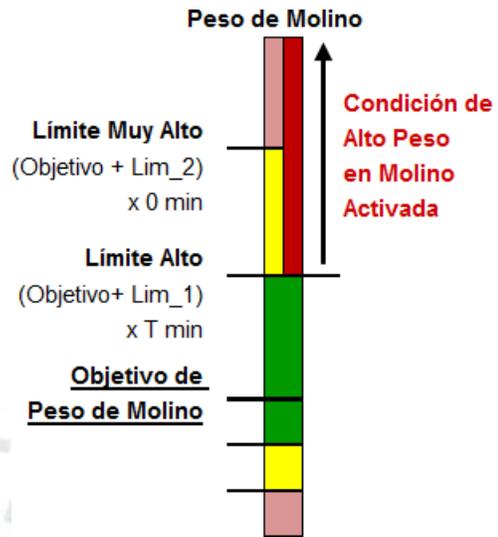


Figura 4-18 – Condición de Alto Peso

Los objetivos principales del controlador:

- Según la diferencia del peso actual y su objetivo, la velocidad del molino se maximizará hasta su valor máximo.
- Se reducirá la alimentación drásticamente previniendo que el peso se reduzca evitando una parada de emergencia.
- Dado su objetivo principal, la potencia será considerada como una medición secundaria e ignorará la medición de impactos críticos.

Los bloques de control de este controlador son los siguientes (Garrido & Sbarbaro, 2009, pág. 39):

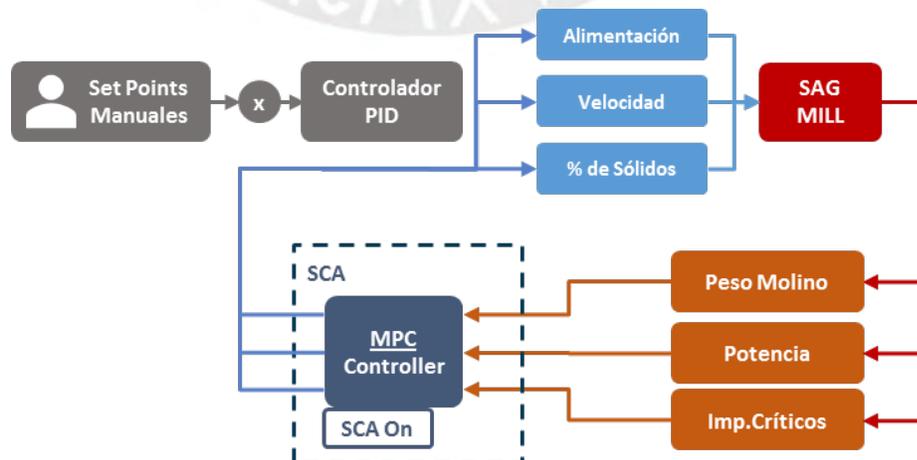


Figura 4-19 – Bloques de Control de Controlador de Alto Peso

El control MPC configurado se da considerando la siguiente matriz de desarrollo.

		Alimentación	Velocidad
		Actuador	Actuador
Medición	Sag Mill - Peso	X	X
Medición	Sag Mill - Potencia		X

Tabla 4-2 – Matriz de Mediciones/Actuadores de Controlador de Alto Peso

En base a los componentes definidos para el controlador y su estructura definida en la Figura 4-7 la estructura de este controlador sería como se indica en la Figura 4-20.

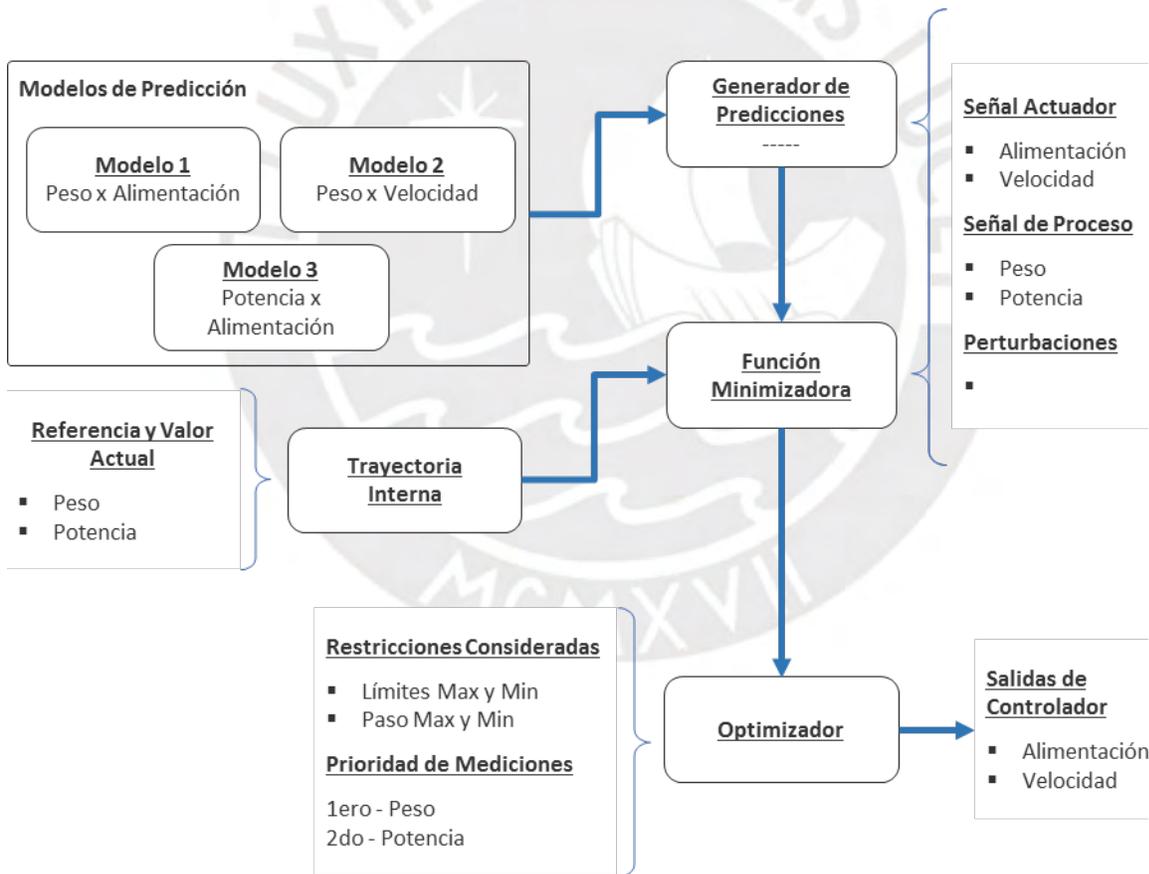


Figura 4-20 – Componentes de Controlador de Alto Peso

#### 4.5.2.4 Controlador de Alta Potencia

Según su posición en el árbol de decisión, la condición de alta potencia en el molino será la segunda prioridad luego de alto peso, su vista una vez activada será:



Figura 4-21 – Condición de Alto Potencia desde Árbol de Decisión

La función principal de este controlador será reducir la potencia hasta su función objetivo de manera agresiva, su condición de activación tendrá 2 niveles:

- Si la potencia del molino es mayor al límite alto por una cantidad de tiempo, ambos configurables, el molino entrará en condición del alto potencia.
- Si la potencia del molino es mayor al límite muy alto, también configurable, el molino entrará inmediatamente en esta condición.
- La condición regresará a su normalidad una vez que la potencia del molino se encuentre bajo su límite alto por una cantidad configurable de tiempo.

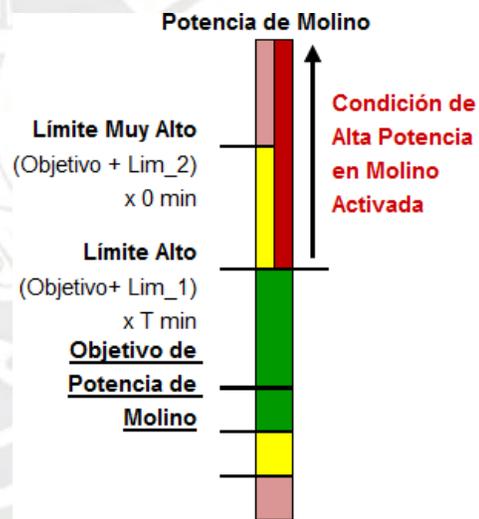


Figura 4-22 – Condición de Alta Potencia

Los objetivos principales del controlador:

- Se reducirá la alimentación drásticamente reduciendo la potencia y evitando una parada de emergencia.
- Mantiene la velocidad el molino en su valor actual, reducirla significaría incrementar el peso aumentando la potencia e incrementarla incrementaría la potencia hasta reducir el peso.

- La potencia será considerada como la medición principal e ignorará la medición de impactos críticos.

Los bloques de control de este controlador son los siguientes (Garrido & Sbarbaro, 2009, pág. 39):



Figura 4-23 – Bloques de Control de Controlador de Alta Potencia

El control MPC configurado se da considerando la siguiente matriz de desarrollo.

		Alimentación	Velocidad
		Actuador	Actuador
Medición	Sag Mill - Potencia	X	
Medición	Sag Mill - Peso	X	X

Tabla 4-3 – Matriz de Mediciones/Actuadores de Controlador de Alta Potencia

En base a los componentes definidos para el controlador y su estructura definida en la Figura 4-7 la estructura de este controlador sería como se indica en la Figura 4-24.

#### 4.5.2.5 Controlador de Altos Impactos Críticos

Según su posición en el árbol de decisión, la condición de altos impactos críticos en el molino será la última prioridad luego de esta, se tendrá el controlador normal, su vista una vez activada se muestra en la Figura 4-25.

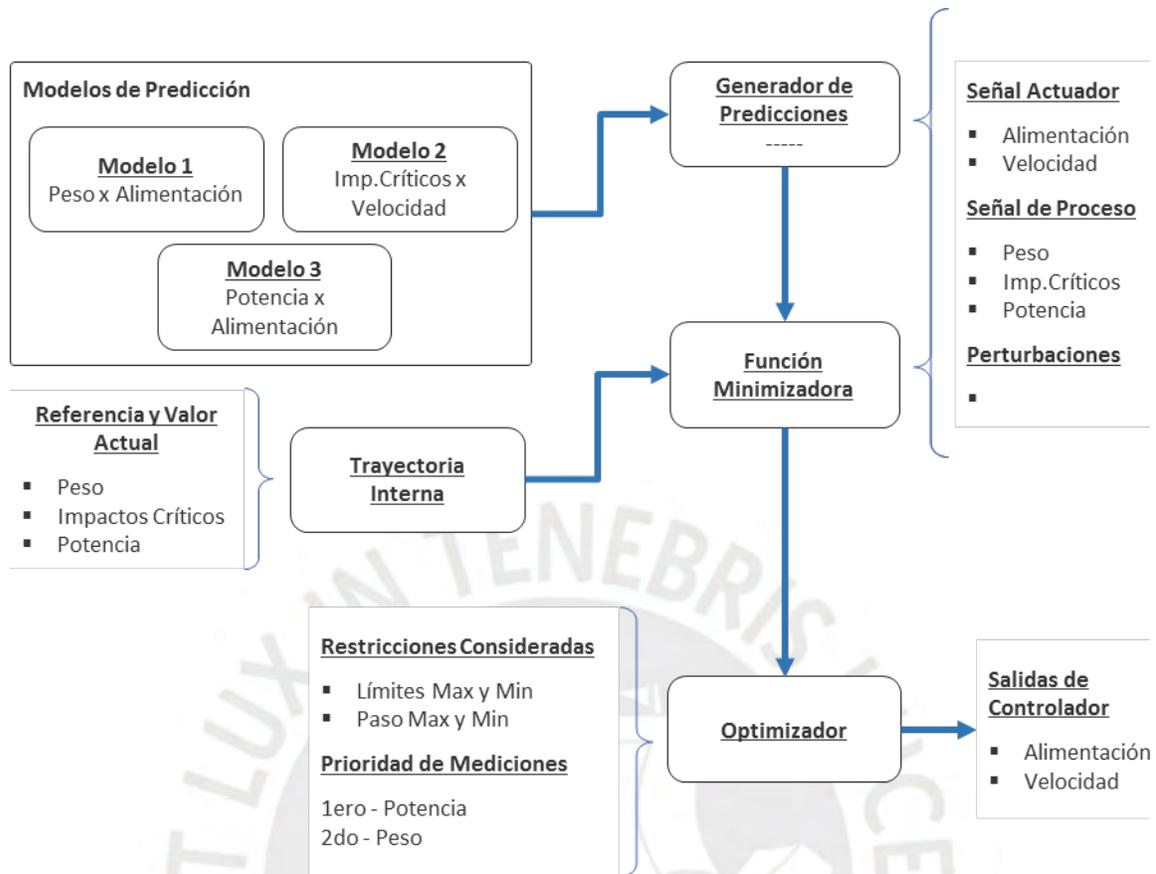


Figura 4-24 – Componentes de Controlador de Alta Potencia



Figura 4-25 – Condición de Alto Potencia desde Árbol de Decisión

La función principal de este controlador será reducir los impactos críticos hasta su función objetivo sin descuidar el peso del molino, su condición de activación tendrá 2 niveles:

- Si los impactos críticos del molino son mayores al límite alto por una cantidad de tiempo, ambos configurables, el molino entrará en condición de altos impactos críticos.
- Si son mayores al límite muy alto, también configurable, el molino entrará inmediatamente en esta condición.
- La condición regresará a su normalidad una vez que los impactos se encuentren bajo su límite alto por una cantidad configurable de tiempo.

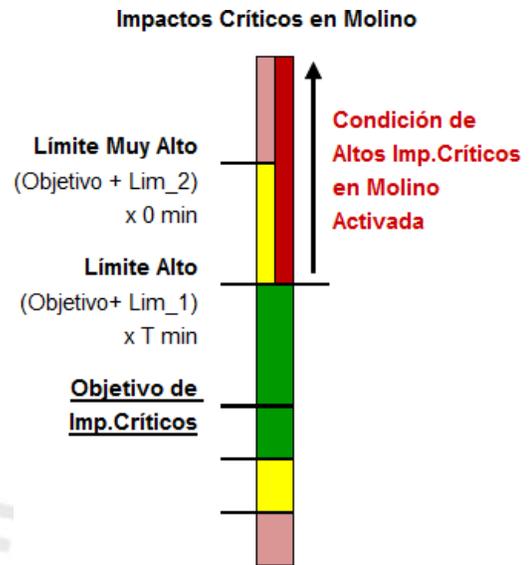


Figura 4-26 – Condición de Alta Potencia

Los objetivos principales del controlador:

- Incrementar la alimentación y reducir la velocidad del molino SAG cuidando que el peso del mismo no se incremente hasta entrar en condición de alto peso.
- Este control se desarrolla principalmente para cuidar los liners del molino y asegurar una buena molienda dentro del molino.

Los bloques de control de este controlador son los siguientes (Garrido & Sbarbaro, 2009, pág. 39):

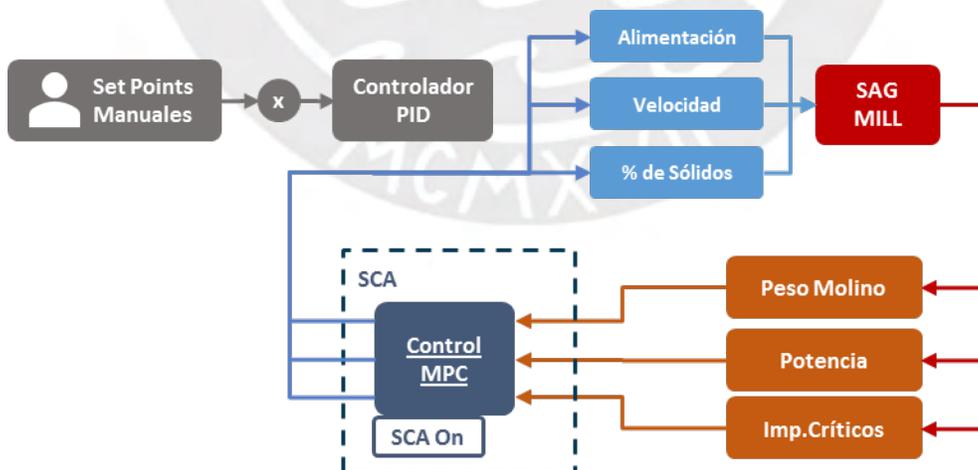


Figura 4-27 – Bloques de Control de Controlador de Altos Impactos Críticos

El control MPC configurado se da considerando la siguiente matriz de desarrollo.

		Alimentación	Velocidad
		Actuador	Actuador
Medición	Sag Mill – Imp.Críticos	X	X
Medición	Sag Mill - Peso	X	

Tabla 4-4 – Matriz Mediciones/Actuadores de Controlador de Altos Imp.Críticos

En base a los componentes definidos para el controlador y su estructura definida en la Figura 4-7 la estructura de este controlador sería como se indica en la Figura 4-28.

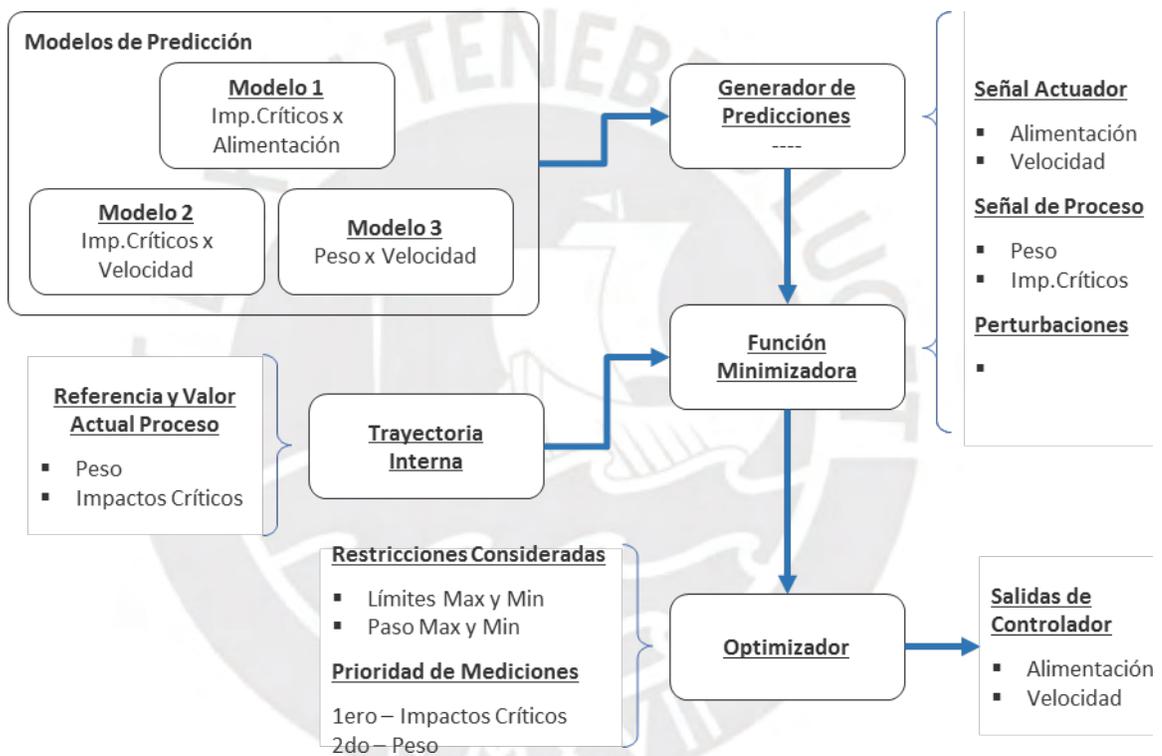


Figura 4-28 – Componentes de Controlador de Altos Impactos Críticos

#### 4.5.3 Sintonización y Resultados de Controladores MPC

Una vez definidos todos los controladores y su función básica dentro del proceso, se definirá la sintonización ideal de cada controlador considerando los siguientes parámetros dados por el controlador MPC no lineal de Matlab (L.Wang, 2009, págs. 333-367).

- Parámetros de Controlador

Parámetros Generales	Parámetros de Mediciones	Parámetros de Actuadores
Horizonte de Control	Peso de Variable	Peso de Variable
Horizonte de Predicción	Límite Superior	Límite Mínimo
Factor de Incremento por violación de límites		Límite Inferior
	Valor de Cambio Máximo	
		Valor de Cambio Mínimo

Tabla 4-5 – Parámetros de Configuración de Controlador MPC

- Parámetros de Modelos

Parámetros Generales	Parámetros de Modelo
Valores nominales de Mediciones	Ganancia de Medición vs Actuador
Valores nominales de Actuadores	Retardo de Medición vs Actuador
	Constante de tiempo de Medición vs Actuador

Tabla 4-6 – Parámetros de Configuración de Modelos en Controlador MPC

#### 4.5.3.1 Sintonización de Controlador MPC

Una vez definidos los parámetros se proceder a sintonizar el controlador en el siguiente orden.

- Definición de modelos en base a evaluación de tendencias y pruebas escalón sobre cada actuador.
- Evaluación de parámetros de ratio de cambio y peso de cambio de cada actuador en base a la función de su controlador.
- Evaluación de error de predicción por cada medición y sintonización de parámetros de peso según función de cada controlador.
- Prueba en línea de cada controlador y ajuste fino de parámetros previamente definidos buscando la reducción del error y tiempo de ajuste de cada medición.

Luego de realizar estas pruebas, los parámetros definidos de los controladores MPC son los siguientes:

▪ Parámetros de Controlador

<b>Controller Horizon</b>	40
<b>Prediction Horizon</b>	80

<b>Mediciones</b>	<b>Delta Lower</b>	<b>Delta Upper</b>	<b>Weight</b>
<b>Peso de Molino</b>	45	45	37.75
<b>Potencia</b>	1.15	1.15	0.0005
<b>Impactos Críticos</b>	20	20	17.75

<b>Actuators</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Rate Min</b>	<b>Rate Max</b>	<b>Rate Weight</b>	<b>Type</b>
<b>Alimentación</b>	3000	3200	-75	75	0.105	Manipulada
<b>Velocidad</b>	7.7	9.3	-0.05	0.05	0.255	Manipulada
<b>Flujo de Pebbles</b>						Perturbación

▪ Parámetros de Modelos

	<b>Mediciones</b>	<b>Valor Nominal</b>
<b>1</b>	<b>Peso de Molino</b>	3000
<b>2</b>	<b>Potencia</b>	22.5
<b>3</b>	<b>Impactos Críticos</b>	30

	<b>Actuadores</b>	<b>Valor Nominal</b>
<b>1</b>	<b>Alimentación</b>	3350
<b>2</b>	<b>Velocidad</b>	9
<b>4</b>	<b>Flujo de Pebbles</b>	400

		<b>Alimentación</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Flujo de Pebbles</b>
<b>Peso de Molino</b>	<b>Ganancia</b>	0.45	-60	0.33
	<b>Retardo</b>	0.8	1.1	1.1
	<b>Cte. De Tiempo</b>	2.1	1.65	2.1
<b>Potencia</b>	<b>Ganancia</b>	0.00012	0	0
	<b>Retardo</b>	1.3	0	0
	<b>Cte. De Tiempo</b>	8	0	0
<b>Impactos Críticos</b>	<b>Ganancia</b>	0	122	0
	<b>Retardo</b>	0	1.5	0
	<b>Cte. De Tiempo</b>	0	4.8	0

Tabla 4-7 – Parámetros de Controlador MPC

4.5.3.2 Resultados de Respuesta de Controlador MPC

La variable principal por controlar, como ha sido explicado anteriormente, es el peso del molino SAG y la variable de impactos críticos será utilizado como variables de optimización para el proceso.

- Predicción de Controlador MPC de Molino SAG

La ejecución del controlador MPC y la validación de la configuración de los parámetros de controlador y modelo se muestran en las siguientes figuras.

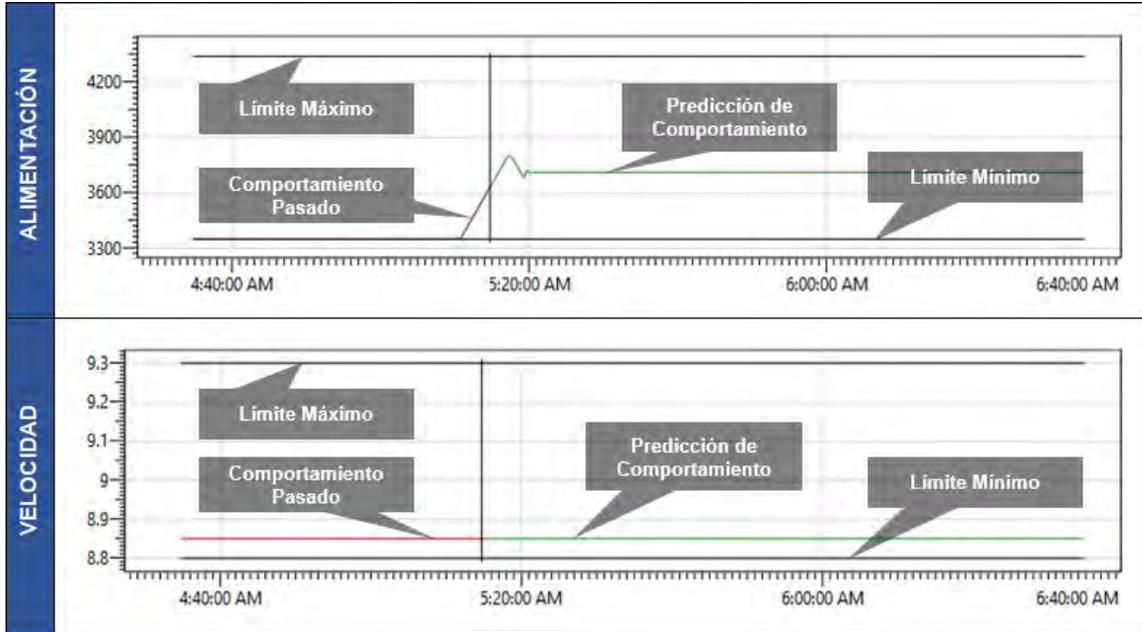


Figura 4-29 – Predicción de Controlador MPC de Actuadores

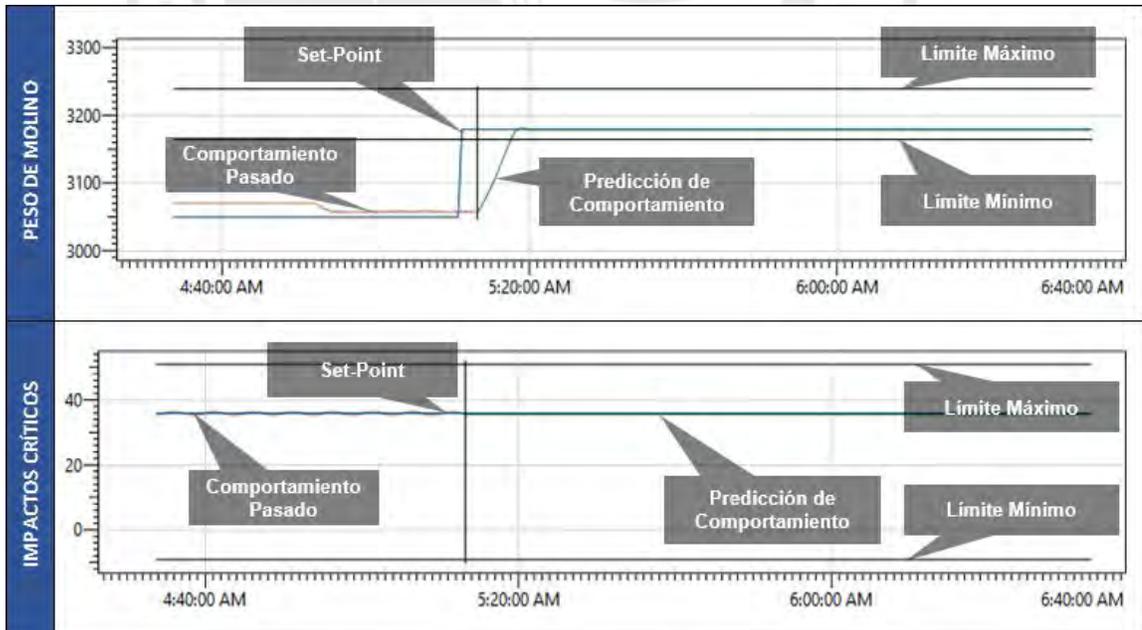


Figura 4-30 – Predicción de Controlador MPC de Mediciones

- Respuesta de Controlador MPC para Control de Peso de Molino

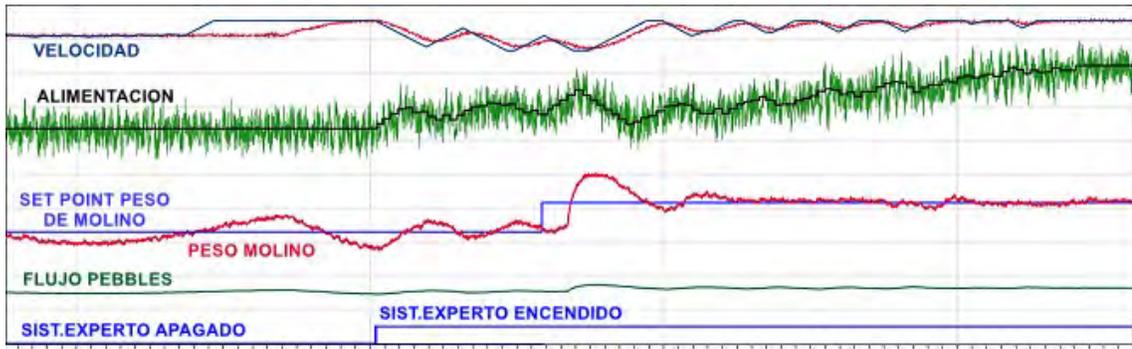


Figura 4-31 – Ejecución de Controlador MPC

Como muestra la Figura 4-31, cuando el sistema se encuentra operando en modo manual, el peso del molino presenta oscilaciones constantes con valores de error entre el 11 y el 8%, cuando el sistema experto es encendido y considerando un set point inicial de peso de molino de 3090 toneladas de peso el proceso se estabiliza ajustando la alimentación y la velocidad del molino, seguidamente se incrementa el set point a 3150 toneladas teniendo los siguientes parámetros de respuesta.

Set Point de Peso Molino SAG		Especificaciones de Respuesta		
Valor Inicial	3090 ton	Tiempo de Crecimiento	Tr	0:00:56
Valor Final	3150 ton	Tiempo Pico	Tp	0:03:32
		Sobreimpulso Máximo	Mp	3.61%
		Tiempo de Establecimiento (2% de error)	Tes	0:08:58

Tabla 4-8 – Especificación de Respuesta de Controlador MPC

Como se aprecia, el control manual no cuenta con la capacidad de mantener el peso del molino estable, su control es en base a evitar evento de alto peso en el molino y mejorar la alimentación a lo máximo posible, con el control experto encendido se estabiliza el peso del molino a un error menor al 2% y permite incrementar su set point incrementando alimentación y controlando la velocidad, mejorando el desempeño del proceso.

- Respuesta de Controlador MPC ante Perturbaciones al proceso.

La perturbación considerada para el proceso es el flujo de Pebbles, esta variable es eventual de acuerdo con el criterio del operador, pero aporta un flujo de mineral importante que debe ser considerado para el control del peso del molino SAG.

Para su validación, se han considerado 2 escenarios, ambos con el sistema experto encendido, el primer escenario, en la Figura 4-32, donde el controlador MPC no considera la perturbación de flujo de Pebbles y el segundo escenario tomándola en consideración mostrado en la Figura 4-33.

La comparación entre ambos escenarios se muestra a continuación, mostrando primero los resultados obtenidos con el sistema experto encendido sin considerar ninguna perturbación.

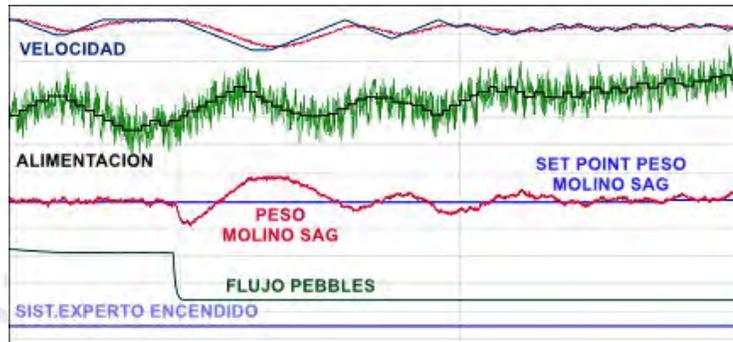


Figura 4-32 – Control de Peso de Molino SAG sin Perturbación de Pebbles

		Especificaciones de Respuesta		
	<b>Flujo de Pebbles a Molino SAG</b>	<b>Tiempo Pico</b>	<b>Tp</b>	0:05:20
<b>Valor Inicial</b>	≈ 480 ton/h	<b>Sobreimpulso Máximo</b>	<b>Mp</b>	3.35%
<b>Valor Final</b>	0 ton/h	<b>Tiempo de Establecimiento (2% de error)</b>	<b>Tes</b>	0:05:44

Tabla 4-9 – Especificación de Respuesta de Controlador MPC

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos con el sistema experto encendido y considerando el flujo de Pebbles como perturbación.

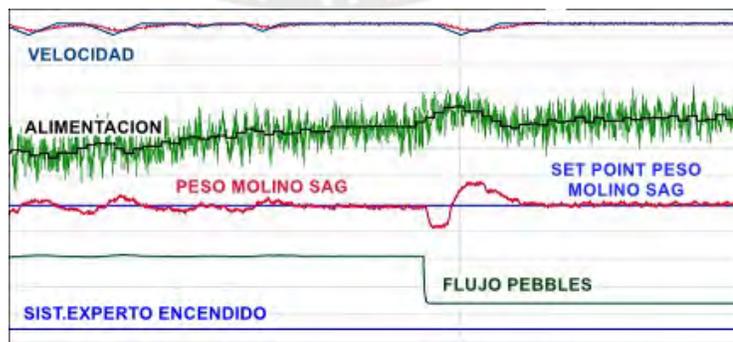


Figura 4-33 – Control de Peso de Molino SAG con Perturbación de Pebbles

		Especificaciones de Respuesta		
		Tiempo Pico	Tp	0:02:34
<b>Valor Inicial</b>	≈ 480 ton/h	<b>Sobreimpulso Máximo</b>	<b>Mp</b>	1.47%
<b>Valor Final</b>	0 ton/h	<b>Tiempo de Establecimiento (2% de error)</b>	<b>Tes</b>	0:01:36

Tabla 4-10 – Especificación de Respuesta de Controlador MPC

Como se puede apreciar, considerando la perturbación como parámetro del controlador MPC de control de peso se tiene una mejor respuesta ante sus cambios.

#### 4.6 Definición de Controladores de Lógica Difusa

Este controlador forma parte del grupo secundario y ajustará el objetivo de peso mediante lógica difusa de acuerdo con la diferencia entre la potencia y los impactos críticos con sus respectivos objetivos, será activado solamente cuando el controlador normal del grupo principal se encuentre activado y se active desde la pantalla principal del SCA.

Los valores de cada potencia e impactos críticos fusificados serán indexados de acuerdo con sus valores estimados mínimos y máximos configurables hacia valores de 0 a 1 respectivamente y la variable defusificada será desindexada de valores 0 a 1 a valores de límites mínimo y máximo configurable y adicionada al objetivo actual.

Este controlador se basará en lógica difusa diseñada de acuerdo con la experiencia del operador.

##### 4.6.1 Tabla de Reglas heurísticas

Potencia Imp.Críticos	High High	High	Medium	Low	Low Low
High High	Low Low	Low	High High	High High	High High
High	Low Low	Low	High	High	High
Medium	Low Low	Low	Medium	Medium	High
Low	Low Low	Low	Low	High	High
Low Low	Low Low	Low Low	Low	High	High

Tabla 4-11 – Reglas Heurísticas de Controlador Adaptativo de Peso

## 4.6.2 Funciones de Membresía

### ▪ Funciones de Membresía de Impactos Críticos de Molino SAG – Bloque Fuzzificador

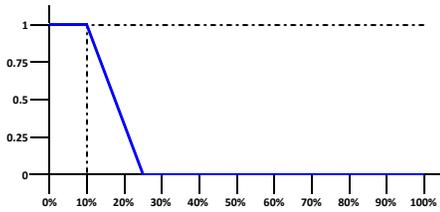


Figura 4-34 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – Low Low

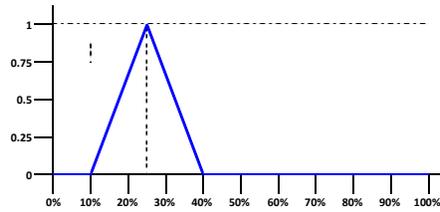


Figura 4-35 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – Low

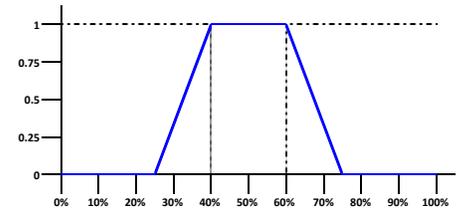


Figura 4-36 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – Medium

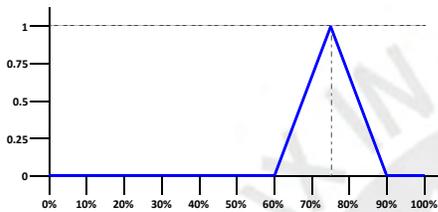


Figura 4-37 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – High

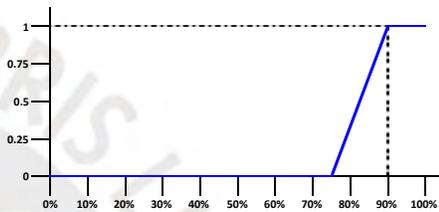


Figura 4-38 – Funciones de Membresía de Impactos Críticos – High High

### ▪ Funciones de Membresía de Potencia de Molino SAG – Bloque Fuzzificador

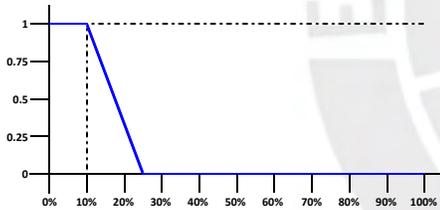


Figura 4-39 – Funciones de Membresía de Potencia – Low Low

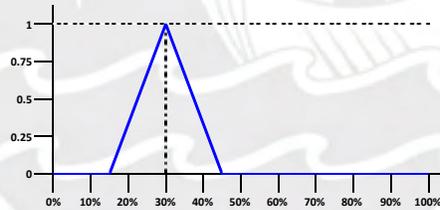


Figura 4-40 – Funciones de Membresía de Potencia – Low

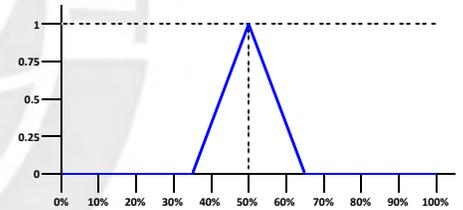


Figura 4-41 – Funciones de Membresía de Potencia – Medium

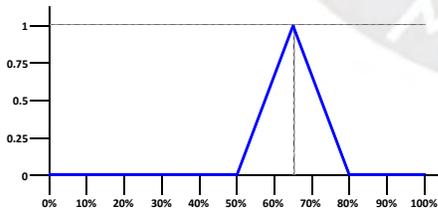


Figura 4-42 – Funciones de Membresía de Potencia – High

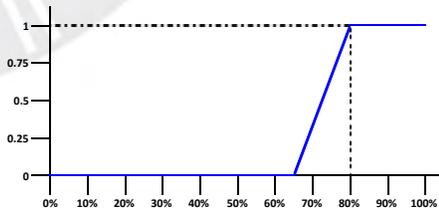


Figura 4-43 – Funciones de Membresía de Potencia – High High

### ▪ Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino SAG – Bloque DeFuzzificador

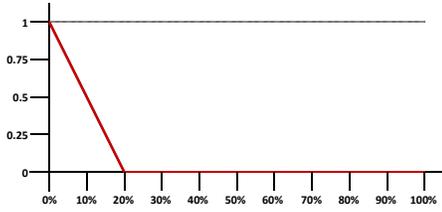


Figura 4-44 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – Low Low

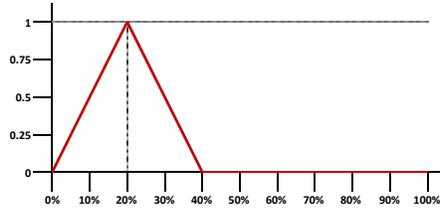


Figura 4-45 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – Low

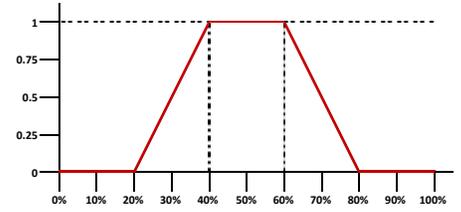


Figura 4-46 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – Medium

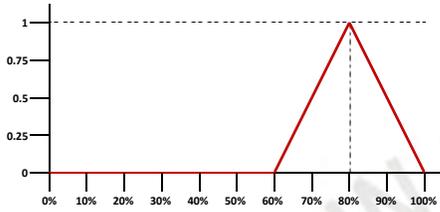


Figura 4-47 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – High

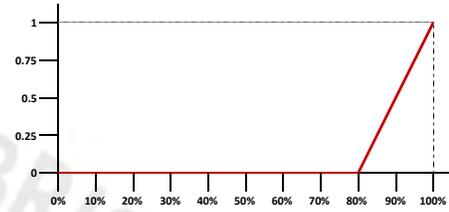


Figura 4-48 – Funciones de Membresía de Objetivo de Peso de Molino – High High

#### 4.6.3 Resultados de Controlador de Lógica Difusa

- Ejecución de Controlador de Optimización de lógica difusa

La ejecución de este controlador será para optimizar el proceso mejorando el set point de peso del molino SAG de acuerdo con su error de impactos críticos y potencia.

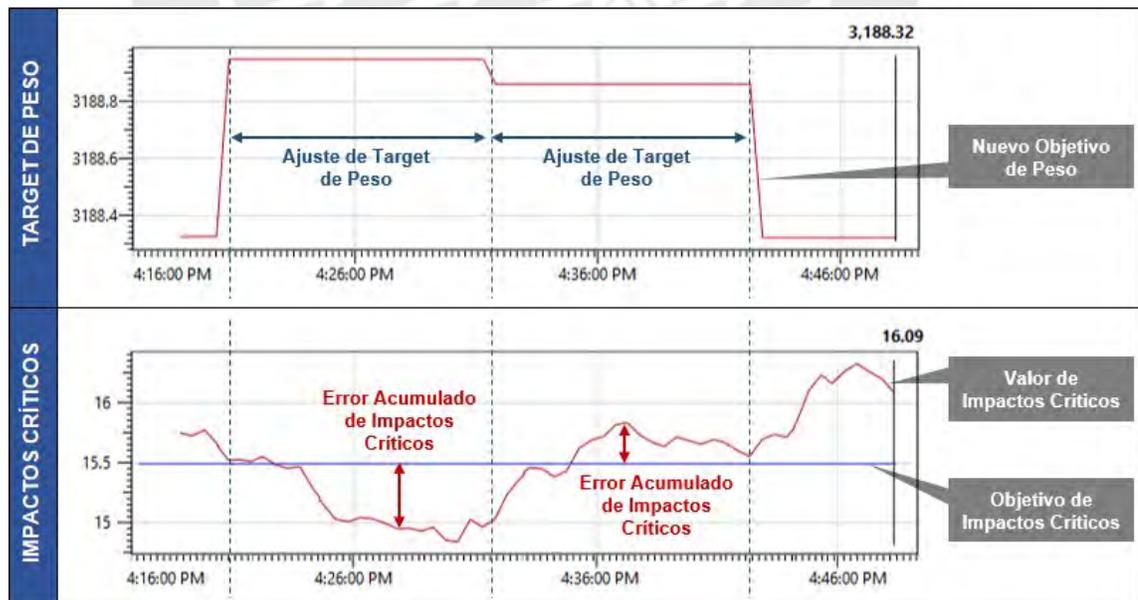




Figura 4-49 – Resultados de Controlador Difuso de Control de Peso

- Respuesta de Controlador de Optimización de Molino SAG

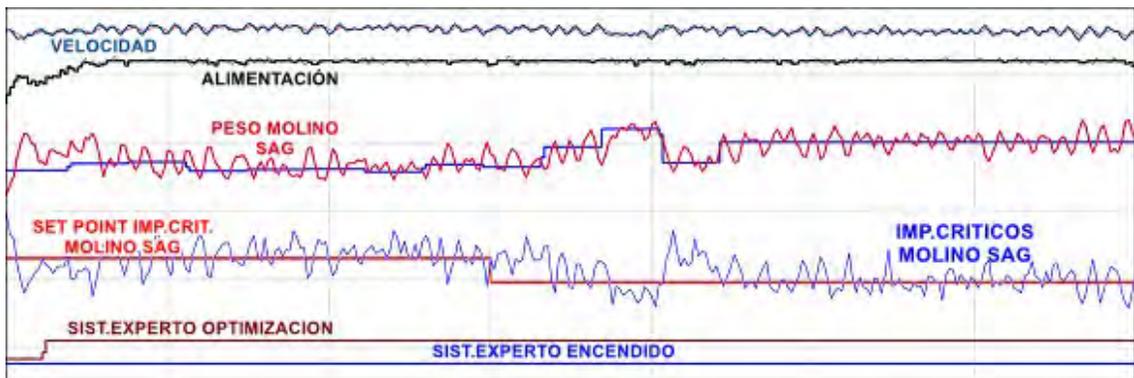


Figura 4-50 – Ejecución de Controlador Difuso de Optimización

El control de optimización tendrá un tiempo de ejecución mayor que el controlador principal, de 10 minutos, y utilizará como referencia valores filtrados por el alto grado de ruido en la señal de impactos críticos.

Como se aprecia en la Figura 4-50 este control modificará el set point de peso del Molino SAG según los set points de impactos críticos y potencia hasta llevando el molino el mejor punto de control posible según sus condiciones actuales como se apreciará en la sección 4.8 - Resultados de Mejora con Sistema de Control Avanzado.

#### 4.7 Comunicación e Integración con Sistema de Supervisión Primario

La arquitectura del sistema de control avanzado será la siguiente

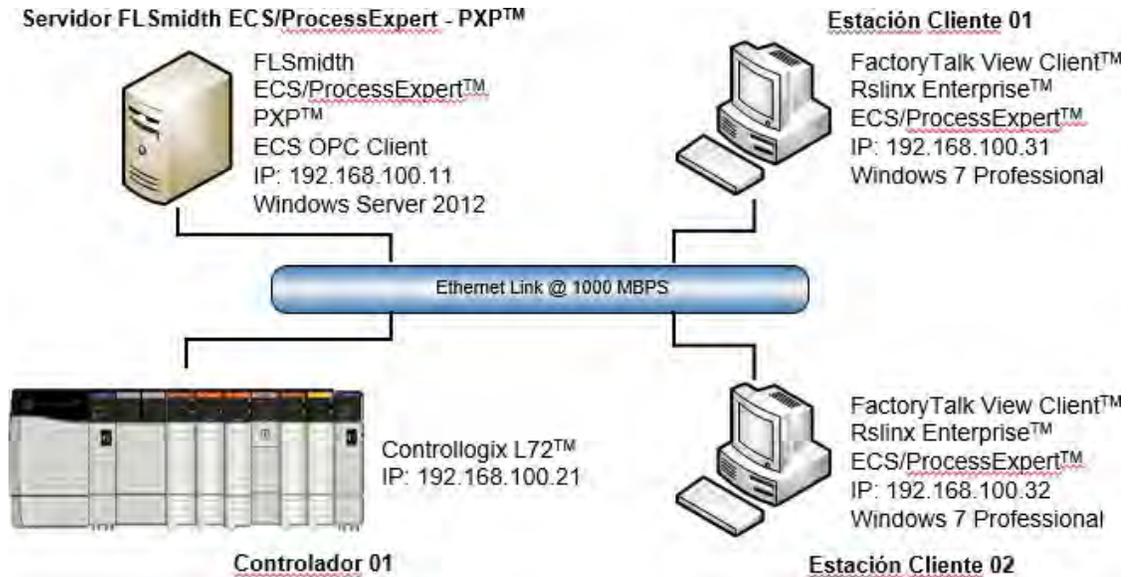


Figura 4-51 – Arquitectura de Sistema de Control Avanzado

#### 4.7.1 Protocolo de Comunicación

El protocolo de comunicación industrial será nuevamente el OPC como se describe a continuación.

##### 4.7.1.1 *Servidor OPC – RSLinx™ OPC Server*

El servidor de datos OPC a utilizar es el RSLinx™ el cual extraerá la información del sistema de supervisión primario requerido hacia el sistema de control avanzado.

##### 4.7.1.2 *Cliente OPC – Flsmidth™ OPC Client.*

El sistema de control avanzado propiedad de Flsmidth™ utilizará sus clientes OPC propietario, para extraer las señales necesarias para controlar el molino SAG según la lógica de control necesaria.

#### 4.7.2 Señales de Sistema de Control Avanzado

	Tipo de Señal	Estado de Señal	Servidor OPC
<b>Peso de Molino SAG</b>	Analógica	Read	RSLinx
<b>Impactos Críticos de Molino</b>	Analógica	Read	RSLinx
<b>Potencia de Molino SAG</b>	Analógica	Read	RSLinx
<b>Velocidad de Molino SAG</b>	Analógica	Read & Write	RSLinx
<b>Alimentación al Molino SAG</b>	Analógica	Read & Write	RSLinx
<b>Flujo de Agua al Molino SAG</b>	Analógica	Read & Write	RSLinx
<b>Molino Encendido</b>	Digital	Read	RSLinx
<b>Molino en Emergencia</b>	Digital	Read	RSLinx
<b>Molino Detenido</b>	Digital	Read	RSLinx
<b>Grupo de Control Listo</b>	Digital	Read	RSLinx
<b>Grupo de Control Encendido</b>	Digital	Read & Write	RSLinx
<b>Watchdog Sistema Avanzado</b>	Digital	Read & Write	RSLinx
<b>Activar/Desactivar Grupo</b>	Digital	Read	RSLinx

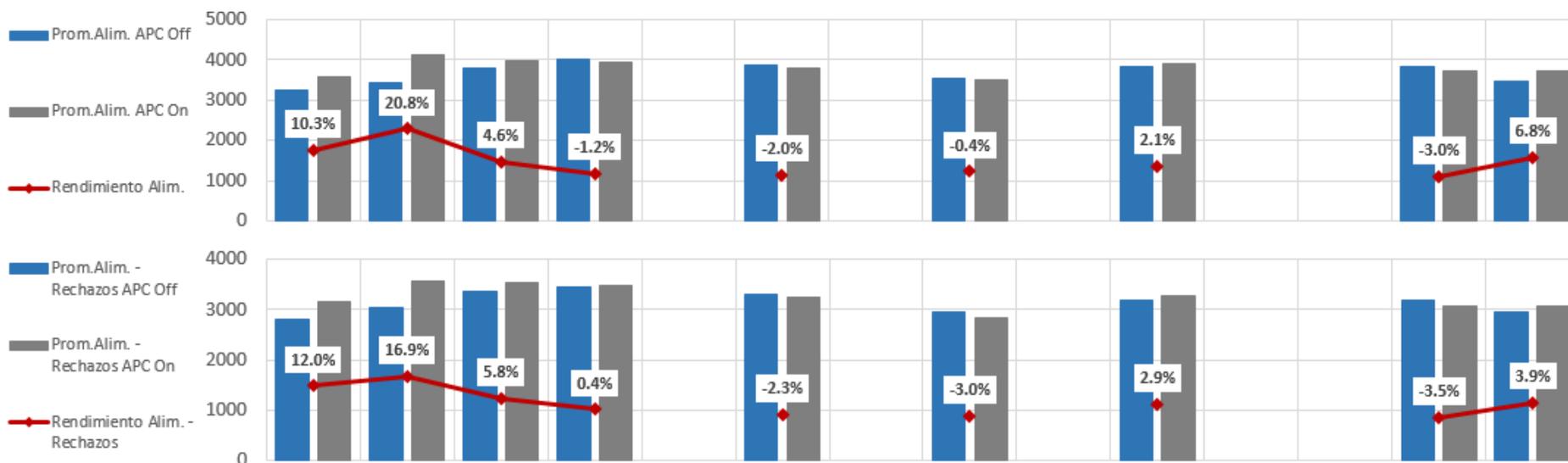
Tabla 4-12 – Estado de Señales entre Modelo Matemático y Controlador Primario

#### 4.8 Resultados de Mejora con Sistema de Control Avanzado

Se presentarán los resultados de mejora obtenidos, sobre cada variable descrita en la presente tesis, realizados en una planta minera con condiciones similares a las descritas en un periodo de 14 días con las siguientes restricciones:

- La limitación para seleccionar periodos de días validos según uso del sistema por hora es mayor o igual al 98% y por día mayor o igual al 75%.
- El periodo de prueba de entre el sistema encendido y apagado es de 12 horas.
- Se eligieron 3 escenarios según el tipo de mineral reportado desde el área de chancado y mina.
- Se calcularon los siguientes indicadores, diferencia de promedio acumulado; desviación estándar de variables.

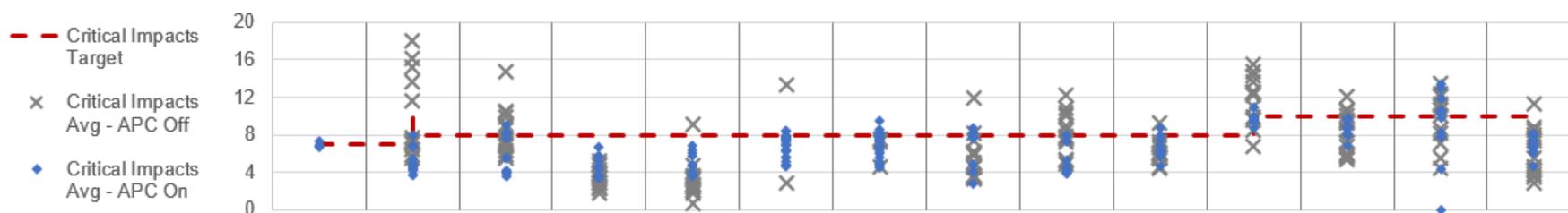
#### 4.8.1 Mejora de Alimentación y Producto de Molino SAG



	Día 01	Día 02	Día 03	Día 04	Día 05	Día 06	Día 07	Día 08	Día 09	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14
Prom. Alim. APC Off	3242	3427	3801	4004		3857		3532		3821			3850	3464
Prom. Alim. APC On	3572	4139	3980	3948		3782		3522		3907			3738	3713
Prom. Alim. - Rechazos APC Off	2810	3050	3352	3452		3306		2939		3181			3180	2947
Prom. Alim. - Rechazos APC On	3148	3564	3546	3465		3230		2847		3271			3068	3056
Rendimiento Alim.	10.3%	20.8%	4.6%	-1.2%		-2.0%		-0.4%		2.1%			-3.0%	6.8%
Rendimiento Alim. - Rechazos	12.0%	16.9%	5.8%	0.4%		-2.3%		-3.0%		2.9%			-3.5%	3.9%

- La mejora de alimentación al molino SAG promedio total en los días considerados fue de: **3.95%**
- La mejora de producto del molino SAG (alimentación – rechazos) promedio total en los días considerados fue de: **3.47%**

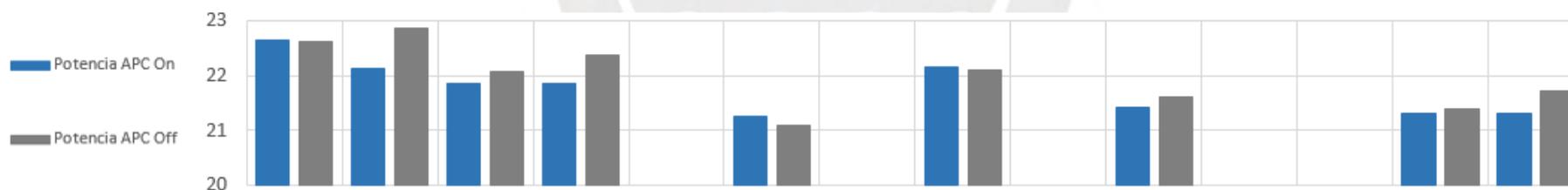
#### 4.8.2 Mejora de Impactos Críticos de Molino SAG



	Día 01	Día 02	Día 03	Día 04	Día 05	Día 06	Día 07	Día 08	Día 09	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14
Critical Impacts St.Dev - APC On	3.74	3.05	3.52	2.94	3.54	3.59	8.14	3.45	3.33	3.86	3.89	4.85	4.24	4.01
Critical Impacts St.Dev - APC Off	4.29	6.77	4.69	2.55	10.76	3.59	7.93	3.65	5.09	4.51	5.29	4.99	3.94	4.06

- La desviación estándar sobre la variación de impactos críticos sobre el molino SAG con el APC encendido en los días considerados fue de **4.01** y apagado de **5.15**
- La mejora sobre la desviación estándar del control de impactos críticos es del **22.13%**

#### 4.8.3 Mejora de Potencia de Molino SAG



	Día 01	Día 02	Día 03	Día 04	Día 05	Día 06	Día 07	Día 08	Día 09	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14
Prom. Potencia APC On	22.65	22.12	21.86	21.85		21.25		22.15		21.42			21.31	21.31
Prom. Potencia APC Off	22.61	22.85	22.07	22.36		21.1		22.09		21.62			21.38	21.72

- La mejora de potencia del molino SAG en los días considerados fue de: **-1.06%**

#### 4.8.4 Mejora Económica en Proceso.

Las principales mejoras económicas se presentan a continuación:

- La mejora de en el promedio del producto total del molino SAG durante los días considerados fue de 3.47%, es decir 108.67 t/h, produciendo al mes una mejora de 78,240 tons en producción neta, el beneficio económico dependerá la ley de cobre, el porcentaje de recuperación y el precio por libra de cobre al momento de la evaluación.
- Asumiendo una Ley de Cu de 1%, un porcentaje de recuperación de 85% y el precio por libra en USD 4.00, la pérdida económica durante 30 días sin uso del sistema experto será de USD 5,864,000.
- La mejora en el control de impactos críticos se reflejó en el aumento de tiempo necesario para el cambio de liners, por la mejora de la zona de impacto dentro del molino, de 6 a 8.5 meses reduciendo el costo anual de mantenimiento del molino SAG.
- El cambio de liners dentro del molino SAG representa un gasto de mantenimiento que oscila entre USD 1.2 a 1.5 millones sin considerar el tiempo de pérdida de producción por la detención del molino, la reducción de costo en la operación se dará al aumentar el tiempo de vida de los liners y el número de horas programadas de detención del molino por mantenimiento por año.
- El consumo de energía promedio se redujo en 1.06%, es decir, considerando que la diferencia del consumo promedio de energía con el sistema encendido y apagado por cada hora fue de 208.9 Kw, y el costo del Kwh USD 0.13, tendremos que el sistema en 30 días representa un ahorro de USD 19,552.00.

#### **4.9 Conclusiones**

- El sistema de control avanzado considerará tanto al sistema de control primario y al sistema de supervisión para su correcta integración con el proceso simulado y controlará tanto las variables manipuladas directamente o los lazos de control PID de forma remota.
- Se definió el funcionamiento del sistema de control avanzado según la prioridad de cada medición del proceso y para ello se ha especificado cada controlador MPC y difuso.

- Cada controlador MPC configurado en este capítulo contendrá la misma estructura definida y orden de ejecución.
- El control MPC ha sido definido para la estabilidad y control de situaciones anormales del proceso.
- La sintonización de un controlador MPC se realiza evaluando la respuesta de cada actuador y su relación con cada medición involucrada y dando la prioridad necesaria a cada una según la función específica del controlador.
- El controlador difuso es utilizado para optimizar el proceso antes una situación normal donde no exista ninguna condición anormal presente.
- Se han mostrado los beneficios cuantificados del uso de un sistema de control avanzado según mejora de alimentación y consumo de energía.
- La integración entre el sistema de control avanzado y el sistema de control primario se ha establecido por comunicación OPC y a un tiempo de muestreo de 30 segundos.



## CONCLUSIONES GENERALES

- En base al circuito descrito, se plantearon los modelos matemáticos según las variables medibles y controladas propias del control del molino SAG, cada uno fue aproximado a sus valores reales según el error con los valores simulados.
- El sistema de control primario se desarrolló considerando su integración entre el modelo matemático y la lógica básica para la configuración de señales de campo.
- La configuración de cada equipo del proceso y lazos de control PID en el sistema de control primario fue realizada según la prioridad de cada uno por su impacto en el proceso ajustando el orden y tiempo de ejecución de cada secuencia.
- El sistema de supervisión primario fue conectado al sistema de control primario y se definieron los faceplates de control para cada señal configurada y equipo a controlar.
- El sistema de control avanzado ha sido diseñado para brindar estabilidad al proceso, control de situaciones anormales y optimización y mejora de indicadores críticos.
- Para una correcta integración entre el sistema de control avanzado, el sistema de control primario y el sistema de supervisión, se configuraron las variables manipuladas o lazos de control PID para ser controlados remotamente por los controladores del sistema de control avanzado como se realiza en la actualidad.
- Se evaluó la respuesta del controlador MPC de Peso de Molino SAG considerando inicialmente el control manual donde la respuesta del control del peso del molino no es estable, oscilando con valores de error entre el 11 y el 8%; y con el sistema de control avanzado se obtuvieron los siguientes datos:
  - Error en porcentaje absoluto menor al 2%
  - Tiempo de Establecimiento: 0:08:58
  - Sobreimpulso Máximo: 3.61%
- Se realizaron pruebas para evaluar el control de perturbaciones al proceso, considerando al control de flujo de Pebbles, obteniendo las siguientes mejoras en el control de peso.
  - Mejora en Tiempo Pico ( $T_p$ ): 51.9%
  - Mejora en Sobreimpulso Máximo ( $M_p$ ): 56.3%
  - Mejora en Tiempo de Establecimiento al 2% de error ( $T_{es}$ ): 72.2%
- La mejora calculada para las variables críticas de alimentación e impactos críticos con el uso del sistema de control avanzado fue calculada en 3.47% y 22.13%.

## RECOMENDACIONES

- El modelamiento matemático puede seguir siendo desarrollado, se ha considerado integrar el área de molienda secundaria y flotación siguiendo el mismo estándar de programación.
- El sistema de control primario ha sido desarrollado considerando un estándar de definición de señales y controladores para su fácil identificación y seguimiento ante inconvenientes de lógica o posteriores mejoras.
- El sistema de supervisión ha sido integrado con el sistema de control primario a nivel de su nomenclatura, haciendo que la integración de señales y creación de faceplates sean sencillos de configurar, probar y ejecutar.
- El sistema de control avanzado ha sido orientado hacia futuras mejoras continuas según el criterio del personal a cargo.
- El sistema ha sido simulado mediante máquinas virtuales por su facilidad en el manejo en paralelo y configuración y orden en la red de comunicación.
- Se ha considerado un servidor de dominio para la manipulación de usuarios y su fácil gestión dentro del sistema de supervisión.
- En una siguiente etapa se recomienda el desarrollo de sistemas supervisorios que incluyan sistemas de diagnóstico de fallas (Pérez-Zuñiga, 2019)

## BIBLIOGRAFÍA

- A.Bartman, C. P. (2009). *Model Predictive Control of Feed Flow Reversal in a Reverse Osmosis Desalination Process*. 2009 American Control Conference.
- A.Bemporad, N. L. (2020). *User's Guide Model Predictive Control Toolbox*. The MathWorks, Inc.
- Apelt, T. (2005). *Inferential Measurement Models for Semi-Autogenous Grinding Mills*. Universidad de Sydney.
- C.K.Tana, J. G. (2016). *A study on model predictive control in paste thickeners with rake torque constraint*. New South Wales, Australia: School of Chemical Engineering, The University of New South Wales.
- Coetzee, L. (2009). *Robust Nonlinear Model Predictive Control of a Closed Run-of-Mine Ore Milling Circuit*. Faculty of Engineering, University of Pretoria.
- E.Bartsch, G.Comeau, & C.Hardie. (2008). *Evolution of SAG Mill Process Control at the Xstrata Nickel Raglan Plant*.
- E.Vyhmeister, L.-B. R.-M.-G.-V.-G. (2018). *Modeling and energy-based model predictive control of high pressure grinding roll*. Cork, Ireland: University Collage Cork.
- F.Estrada, A. (2014). *Hybrid Model Predictive Control for Grinding Plants*. College of Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- FactoryTalk View Site Edition User's Guide*. (2019). Rockwell Automation Inc.
- Forbes, M., & Gough, B. (2009). *Model Predictive Control of Sag Mills and Flotation Circuits*. Andritz Automation Ltd.
- Garrido, C., & Sbarbaro, D. (2009). *Multivariable Model Predictive Control of a Simulated SAG plant*. Superintendencia de Control Automático, Minera Los Pelambres.
- J.L.Salazara, H.-G. E. (2013). *Model predictive control of semiautogenous mills*. Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Chile.
- L.Austin, & F.Concha. (1994). *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*. Pennsylvania State University.
- L.Austin, H. b. (2002). *An alternative method for programming mill models*. College of Earth and Mineral Sciences, Pennsylvania State University.
- L.E.Olivier, K. (2012). *Model-plant mismatch detection and model update for a run-of-mine ore milling circuit under model predictive control*. Pretoria, South Africa: Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Pretoria.

- L.Wang. (2009). *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. School of Electrical and Computer Engineering RMIT University.
- Logix 5000 Controllers Common Procedures*. (2018). Rockwell Automation Inc.
- Logix 5000 Controllers General Instructions Reference Manual*. (2018). Rockwell Automation Inc.
- Loutjie C. Coetzee, I. K. (2010). *Robust Nonlinear Model Predictive Control of a ROM Milling Circuit*. Universidad de Pretoria.
- P.Karelovic, E. A. (2014). *A framework for hybrid model predictive control in mineral processing*. College of Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Perez Zuñiga C.G., Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J. (2009). Control predictivo generalizado de la temperatura de laminación de un horno siderúrgico. *Electro-Electrónica*, 32(1), 46-54.
- Pérez-Zuniga, C., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., Sotomayor, J., (2015). Decentralized diagnosis in a spacecraft attitude determination and control system. *Journal of Physics: Conf Series* vol. 659(1) pp. 1-12.
- Pérez, C.G., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., and Sotomayor, J. (2016). Fault driven minimal structurally overdetermined set in a distributed context. 27th International Workshop on Principles of Diagnosis DX2016.
- Pérez-Zuniga, C., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., Sotomayor, J. (2017). Fault-driven structural diagnosis approach in a distributed context. *IFAC PapersOnline* 50-1 14254-14259.
- Pérez-Zuniga, C., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., Sotomayor, J., and Artigues, C. (2018). Decentralized diagnosis via structural analysis and integer programming. *IFAC-PapersOnline* 51-24 pp. 168-175.
- Pérez-Zuñiga C.G., Sotomayor-Moriano J., Chantery E., Travé-Massuyès L., Soto M. (2019) Flotation Process Fault Diagnosis Via Structural Analysis, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 52, Issue 14, Pages 225-230.
- R.Klimpel, L. (1994). *The Back-Calculation of Specific Rates of Breakage from Continuous Mill Data*.
- R.Rivas, J.Sotomayor, G.Pérez, & M.E.Soto. (2019). *Real-Time Implementation of an Expert Model Predictive Controller in a Pilot-Scale Reverse Osmosis Plant for Brackish and Seawater Desalination*. *Appl.Sci.*, 9, 2932.
- Rivas, R., Perez, G., Sotomayor, J., & Calderon, E. (2016). *Diseño de un GPC multivariable basado en una PC industrial para el control de una unidad de*

- ósmosis inversa de una industria farmacéutica*. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 15(1), 259-273.
- Rivas, R., Sotomayor, J., & Perez, C. (2017). *Adaptive expert generalized predictive multivariable control of seawater RO desalination plant for a mineral processing facility*. IFAC- PapersOnLine 2017, 50, 10244–10249.
- Rivas, R., Sotomayor, J., Pérez, G., & Soto, M. (2019). *Real-Time Implementation of an Expert Model Predictive Controller in a Pilot-Scale Reverse Osmosis Plant for Brackish and Seawater Desalination*. Appl.Sci., 9, 2932.
- Roux, J. (2012). *Simplified Grinding Circuit Models for use in Process Control*. Universidad de Pretoria.
- Roux, J., & Craig, I. (2013). *Reducing the number of size classes in a cumulative rates model used for process control of a grinding mill circuit*.
- Roux, J., R.Padhi, & K.Craig. (2014). *Optimal control of grinding mill circuit using model predictive static programming: A new nonlinear MPC paradigm*. Pretoria, South Africa: Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Pretoria.
- S.Botha, J. R. (2017). *Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit*. Pretoria, South Africa: Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Pretoria.
- S.Morrell. (s.f.). *A New Autogenous and Semi-autogenous Mill Model For Scale-up, Design and Optimisation*. SMCC Pty Ltd.
- Salazara, J., Valdés, H., Vyhmesiter, E., & Cubillos, F. (2013). *Model predictive control of semiautogenous mills*. Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello, Chile.
- T.A. Apelt, S. A. (2001). *Inferential Measurement of Sag Mill Parameters*. Universidad de Sydney.
- W.Valderrama, J.Pontt, L.Mange, J.Hernández, F.Salgado, J.Valenzuela, & R.Pozo. (2000). *The Impactmeter, a new Instrument for Monitoring and avoiding harmful High-Energy Impacts on the Mill Liners in Sag Mills*.
- W.Valery Jnr, S. (1995). *The Development of a Dynamic Model for Autogenous and Semi-Autogenous Grinding*. University of Queensland.
- XChen, Q. S. (2006). *Constrained model predictive control in ball mill grinding Process*. Nanjing, Jiangsu Province, China: School of Automation, Southeast University.
- Zozer, M. M. (2020). *Diseño de un sistema de control predictivo generalizado multivariable para el control de siete niveles de pulpa de un banco de celdas de*

*flotación de minerales de cobre de una planta de procesamiento de minerales.*  
Pontificia Universidad Católica del Perú.



## ANEXOS

### A.1 Diseño de Pantalla de Supervisión

La pantalla principal del sistema de supervisión es la siguiente:

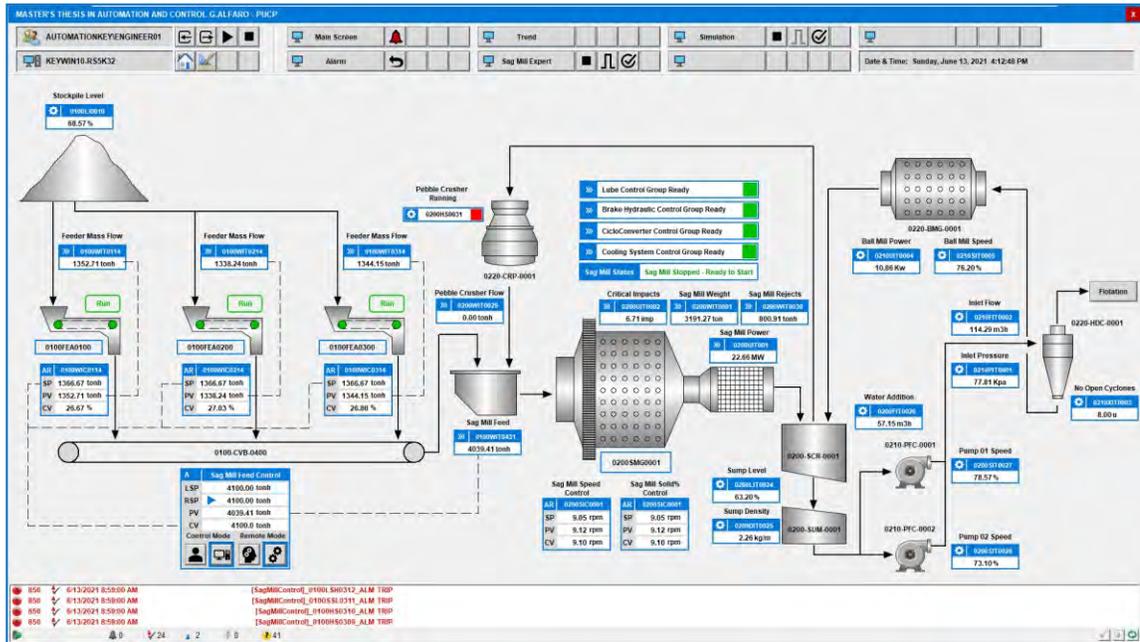


Figura A-1 – Áreas de Pantalla Principal

#### A.1.1 Resolución De La Pantalla

La resolución en la que se configurarán todas las pantallas será de 1920 x 1080 pixeles, compatible con video de alta definición FULL – HD y estará compuesta por los siguientes componentes:

- Banner de Navegación: Ubicado en la parte superior de todas las pantallas, permitirá la navegación fluida entre cada una de ellas, el cambio de usuario y la información de la estación desde la cual se está ejecutando el sistema de supervisión.

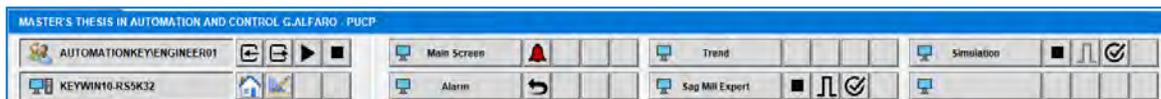


Figura A-2 – Banner de navegación

- Banner de Alarmas: Muestra las alarmas recientes, su tag, descripción, estado y hora de activación o desactivación.

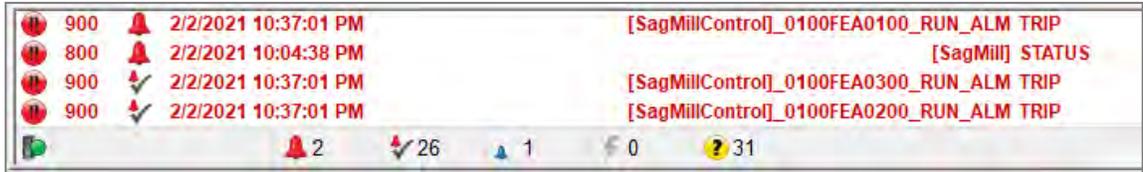


Figura A-3 – Banner de Alarmas

### A.1.2 Color de Fondo

El color de fondo por estándar será **plomo claro**, normado en RGB como sigue a continuación:

- Red: 210
- Green: 210
- Blue: 210

Con los siguientes parámetros de iluminación:

- Hue: 160
- Sat: 0
- Lum: 181

### A.1.3 Faceplate Analógico

El faceplate analógico será llamado desde cualquier símbolo gráfico como el mostrado a continuación:



Figura A-4 – Símbolo Gráfico de Valor Analógico

Dicho símbolo cumplirá los siguientes estados de visibilidad:

Cuando el valor analógico se encuentre en un rango normal, su estado será de color verde con un fondo negro



Figura A-5 – Símbolo Gráfico en rango normal

Cuando el valor analógico se encuentre en alarma, su estado será parpadeante entre rojo y gris para alertar al operador.



Figura A-6 – Símbolo gráfico en Estado de Alarma

El faceplate de la señal analógica será como el mostrado a continuación

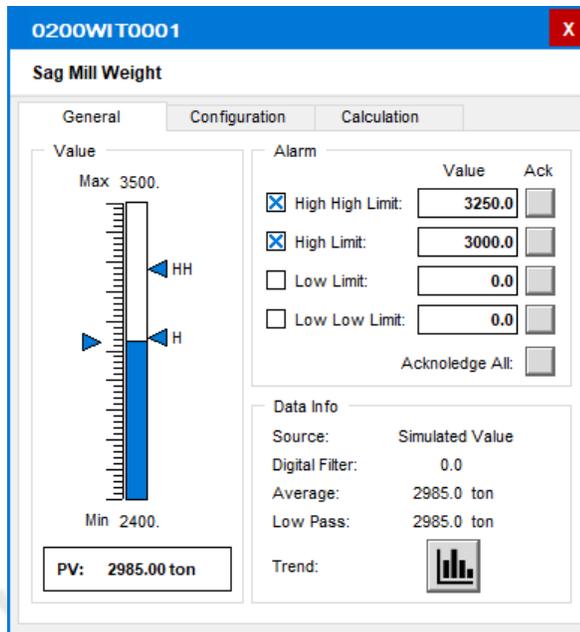


Figura A-7 – Faceplate Analógico

#### A.1.3.1 Calculation

Mostrará el faceplate del habilitador y configuración del valor promediado y filtro pasa bajos.

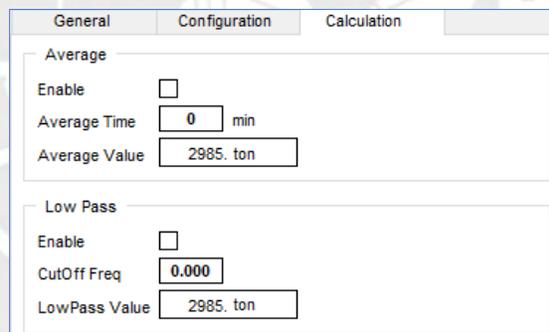


Figura A-8 – Faceplate Analógico – Calculation

#### A.1.3.2 Configuration

Mostrará el faceplate de configuración de alarmas, calibración y tipo de señal, descripción de señal analógica y el tipo de entrada.

Enable	Alarm	Limit	Severity	Deadband	Min. Duration	Acknowledge Required
<input checked="" type="checkbox"/>	High High Alarm:	3250	0	0	0	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	High Alarm:	3000	0		0	
<input type="checkbox"/>	Low Alarm:	0	0			
<input type="checkbox"/>	Low Low Alarm:	0	0			

Raw	Engineer
High Signal: 3500	3500
Low Signal: 2400	2400

Data Type	
<input checked="" type="checkbox"/> -10V to 10V	<input type="checkbox"/> 0V to 10V
<input type="checkbox"/> 0V to 5V	<input type="checkbox"/> 4 to 20mA

Input Type	Value
<input type="checkbox"/> Signal Value:	0.0
<input type="checkbox"/> Opc Value:	3070.
<input checked="" type="checkbox"/> Simulated Value:	2985.
Eng. Value:	2985.

Description
Tag: 0200WT0001
Descrip: Sag Mill Weight
Unit: ton

Figura A-9 – Faceplate Analógico – Configuration

- Descripción de señal analógica: Muestra la descripción de la señal analógica, tag, descripción y unidad de medida.
- Configuración de alarmas: Es un indicador de la existencia de una alarma. Se muestra de color gris cuando no está activa la alarma y de color rojo parpadeando cuando está activa la alarma, este faceplate permite configurar
  - Valores de alarma alto, muy alto, bajo y muy bajo.
  - Severidad por cada tipo de alarma.
  - Habilitación de cada tipo de alarma.
  - Reconocimiento de cada tipo de alarma
  - Configuración de banda muerta.
  - Configuración de tiempo mínimo para activación de una alarma.
  - Habilitación de petición de reconocimiento de alarmas.
- Tipo de señal: Muestra la pantalla para configurar lo valores máximos, mínimos de señal y de ingeniería, el tipo de rango de entrada (0 a 5V, 0 a 10v, 0 a 20mA).

Todas estas configuraciones se realizarán directamente sobre el controlador, los tags están indexados directamente hacia él, el HMI no representará un medio de enlace para este tipo de modificaciones.

También se podrá configurar si la entrada analógica dependerá de su entrada física o de un valor simulado dado por el operador activando la casilla de simulación.

#### A.1.4 Faceplate de Lazo de Control

En las pantallas de navegación los procesos de lazo cerrado serán identificados como se muestra en la Figura A-10, así mismo se usará este símbolo gráfico como vínculo al faceplate respectivo.

A continuación, se muestra el faceplate para un controlador PID y luego se detallará cada una de sus partes

M	0100WIC0114
SP	1114.22 tonh
PV	1114.22 tonh
CV	25.00 %

Figura A-10 – Símbolo Gráfico de PID

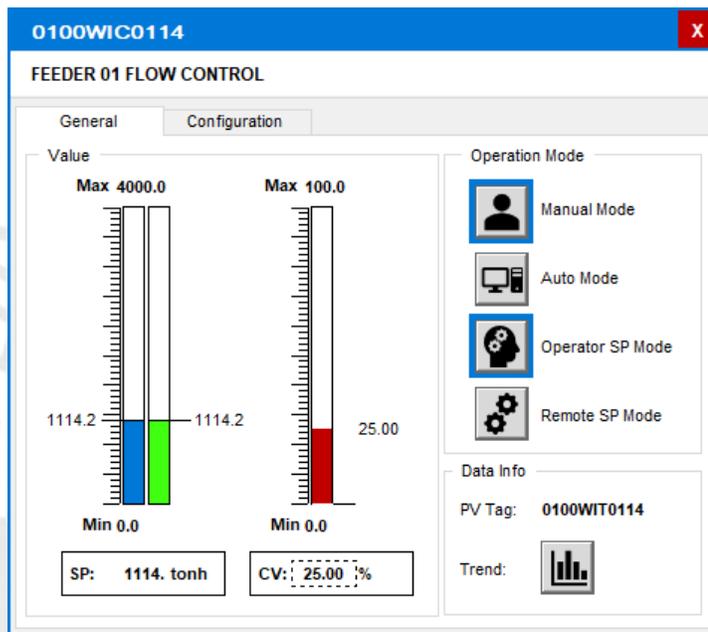


Figura 0-11 – Faceplate de Controlador PID

- Tagname y descripción: Se muestra el tagname y descripción del controlador PID.
- Cierre de ventana: Usado para cerrar el faceplate del PID.
- Modo de operación Programa / Operador: Usado para seleccionar el modo de operación Programa u Operador. En el modo Programa es la lógica del controlador la que determina el Setpoint (SP) mientras que en el modo Operador es el usuario el que ingresa el SP.
- Modo de control Auto / Manual: Cuando está en modo Auto es la misma instrucción la que termina la variación de la variable de control (CV). En el modo Manual el valor de CV no es controlado por la instrucción (es determinado por el valor de Programa u Operador).
- Setpoint (SP): Usado para ingresar el SP

- Control Variable (CV): Usado para ingresar el CV
- Barra de valor del CV: Barra que indica de manera gráfica el valor del CV
- Barra de valor de SP y PV: Barras que indican de manera gráfica el valor del SP y PV

#### A.1.4.1 Configuration

Figura 0-12 – Faceplate de Controlador PID - Configuration

- Gains: Ingreso de ganancias proporcional, integrativo y derivativo propio del controlador PID.
- Control Action: Configura el tipo de error a corregir en el lazo así como la opción de seguimiento del PV cuando el lazo se encuentre en manual.
- SP Limits: Límites de acción de variable SP.
- CV Scaling & Limits: Escalamiento de señal CV.
- PV Scaling: Escalamiento de señal PV.
- PV Input Selection: Selección de señal PV entre señal escalada, señal promedio o señal filtrada si se encuentran habilitadas.
- Description: Tag, unidad y descripción de señal de control.

## A.2 Lista de Instrumentos

Código de Equipo	Equipo	Instrumento	Código	Tipo de Señal	Dirección
N/A	Stockpile	Stockpile Level	0100-LI-0010	Analog	ENET0400:1:I.Ch0Data
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 01	0100-HS-0101	Digital	ENET0300:1:I.Data.0
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 02	0100-HS-0102	Digital	ENET0300:1:I.Data.1
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 03	0100-HS-0103	Digital	ENET0300:1:I.Data.2
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 04	0100-HS-0104	Digital	ENET0300:1:I.Data.3
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 05	0100-HS-0105	Digital	ENET0300:1:I.Data.4
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 06	0100-HS-0106	Digital	ENET0300:1:I.Data.5
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 07	0100-HS-0107	Digital	ENET0300:1:I.Data.6
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 08	0100-HS-0108	Digital	ENET0300:1:I.Data.7
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 09	0100-HS-0109	Digital	ENET0300:1:I.Data.8
0100-FEA-0100	Feeder 01	Pull Cord Switch 10	0100-HS-0110	Digital	ENET0300:1:I.Data.9
0100-FEA-0100	Feeder 01	Low Speed Switch	0100-SSL-0111	Digital	ENET0300:1:I.Data.10
0100-FEA-0100	Feeder 01	Discharge Level High	0100-LSH-0112	Digital	ENET0300:1:I.Data.11
0100-FEA-0100	Feeder 01	Feeder Speed	0100-SIT-0113	Analog	ENET0400:1:I.Ch1Data
0100-FEA-0100	Feeder 01	Feeder Mass Flow	0100-WIT-0114	Analog	ENET0400:2:I.Ch0Data
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 01	0100-HS-0201	Digital	ENET0300:1:I.Data.12
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 02	0100-HS-0202	Digital	ENET0300:1:I.Data.13
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 03	0100-HS-0203	Digital	ENET0300:1:I.Data.14

0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 04	0100-HS-0204	Digital	ENET0300:1:I.Data.15
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 05	0100-HS-0205	Digital	ENET0300:1:I.Data.0
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 06	0100-HS-0206	Digital	ENET0300:2:I.Data.0
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 07	0100-HS-0207	Digital	ENET0300:2:I.Data.1
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 08	0100-HS-0208	Digital	ENET0300:2:I.Data.2
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 09	0100-HS-0209	Digital	ENET0300:2:I.Data.3
0100-FEA-0200	Feeder 02	Pull Cord Switch 10	0100-HS-0210	Digital	ENET0300:2:I.Data.4
0100-FEA-0200	Feeder 02	Low Speed Switch	0100-SSL-0211	Digital	ENET0300:2:I.Data.5
0100-FEA-0200	Feeder 02	Discharge Level High	0100-LSH-0212	Digital	ENET0300:2:I.Data.6
0100-FEA-0200	Feeder 02	Feeder Speed	0100-SIT-0213	Analog	ENET0400:1:I.Ch2Data
0100-FEA-0200	Feeder 02	Feeder Mass Flow	0100-WIT-0214	Analog	ENET0400:2:I.Ch1Data
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 01	0100-HS-0301	Digital	ENET0300:2:I.Data.7
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 02	0100-HS-0302	Digital	ENET0300:2:I.Data.8
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 03	0100-HS-0303	Digital	ENET0300:2:I.Data.9
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 04	0100-HS-0304	Digital	ENET0300:2:I.Data.10
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 05	0100-HS-0305	Digital	ENET0300:2:I.Data.11
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 06	0100-HS-0306	Digital	ENET0300:2:I.Data.12
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 07	0100-HS-0307	Digital	ENET0300:2:I.Data.13
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 08	0100-HS-0308	Digital	ENET0300:2:I.Data.14
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 09	0100-HS-0309	Digital	ENET0300:2:I.Data.15
0100-FEA-0300	Feeder 03	Pull Cord Switch 10	0100-HS-0310	Digital	ENET0300:3:I.Data.0

0100-FEA-0300	Feeder 03	Low Speed Switch	0100-SSL-0311	Digital	ENET0300:3:I.Data.1
0100-FEA-0300	Feeder 03	Discharge Level High	0100-LSH-0312	Digital	ENET0300:3:I.Data.2
0100-FEA-0300	Feeder 03	Feeder Speed	0100-SIT-0313	Analog	ENET0400:1:I.Ch3Data
0100-FEA-0300	Feeder 03	Feeder Mass Flow	0100-WIT-0314	Analog	ENET0400:2:I.Ch2Data
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 01	0100-YS-0401	Digital	ENET0300:3:I.Data.3
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 02	0100-YS-0402	Digital	ENET0300:3:I.Data.4
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 03	0100-YS-0403	Digital	ENET0300:3:I.Data.5
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 04	0100-YS-0404	Digital	ENET0300:3:I.Data.6
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 05	0100-YS-0405	Digital	ENET0300:3:I.Data.7
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 06	0100-YS-0406	Digital	ENET0300:3:I.Data.8
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 07	0100-YS-0407	Digital	ENET0300:3:I.Data.9
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 08	0100-YS-0408	Digital	ENET0300:3:I.Data.10
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 09	0100-YS-0409	Digital	ENET0300:3:I.Data.11
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Belt Trip Switch 10	0100-YS-0410	Digital	ENET0300:3:I.Data.12
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 01	0100-HS-0411	Digital	ENET0300:3:I.Data.13
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 02	0100-HS-0412	Digital	ENET0300:3:I.Data.14
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 03	0100-HS-0413	Digital	ENET0300:3:I.Data.15
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 04	0100-HS-0414	Digital	ENET0300:4:I.Data.0
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 05	0100-HS-0415	Digital	ENET0300:4:I.Data.1
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 06	0100-HS-0416	Digital	ENET0300:4:I.Data.2
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 07	0100-HS-0417	Digital	ENET0300:4:I.Data.3

0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 08	0100-HS-0418	Digital	ENET0300:4:I.Data.4
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 09	0100-HS-0419	Digital	ENET0300:4:I.Data.5
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Pull Cord Switch 10	0100-HS-0420	Digital	ENET0300:4:I.Data.6
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 01	0100-ZS-0421	Digital	ENET0300:4:I.Data.7
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 02	0100-ZS-0422	Digital	ENET0300:4:I.Data.8
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 03	0100-ZS-0423	Digital	ENET0300:4:I.Data.9
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 04	0100-ZS-0424	Digital	ENET0300:4:I.Data.10
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 05	0100-ZS-0425	Digital	ENET0300:4:I.Data.11
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 06	0100-ZS-0426	Digital	ENET0300:4:I.Data.12
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 07	0100-ZS-0427	Digital	ENET0300:4:I.Data.13
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 08	0100-ZS-0428	Digital	ENET0300:4:I.Data.14
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 09	0100-ZS-0429	Digital	ENET0300:4:I.Data.15
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Missalignment Switch 10	0100-ZS-0430	Digital	ENET0300:5:I.Data.0
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Feeder Weight Flow	0100-WIT-0431	Analog	ENET0400:1:I.Ch4Data
0100-CVB-0400	Main Feeder 01	Discharge Level High	0100-LSH-0432	Digital	ENET0300:5:I.Data.1
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Weight	0200-WIT-0001	Analog	ENET0400:1:I.Ch5Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Power	0200-UIT-0001	Analog	ENET0400:1:I.Ch6Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Critical Impact	0200-UIT-0002	Analog	ENET0400:1:I.Ch7Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Lube System Reservoir Level	0200-LIT-0003	Analog	ENET0400:2:I.Ch4Data

0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Lube System Accumulator Pressure	0200-PIT-0003	Analog	ENET0400:2:I.Ch5Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Lube Ventilation Fan	0200-HS-0004	Digital	ENET0300:5:I.Data.5
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Heat Exchange Status	0200-HS-0005	Digital	ENET0300:5:I.Data.6
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Lube System Reservoir Temperature	0200-TIT-0006	Analog	ENET0400:2:I.Ch6Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Low Pressure Pump Status	0200-HS-0006	Digital	ENET0300:5:I.Data.7
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill High Pressure Pump Status	0200-HS-0007	Digital	ENET0300:5:I.Data.8
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Lube System Reservoir Pressure	0200-PIT-0008	Analog	ENET0400:2:I.Ch7Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Brake Hydraulic Fluid Pump Status	0200-HS-0009	Digital	ENET0300:5:I.Data.9
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Brake System Hydraulic Accum Pressure	0200-PIT-0010	Analog	ENET0400:3:I.Ch0Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Brake Hydraulic Fluid Heater Status	0200-HS-0011	Digital	ENET0300:5:I.Data.10
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Brake System Hydraulic Accum Temperature	0200-TIT-0012	Analog	ENET0400:3:I.Ch1Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Cooling Inlet Water Temp	0200-TIT-0013	Analog	ENET0400:3:I.Ch2Data

0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Cooling Outlet Water Temp	0200-TIT-0014	Analog	ENET0400:3:I.Ch3Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Cooling Inlet Water Flow	0200-FIT-0015	Analog	ENET0400:3:I.Ch4Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Cooling Outlet Water Flow	0200-FIT-0016	Analog	ENET0400:3:I.Ch5Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Cooling Circulating Pump	0200-HS-0017	Digital	ENET0300:5:I.Data.11
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Inlet Temp	0200-TIT-0018	Analog	ENET0400:3:I.Ch6Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Outlet Temp	0200-TIT-0019	Analog	ENET0400:3:I.Ch7Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill CycloConverter Inlet Pressure	0200-PIT-0019	Analog	ENET0400:4:I.Ch0Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Chilled Cooling Water Pump Inlet Pressure	0200-PIT-0020	Analog	ENET0400:4:I.Ch1Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Chilled Cooling Water Pump Outlet Pressure	0200-PIT-0021	Analog	ENET0400:4:I.Ch2Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Chilled Cooling Water Pump	0200-HS-0022	Digital	ENET0300:5:I.Data.12
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Chiller Cooling Unit	0200-HS-0023	Digital	ENET0300:5:I.Data.13
0200-SUM-0001	Sump 01	Sump Level	0200-LIT-0024	Analog	ENET0400:4:I.Ch3Data

0200-SUM-0001	Sump 01	Sump Density	0200-DIT-0025	Analog	ENET0400:4:I.Ch4Data
0200-SUM-0001	Sump 01	Sump Water Addition	0200-FIT-0026	Analog	ENET0400:4:I.Ch5Data
0200-SUM-0001	Sump 01	Sump Pump 01 Speed	0200-SIT-0027	Analog	ENET0400:4:I.Ch6Data
0200-SUM-0001	Sump 01	Sump Pump 02 Speed	0200-SIT-0028	Analog	ENET0400:4:I.Ch7Data
0210-HDC-0001	Hydrocyclone Bank	Hydrocyclone Bank Inlet Pressure	0210-PIT-0001	Analog	ENET0400:5:I.Ch0Data
0210-HDC-0001	Hydrocyclone Bank	Hydrocyclone Bank Inlet Flow	0210-FIT-0002	Analog	ENET0400:5:I.Ch1Data
0210-HDC-0001	Hydrocyclone Bank	Hydrocyclone Bank No of Opened Cyclones	0210-XIT-0003	Analog	ENET0400:5:I.Ch2Data
0210-BMG-0001	Ball Mill 01	Ball Mill Power	0210-UIT-0004	Analog	ENET0400:5:I.Ch3Data
0210-BMG-0001	Ball Mill 01	Ball Mill Speed	0210-SIT-0005	Analog	ENET0400:5:I.Ch4Data
0200-CRP-0001	Pebble Crusher	Pebble Crusher Mass Flow	0200-WIT-0029	Analog	ENET0400:5:I.Ch5Data
0200-SMG-0001	Sag Mill 01	Sag Mill Rejects	0200-WIT-0030	Analog	ENET0400:5:I.Ch6Data
0200-CRP-0001	Pebble Crusher	Pebble Crusher Running	0200-HS-0031	Digital	ENET0300:5:I.Data.14

Tabla A-1 – Lista de instrumentos IO configurados en controlador primario

### A.3 Parámetros de Estaciones

#### A.3.1 Servidor de Dominio

1.	Computer Name:		KEYWIN12-SVR01
1.1	Function:		Server Domain
1.2	OS:		Windows Server 2012R2
1.3	Username:		AUTOMATIONKEY\Administrator
1.4	Password:		P4ssw0rd
1.5	Domain:		AUTOMATIONKEY.local
1.6	Network 1:		Domain Network
	1.6.1	VM Network Type:	Bridged
	1.6.2	IP Address:	10.37.86.1
	1.6.3	Subnet Mask:	255.255.255.0
	1.6.4	DNS:	127.0.0.1
	1.6.5	Mac Address:	Auto
1.7	Network 2:		External Network
	1.7.1	VM Network Type:	NAT
	1.7.2	IP Address:	Auto
	1.7.3	Subnet Mask:	Auto
	1.7.4	DNS:	Auto
	1.7.5	Mac Address:	Auto

Tabla A-2 – Parámetros de Servidor de Dominio

#### A.3.2 Servidor de Modelamiento de Planta - Matlab

2.	Computer Name:		KEYWIN10-MTLB18
2.1	Function:		Matlab Engineering Station
2.2	OS:		Windows 10 Pro English x64
2.3	Username:		User01
2.4	Password:		Password
2.5	Domain:		AUTOMATIONKEY.local
2.6	Network 1:		Domain Network
	2.6.1	VM Network Type:	Bridged
	2.6.2	IP Address:	10.37.86.10
	2.6.3	Subnet Mask:	255.255.255.0
	2.6.4	DNS:	10.37.86.1
	2.6.5	Mac Address:	Auto
2.7	Network 2:		License Network

2.7.1	VM Network Type:	NAT
2.7.2	IP Address:	Auto
2.7.3	Subnet Mask:	Auto
2.7.4	DNS:	Auto
2.7.5	Mac Address:	Auto

Tabla A-3 – Parámetros de Servidor de Modelamiento en Matlab

### A.3.3 Estación de Ingeniería

3.	Computer Name:	KEYWIN10-RS5K32
3.1	Function:	Rockwell Software Engineering Station
3.2	OS:	Windows 10 Pro English x64
3.3	Username:	User01
3.4	Password:	Password
3.5	Domain:	AUTOMATIONKEY.local
3.6	Network 1:	Domain Network
3.6.1	VM Network Type:	Bridged
3.6.2	IP Address:	10.37.86.11
3.6.3	Subnet Mask:	255.255.255.0
3.6.4	DNS:	10.37.86.1
3.6.5	Mac Address:	Auto
3.7	Network 2:	License Network
3.7.1	VM Network Type:	NAT
3.7.2	IP Address:	Auto
3.7.3	Subnet Mask:	Auto
3.7.4	DNS:	Auto
3.7.5	Mac Address:	Auto

Tabla A-4 – Parámetros de Estación de Ingeniería

### A.3.4 Servidor de Sistema de Control Avanzado

4.	Computer Name:	KEYWIN16-APC1
4.1	Function:	APC Server Station
4.2	OS:	Windows 16 Server English x64
4.3	Username:	User01
4.4	Password:	Password
4.5	Domain:	AUTOMATIONKEY.local
4.6	Network 1:	Domain Network

	4.6.1	VM Network Type:	Bridged
	4.6.2	IP Address:	10.37.86.100
	4.6.3	Subnet Mask:	255.255.255.0
	4.6.4	DNS:	10.37.86.1
	4.6.5	Mac Address:	Auto
4.7	Network 2:		License Network
	4.7.1	VM Network Type:	NAT
	4.7.2	IP Address:	Auto
	4.7.3	Subnet Mask:	Auto
	4.7.4	DNS:	Auto
	4.7.5	Mac Address:	Auto

Tabla A-5 – Parámetros de Servidor de Sistema de Control Avanzado

A.3.5 Servidor de Sistema de Supervisión

5.	<u>Computer Name:</u>		KEYWIN16-FTVSVR
	5.1	Function:	APC Server Station
	5.2	OS:	Windows 16 Server English x64
	5.3	Username:	User01
	5.4	Password:	Password
	5.5	Domain:	AUTOMATIONKEY.local
	5.6	Network 1: Domain Network	
		5.6.1	VM Network Type: Bridged
		5.6.2	IP Address: 10.37.86.30
		5.6.3	Subnet Mask: 255.255.255.0
		5.6.4	DNS: 10.37.86.1
		5.6.5	Mac Address: Auto
	5.7	Network 2: License Network	
		5.7.1	VM Network Type: NAT
		5.7.2	IP Address: Auto
		5.7.3	Subnet Mask: Auto
		5.7.4	DNS: Auto
		5.7.5	Mac Address: Auto

Tabla A-6 – Parámetros de Servidor de Sistema de Supervisión