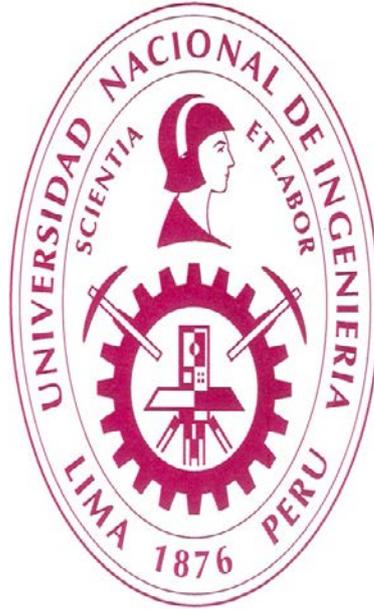


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA**



**IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA EXPERTO  
EN EL PROCESO DE MOLIENDA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALURGISTA**

**PRESENTADO POR:  
LUIS GABRIEL BELTRÁN CAJO**

**ASESOR  
ING. EDGAR FORTUNATO SEGURA TUMIALAN**

**LIMA – PERU  
2013**

## **DEDICATORIA**

A mi mami Dora por su ejemplo y su amor.

A mi shenke K. y a todas las personas que han contribuido en mi formación y crecimiento como persona.

## **RESUMEN**

El presente Informe de Suficiencia trata sobre la implementación de un Sistema Experto en el procesos de molienda de una concentradora con un circuito de molinos de barras – bolas y un molino unitario, este proyecto tenía objetivo el incremento del tonelaje y la reducción del variabilidad del tamaño de corte en la molienda unitaria y la disminución de la variabilidad de las principales variables operacionales en la molienda convencional.

El desarrollo del proyecto se realizó considerando como motor de inferencia la plataforma G2-Gensym de SGS – Division Advanced System el cual nos permitirá desarrollar un Sistema Experto Basado en Reglas, la base del conocimiento estará basada en reglas, considerando la forma de las reglas:

Antecedente → consecuente

Que son muy parecidas a la construcción IF ... THEN.

Dentro de los logros se incrementó el tonelaje molido en un 4.75% sin perjudicar el producto para la siguiente etapa de flotación, la cual tiene como indicador el % malla +65m habiendo esta disminuido también, conjuntamente con la variabilidad de estas señales.

## **ABSTRACT**

This Adequacy Report discusses the implementation of an Expert System in a milling step of a concentrator circuit rod mills - mill balls and unitary, this project was aimed at increasing the tonnage and reduction variability of cut milling size and decreasing the variability of the main operational variables in conventional milling.

Project development was carried out considering as inference engine platform SGS G2-Gensym - Division Advanced System which will allow us to develop a Rule Based Expert System; the knowledge base will be based on a rule, considering the shape of the rules:

antecedent → consequent

They are very similar to the IF ... THEN construct.

Among the achievements, the tonnage milled increased in 4.75% without harming the product to the next stage of flotation, which has as indicator the %mesh +65m having also a decrease, in conjunction with the variability of these signals.

## INDICE

<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>10</b>
<b>CAPITULO I: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
1.1. Antecedentes de los Sistemas de Control .....	12
1.2. Expansión y Surgimiento de los DCS's. ....	14
1.3. Introducción a los Sistemas Expertos.....	17
1.4. Historia de los S.E. ....	18
1.5. Definiciones de los S.E. ....	18
1.6. Ventajas de los S.E. ....	19
1.7. Limitaciones de los S.E. ....	19
1.8. Arquitectura Básica de los S. E. ....	20
<b>CAPITULO II: FUNDAMENTOS DE LA LOGICA FUZZY</b> .....	<b>23</b>
2.1. Lógica Fuzzy. ....	23
2.2. Ambigüedad contra Probabilidad. ....	23
2.3. Reglas Difusas IF-THEN. ....	24
<b>CAPITULO III: PLANTA DE MOLIENDA</b> .....	<b>26</b>
3.1. Descripción del Proceso de la Molienda en la Concentradora.....	26
3.2. Equipos y Función dentro del Proceso. ....	28
<b>CAPITULO IV: IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO EN EL PROCESO DE MOLIENDA</b> .....	<b>36</b>
4.1. Bridge.....	36
4.2. Molienda Convencional .....	36
4.3. Molienda Unitaria .....	40
4.4. Equipos Instalados Para la Implementación del Sistema Experto .....	42
4.5. Condiciones de Operación Requeridas para Sistema Experto Online.....	42
4.6. Puesta en Línea del Sistema Experto .....	48

4.7. Reglas del Sistema Experto. ....	51
4.7.1. Sistema Experto Molienda Convencional. ....	51
4.8. Regla Sobrecarga .....	54
4.9. Regla Descargado .....	60
<b>CAPITULO V: RESULTADOS</b> .....	<b>65</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>68</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>70</b>

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1.</b> Arquitectura de un Sistema de Control	15
<b>Figura 1.2.</b> DCS en una Concentradora	16
<b>Figura 1.3.</b> Componentes típicos de un Sistema Experto	21
<b>Figura 2.1.</b> Sistema de Control Difuso	24
<b>Figura 2.2.</b> Estructura del Sistema Difuso	25
<b>Figura 3.1.</b> Diagrama de Flujo Molienda Convencional.	27
<b>Figura 3.2.</b> Diagrama de Flujo Molienda Unitaria.	27
<b>Figura 3.3.</b> P&ID Molienda Unitaria.	35
<b>Figura 4.1.</b> Esquemática principal para una semisección de la Molienda Convencional.	39
<b>Figura 4.2.</b> Esquemática Principal para la Molienda Unitaria.	41
<b>Figura 4.3.</b> Tolva de Finos Requerida para SE Online	43
<b>Figura 4.4.</b> Señales de Campo en buena calidad al DCS.	44
<b>Figura 4.5.</b> Estabilidad para SE Online	46
<b>Figura 4.6.</b> Variador de la Bomba que Alimenta al Hidrociclón	47
<b>Figura 4.7.</b> Buena sintonía de los lazos de control.	48
<b>Figura 4.8.</b> Sistema Experto Online	49
<b>Figura 4.9.</b> Work Index	50
<b>Figura 4.10.</b> Tipos de Mineral	50
<b>Figura 4.11.</b> Jerarquía de Control	51
<b>Figura 4.12.</b> Botón Sobrecarga	52
<b>Figura 4.13.</b> Sets Defuzzy en Botón Sobrecarga	52
<b>Figura 4.14.</b> Conjunto Defuzzy de Agua Cajón	53

<b>Figura 4.15.</b> Conjunto Defuzzy de Splitter Sur	54
<b>Figura 4.16.</b> Evento Sobrecarga	55
<b>Figura 4.17.</b> Señales a evaluar en Lógica Sobrecarga	57
<b>Figura 4.18.</b> Conjunto Fuzzy Varianza Hz	57
<b>Figura 4.19.</b> Lógica Sobrecarga	58
<b>Figura 4.20.</b> Sets Defuzzy en Lógica Sobrecarga	59
<b>Figura 4.21.</b> Activación Lógica Descargado	60
<b>Figura 4.22.</b> Lógica Descargado	61
<b>Figura 4.23.</b> Conjuntos Defuzzy para activarse	61
<b>Figura 4.24.</b> Esquemática principal para una semisección de la Molienda Convencional.	63
<b>Figura 4.25.</b> Esquemática principal para la Molienda Unitaria.	64
<b>Figura 5.1.</b> Principales variables de evaluación de la implementación del Sistema Experto. Valores antes y después de la implementación.	66
<b>Figura 5.2.</b> Boxplot de evaluación de variables.	67

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 3.1.</b> Equipos Circuitos Barras-Bolas	29
<b>Tabla 3.2.</b> Equipos Circuito Molienda Unitaria	30
<b>Tabla 3.3.</b> Señales del DCS Circuito Molienda Bolas y Unitaria	31
<b>Tabla 3.4.</b> Equipos Circuito Molienda Barras	33
<b>Tabla 5.1.</b> Variables Operativas Sistema Experto.	64

## INTRODUCCION

Los objetivos que se planificaron alcanzar con la implementación del Sistema Experto han sido los siguientes:

1. Optimizar la capacidad de molienda de la Concentradora en diferentes condiciones de dureza del mineral (duro, normal o menos duro).
2. El producto de molienda (rebose de ciclones), debe tener características adecuadas para su mejor aprovechamiento en la siguiente etapa: flotación primaria (granulometría y porcentaje de sólidos). En la actualidad se produce una pulpa con P<sub>80</sub> en el rango de 180 a 190 micrones.
3. Reducir el consumo específico de energía a través del incremento del tonelaje procesado.
4. Al aplicar técnicas de optimización y control se espera mantener la estabilidad del proceso de molienda para satisfacción de nuestros clientes.
5. Mejorar la instrumentación de campo, incrementarla o hacerla más confiable e incrementar su disponibilidad.

La variabilidad del producto entregado era otro punto a considerar; en las primeras pruebas (sintonía gruesa) se tenía demasiada variabilidad en el tamaño de corte entregado por el analizador de partículas PSI; como se indicó anteriormente evaluado solamente en la molienda unitaria; esto debido a que la Planta de Molienda no llegaba a una estabilidad adecuada, sino que se tenían picos de tonelaje y como consecuencia se registraba efectos aguas abajo: se perjudicaba la recuperación en la flotación rougher.

La implementación de este Sistema Experto tuvo un periodo de implementación de 13 meses incluyendo las pruebas SAT (Site Acceptance Test).

1. La etapa inicial incluyó levantar información de la instrumentación de campo, esto significó tener un plan de mantenimiento de los sensores, actuadores e incluso compras de válvulas modulantes, todo ello en coordinación con los desarrollos en lógica del DCS para dar robustez a las acciones del experto y un plan de sintonía de los lazos de control para tener los mejores tiempos de respuesta cuando se trabajara en modo cascada.

El instrumento que evaluaría la acción del Sistema Experto sería el PSI por lo que era coherente que este tuviera una confiabilidad del 5% según lo que indica el Proveedor por lo que se incrementaron los muestreos para mejorar las curvas de calibración.

2. La segunda etapa consistió en el “diseño de las lógicas” basadas en las mejoras prácticas operacionales del personal de Operaciones Concentradora y la aceptación por parte de ellos, tendrían que ver al Sistema como un apoyo a sus labores y no como alguien con quien competir. La interacción y desarrollar el programa “a su lado” en la Sala de Control y hacerlos participes activos en las mejoras fue muy importante para alcanzar este objetivo.
3. La historización en el PI System de las señales del DCS (Sistema de Control Distribuido) y otras variables de ingreso manual ayudó a la evaluación estadística realizada antes y después de la implementación del sistema.

La toma de decisiones del Sistema Experto para variar el tonelaje está basada según la jerarquía de lógicas las que involucran el consumo de potencia de cada uno de los molinos en los circuitos convencionales.

# **CAPITULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1. Antecedentes de los Sistemas de Control**

Hacia inicios de los setenta la "Computación" había alcanzado un grado de desarrollo en el mundo administrativo y científico que hizo posible pensar en aplicarlo en el control automático de las industrias.

La utilización de controladores electrónicos había permitido implementaciones complejas, abriendo un importante campo para el desarrollo de nuevas aplicaciones que se vieron limitadas por lo costoso, poco flexible, y limitado de la tecnología.

Sin embargo el reemplazo no podía ser inmediato: la confiabilidad y seguridad son aspectos esenciales en la automatización industrial.

Los sistemas neumáticos y electrónicos habían demostrado un alto grado de confiabilidad en virtud de que las fallas eran limitadas a un solo elemento a la vez (por ejemplo: un controlador o un registrador), siendo el efecto de la falla acotado y en general dominable sin necesidad de detener la operación. Las grandes computadoras no tenían esa confiabilidad, y una falla afectaba gran parte de la planta (si no toda).

Por esa razón las primeras grandes computadoras se utilizaron actuando sobre controladores individuales en un modo conocido como "Control de Valores Deseados" (**Set Point Control - SPC**).

Los controladores electrónicos analógicos efectuaban el control en la forma convencional siendo supervisados y ajustados sus valores deseados por la

computadora, en función de algoritmos de optimización. La falla de la computadora no afectaba el control, dejando al sistema con los últimos valores deseados calculados.

Un aspecto a destacar fue que, a diferencia de las aplicaciones en los planos administrativos y científicos, en el área de control se necesitó del funcionamiento de las computadoras "en tiempo real", es decir que el procesamiento debía de ser lo suficientemente rápido como para resolver eventos y problemas que iban ocurriendo, en instantes.

Esta problemática era (y es) distinta a la de la mayoría de las exigencias computacionales administrativas. Tal vez el cálculo en sí no es complejo, pero sí lo es el procesamiento en forma recurrente y en fracciones de segundo de algoritmos sobre cientos de variables (a veces miles) que llegan desde el campo. A este procesamiento se deben sumar las exigencias de otros periféricos (como son las consolas de operación o las impresoras de eventos y alarmas) y las rutinas de chequeo y autodiagnóstico de los Procesadores.

En paralelo con el desarrollo del SPC en la década del 60's surgió la idea de trasladar todo el procesamiento de control hacia la computadora teniendo como interface tarjetas de entrada-salida (input-output cards, I/O cards) que hacían la conversión de las señales analógicas en digital (y viceversa) de y hacia campo.

Los mayores inconvenientes de este modo de control estaban en la falta de seguridad y continuidad operativo ante una falla (no tan infrecuente) de la computadora: la falla abarcaba toda la planta deteniéndola o lo que era peor llevándola a un estado impredecible potencialmente peligroso.

Dos alternativas surgieron para resolver estos problemas:

- Una computadora redundante a la espera de la falla a la que en ese momento se le transfería todo el control.
- Un panel con controladores e indicadores convencionales a los que en el momento de la falla le era transferido el control.
- Ambas alternativas presentaron problemas:

- El problema económico (prácticamente se duplicaba la instalación), o sea la inversión teniendo la mitad ociosa a la espera de una falla.
- La exigencia de tener el sistema de respaldo actualizado con los últimos valores, tanto de campo, como los modificados por los operadores en función del proceso. Esto requería una gran capacidad de cómputo así como una conmutación muy segura (sin saltos ni fallas).
- El problema del lenguaje de programación de las computadoras: el personal de planta no conocía los idiomas de programación que estaban reservados a personal especializado.

Estos problemas fueron importantes y dieron lugar a complejos análisis y desarrollos para simplificar la programación, como ser la configuración de las estrategias de control por medio de bloques o el seguimiento de variables actualizándolas en distintas unidades (tracking).

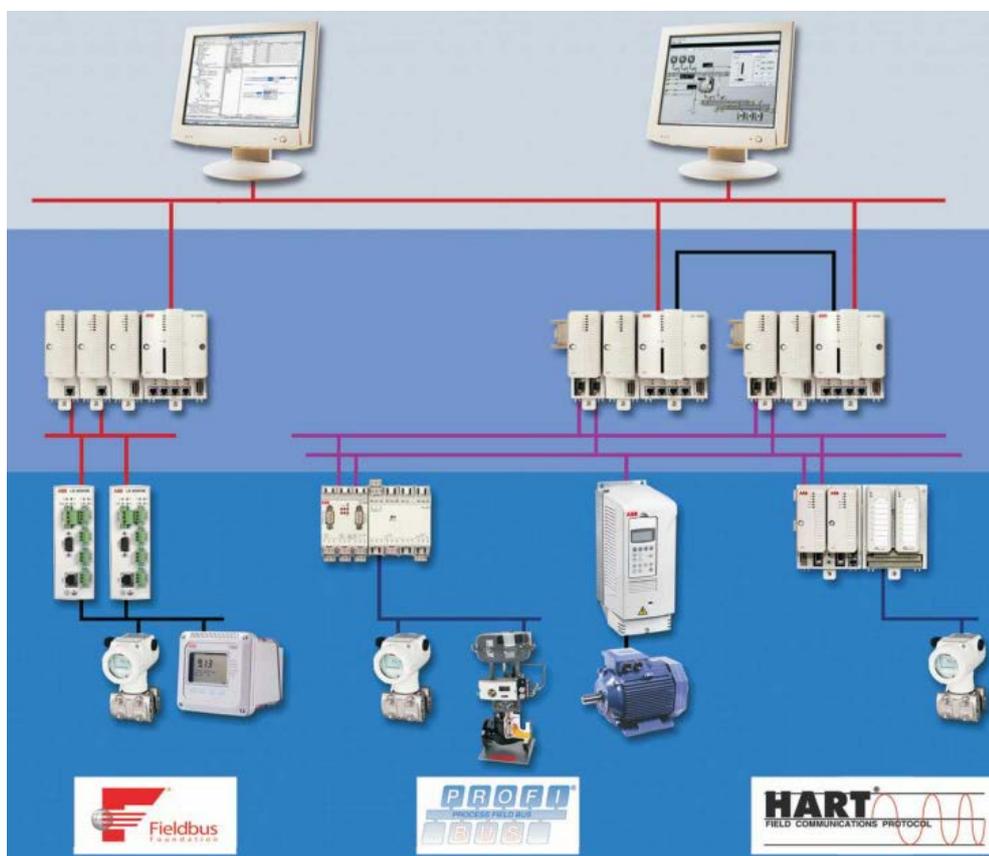
## **1.2. Expansión y Surgimiento de los DCS's.**

Sin embargo el desarrollo tecnológico y la disminución de costos asociados al procesamiento computacional vinieron en ayuda de los ingenieros de control: la aparición del microprocesador permitió tener en un pequeño espacio una gran capacidad de procesamiento.

Los **Sistemas de Control Distribuido (Distributed Control Systems, DCS)** fueron el siguiente paso: Distintas unidades de procesamiento con su correspondiente redundancia realizaron (y aún realizan) las distintas tareas requeridas, por ejemplo:

- Conversión de las señales analógicas de campo a digital y viceversa.
- Ejecución de los algoritmos de control.
- Interface con los operadores a través de estaciones que incluyen monitores (HMI's, SCADA's).
- Los procesadores se comunican a través de cables (llamados buses), los que permiten no sólo la distribución del procesamiento (y del riesgo), sino

también la distribución geográfica de los módulos con las consecuentes reducciones de cableados y costos asociados.



**Figura 1.1.** Arquitectura de un Sistema de Control

La aparición del control distribuido tuvo su origen hacia mediados de la década del 70, y pronto los nuevos proyectos y ampliaciones de planta los incluyeron, en lugar de los paneles de control.

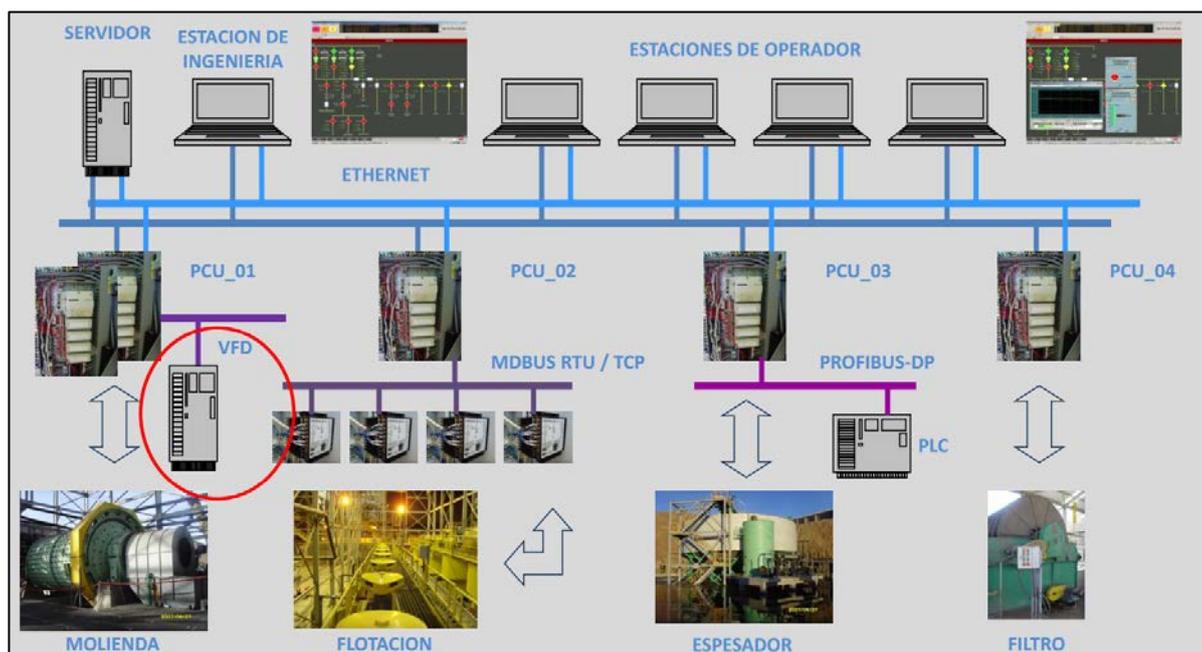
Incluso muchas plantas iniciaron el camino de la migración de las tecnologías anteriores hacia la digital a fin de aprovechar las ventajas que ésta le brinda.

Lo que hemos descrito, corresponde a la evolución de las “Plantas de Procesos Continuos”.

Las “Industrias Manufactureras” también tuvieron su desarrollo: los tableros de relees comenzaron a ser reemplazados por sistemas computacionales. Hacia fines de los 60’s y comienzos de los 70’s surgen los **Controladores Lógicos Programables (Programmable Logic Controller, PLC)**, con un nivel de

confiabilidad que permitió su utilización en reemplazo de los gabinetes de relees en el procesamiento de señales discretas.

Los PLC han ido evolucionando incorporando funcionalidades que le permiten el procesamiento analógico de datos, comunicación con otros sistemas, etc.



**Figura 1.2.** DCS en una Concentradora

Otra expansión importante fue la evolución de la programación de los sistemas aplicados al control. El personal de planta generalmente no estaba acostumbrado a los lenguajes de programación que se utilizaban en las computadoras, por lo que un importante avance fue la posibilidad de la configuración del control tanto en los Sistemas de Control Distribuido como en los PLC, a través de lenguajes que tuvieran similitud con lo que los ingenieros y operadores de planta conocían.

Para los Sistemas **DCS** fue a través de la configuración de **“bloques de control”**. Estos representaban estructuras de programación equivalentes a los instrumentos existentes (controladores, indicadores, relacionadores, etc.). Sólo se necesita completar en planillas prearmadas ciertos parámetros para quedar definidos.

Para los **PLC** la forma de programarlos se orientó hacia los ya mencionados **diagramas escalera (ladder)** o hacia las expresiones lógicas o booleanas.

Con estas posibilidades el procesamiento digital apareció como la alternativa más conveniente para cualquier expansión o proyecto nuevo, así como en reemplazo de anteriores tecnologías.

Desde mediados de los 70 hacia mediados de los 80 tuvo lugar una importante expansión del control digital, que no sólo alcanzó a los controladores sino que se reflejó también en los transmisores de campo que incluyeron tecnología digital en sus diseños (transmisores inteligentes).

La mayoría de las aplicaciones hasta entonces tenían como objetivo primario la utilización de los sistemas digitales en forma equivalente a la de la instrumentación tradicional, aprovechando las capacidades computacionales para realizar tareas complementarias como almacenamiento histórico de datos, reportes, manejo de alarmas, cálculos complejos, etc.

### **1.3. Introducción a los Sistemas Expertos**

Se considera a alguien un experto en un problema cuando este individuo tiene conocimiento especializado sobre dicho problema. En el área de los Sistemas Expertos (a partir de ahora denominado S.E.) a este tipo de conocimiento se le llama conocimiento sobre el dominio. La palabra dominio se usa para enfatizar que el conocimiento pertenece a un problema específico.

Antes de la aparición del ordenador, el hombre ya se preguntaba si se le arrebataría el privilegio de razonar y pensar. En la actualidad existe un campo dentro de la inteligencia artificial al que se le atribuye esa facultad: el de los S.E. Estos sistemas también son conocidos como Sistemas Basados en Conocimiento, los cuales permiten la creación de máquinas que razonan como el hombre, restringiéndose a un espacio de conocimientos limitado. En teoría pueden razonar siguiendo los pasos que seguiría un experto humano (médico, analista, empresario, etc.) para resolver un problema concreto. Este tipo de modelos de conocimiento por ordenador ofrece un extenso campo de posibilidades en resolución de problemas y

en aprendizaje. Su uso se extenderá ampliamente en el futuro, debido a su importante impacto sobre los negocios y la industria.

#### **1.4. Historia de los S.E.**

Sus inicios datan a mediados de los años sesenta. Durante esta década los investigadores Alan Newell y Herbert Simon desarrollaron un programa llamado GPS (General Problem Solver; solucionador general de problemas).

Algunos investigadores decidieron entonces cambiar por completo el enfoque del problema restringiendo su ambición a un dominio específico e intentando simular el razonamiento de un experto humano. En vez de dedicarse a computarizar la inteligencia general, se centraron en dominios de conocimiento muy concretos. De esta manera nacieron los S.E.

En la década de los ochenta se ponen de moda los S.E., numerosas empresas de alta tecnología investigan en esta área de la inteligencia artificial, desarrollando S.E. para su comercialización. Se llega a la conclusión de que el éxito de un S.E. depende casi exclusivamente de la calidad de su base de conocimiento. El inconveniente es que codificar la pericia de un experto humano puede resultar difícil, largo y laborioso. Un ejemplo de S.E. moderno es CASHVALUE, que evalúa proyectos de inversión y VATIA, que asesora acerca del impuesto sobre el valor añadido.

#### **1.5. Definiciones de los S.E.**

Es un software que imita el comportamiento de un experto humano en la solución de un problema. Pueden almacenar conocimientos de expertos para un campo determinado y solucionar un problema mediante deducción lógica de conclusiones.

Son S.E. aquellos programas que se realizan haciendo explícito el conocimiento en ellos, que tienen información específica de un dominio concreto y que realizan una tarea relativa a este dominio.

Programas que manipulan conocimiento codificado para resolver problemas en un dominio especializado en un dominio que generalmente requiere de experiencia humana. Programas que contienen tanto conocimiento declarativo (hechos a cerca de objetos, eventos y/o situaciones) como conocimiento de control (información acerca de los cursos de una acción), para emular el proceso de razonamiento de los expertos humanos en un dominio en particular y/o área de experiencia.

#### **1.6. Ventajas de los S.E.**

- a. Estos programas proporcionan la capacidad de trabajar con grandes cantidades de información, que son uno de los grandes problemas que enfrenta el analista humano que puede afectar negativamente a la toma de decisiones pues el analista humano puede depurar datos que no considere relevantes, mientras un S.E. debido a su gran velocidad de proceso analiza toda la información incluyendo las no útiles para de esta manera aportar una decisión más analizada.
- b. Ayuda a estandarizar las prácticas diarias incluyendo las mejores prácticas operacionales identificadas y validadas, ello ya es una mejora dado que los usuarios buscarán comprender el funcionamiento del sistema y su forma de “pensar” ante una determinada situación.

#### **1.7. Limitaciones de los S.E.**

Es evidente que para actualizar se necesita de reprogramación de estos, otra de sus limitaciones puede ser el elevado costo en dinero y tiempo.

Además que estos programas son poco flexibles a cambios y de difícil acceso a información no estructurada, en la actualidad este punto está siendo mejorado con la implementación de herramientas específicas para desarrollo de lógica en los DCS (Sistemas de Control Distribuido) como:

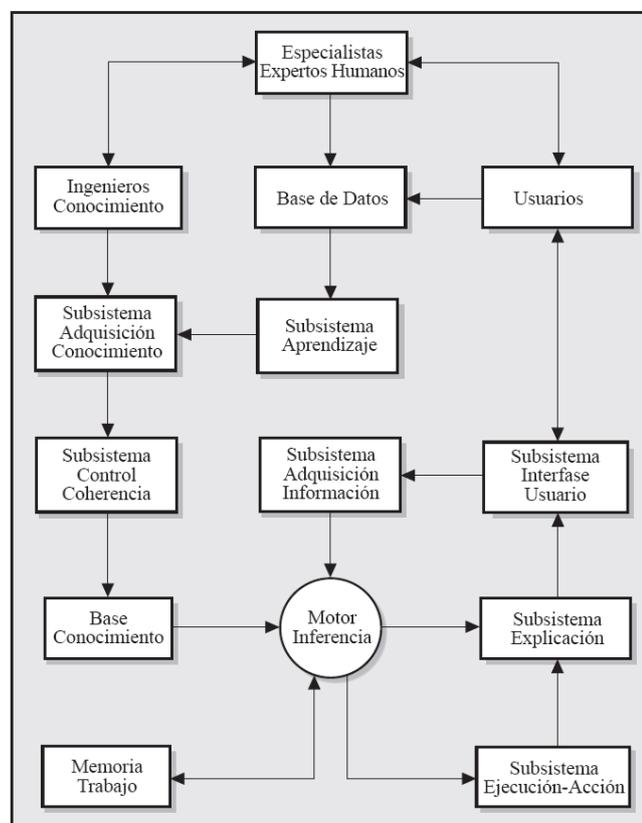
- Rockwell Software: Ha desarrollado el Fuzzy Designer, un conjunto de librerías de lógica fuzzy para aplicarlo bajo la plataforma de los Control Logix (PLC con características más robustas y más funcionalidades).
- ABB: Esta empresa Suiza ha desarrollado librerías para implementación de lógicas fuzzy orientadas al sector minero,
- Estas herramientas buscarían competir con los software propietarios de METSO, G2-SGS (como en el caso de este Informe) entre otros, con la finalidad de ofrecer una plataforma de control desde los buses de campo hasta las lógicas de optimización de procesos basadas en control avanzado.
- Estas herramientas también ofrecerían mayor flexibilidad a los clientes, dado que su implementación ya no dependería de personal específico, sino que se daría la misma transición que se tuvo con los lenguajes de programación de los DCS's.

Por otra parte la inteligencia artificial aún no ha podido desarrollar sistemas que sean capaces de resolver problemas de manera general, de aplicar el sentido común para resolver situaciones complejas ni de controlar situaciones ambiguas.

### **1.8. Arquitectura Básica de los S. E.**

- a. **Base de conocimientos.** Es la parte del sistema experto que contiene el conocimiento sobre el dominio. hay que obtener el conocimiento del experto y codificarlo en la base de conocimientos. Una forma clásica de representar el conocimiento en un sistema experto son las reglas. Una regla es una estructura condicional que relaciona lógicamente la información contenida en la parte del antecedente con otra información contenida en la parte del consecuente.

- b. **Base de hechos (Memoria de trabajo).** Contiene los hechos sobre un problema que se han descubierto durante una consulta. Durante una consulta con el sistema experto, el usuario introduce la información del problema actual en la base de hechos. El sistema empareja esta información con el conocimiento disponible en la base de conocimientos para deducir nuevos hechos.
- c. **Motor de inferencia.** El sistema experto modela el proceso de razonamiento humano con un módulo conocido como el motor de inferencia. Dicho motor de inferencia trabaja con la información contenida en la base de conocimientos y la base de hechos para deducir nuevos hechos. Contrasta los hechos particulares de la base de hechos con el conocimiento contenido en la base de conocimientos para obtener conclusiones acerca del problema.



**Figura 1.3.** Componentes típicos de un Sistema Experto.

- d. **Subsistema de explicación.** Una característica de los sistemas expertos es su habilidad para explicar su razonamiento. Usando el módulo del subsistema de explicación, un sistema experto puede proporcionar una explicación al usuario de por qué está haciendo una pregunta y cómo ha llegado a una conclusión. Este módulo proporciona beneficios tanto al diseñador del sistema como al usuario. El diseñador puede usarlo para detectar errores y el usuario se beneficia de la transparencia del sistema.
  
- e. **Interfaz de usuario.** La interacción entre un sistema experto y un usuario se realiza en lenguaje natural. También es altamente interactiva y sigue el patrón de la conversación entre seres humanos. Para conducir este proceso de manera aceptable para el usuario es especialmente importante el diseño del interfaz de usuario. Un requerimiento básico del interfaz es la habilidad de hacer preguntas. Para obtener información fiable del usuario hay que poner especial cuidado en el diseño de las cuestiones. Esto puede requerir diseñar el interfaz usando menús o gráficos.

Los primeros sistemas expertos que se desarrollaron en los años 60 eran capaces de resolver solo problemas basados en situaciones determinadas, mediante sistemas de reglas. Es a partir de los 70 cuando se empiezan a resolver problemas basados en situaciones inciertas, basados en medidas difusas al principio y en redes probabilísticas con posterioridad.

## **CAPITULO II**

### **FUNDAMENTOS DE LA LOGICA FUZZY**

#### **2.1. Lógica Fuzzy.**

Lotfi Zadeh inventó la lógica difusa en base a los conjuntos difusos, la cual surge en los procesos de decisión las conclusiones no siempre pueden tener estrictamente la forma de si/no, verdadero/falso.

La palabra fuzzy se podría definir como algo difuso, ambiguo, vago.

La lógica difusa es una extensión de la lógica convencional (Booleana) para manejar el concepto de verdad parcial.

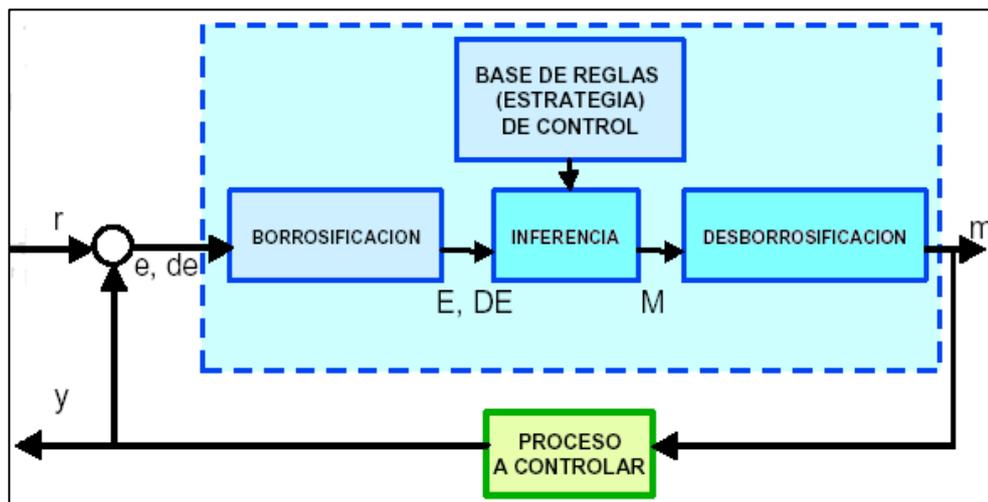
El control difuso proporciona una metodología formal para representar, manipular e implementar conocimiento heurístico humano de cómo se debe controlar un sistema.

El control difuso involucra la incorporación a través de un conjunto de reglas.

#### **2.2. Ambigüedad contra Probabilidad**

La ambigüedad es una característica del lenguaje humano. Por ejemplo:

- Si estudias bastante entonces obtendrás buenas notas.
- Si el profesor es buena gente entonces el examen será fácil.



**Figura 2.1.** Sistema de Control Difuso.

La ambigüedad es una incertidumbre determinística, la probabilidad es no determinística. La incertidumbre probabilística se disipa con el incremento del número de ocurrencias y la difusividad no lo hace. La ambigüedad describe eventos ambiguos, la probabilidad describe los eventos que ocurren.

### 2.3. Reglas Difusas IF-THEN

- Los conjuntos y los operadores difusos son los sujetos y predicados de la lógica difusa. Las reglas if-then son usadas para formular las expresiones condicionales que abarca la lógica difusa.

if  $x$  is  $A$  then  $y$  is  $B$ .

Donde  $A$  y  $B$  son los valores lingüísticos definidos por los conjuntos definidos en los rangos de los universos de discurso llamados  $X$  e  $Y$ , respectivamente.

La parte if de la regla ' $x$  es  $A$ ' es llamada el antecedente o premisa, mientras la parte then de la regla ' $y$  es  $B$ ' es llamada la consecuencia o conclusión.

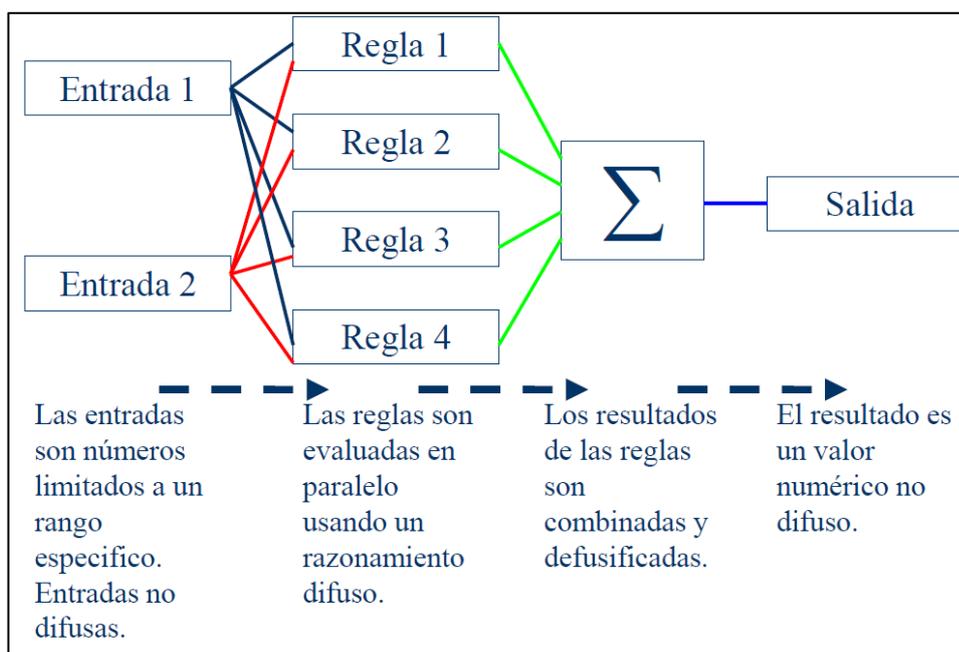
La fusificación de las variables de entrada.

Aplicación del operador difuso (AND ó OR) en el antecedente.

Implicación del antecedente con el consecuente.

Agregación de los consecuentes a través de las reglas.

La defusificación.



**Figura 2.2.** Estructura del Sistema Difuso.

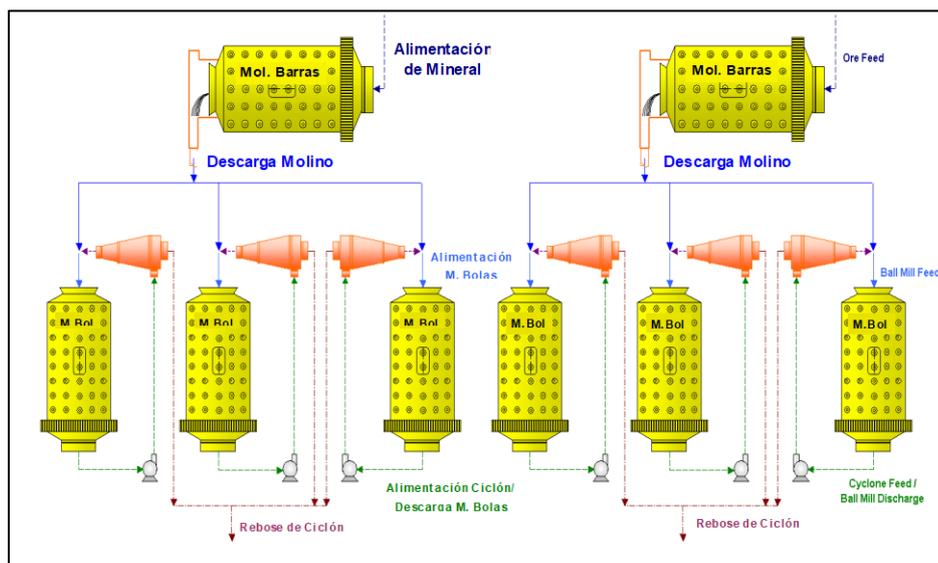
## **CAPITULO III**

### **PLANTA DE MOLIENDA**

#### **3.1. Descripción del Proceso de la Molienda en la Concentradora**

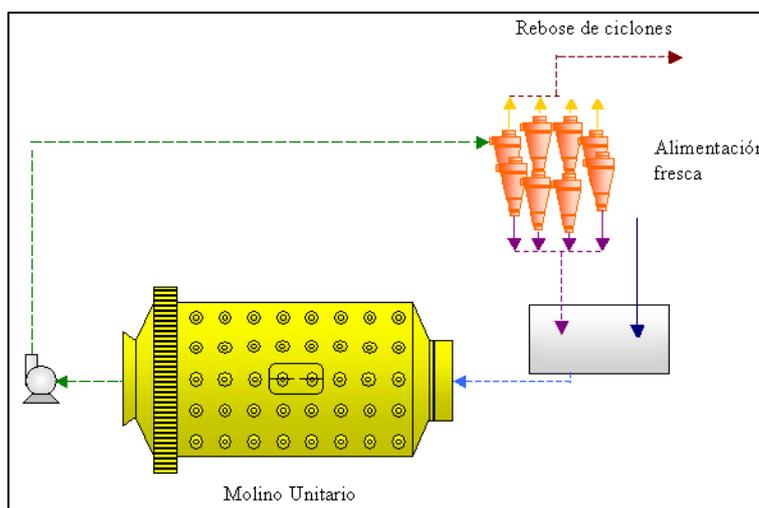
La Concentradora tiene una capacidad nominal de molienda de 60,000 TM por día de mineral pórfido de Cobre procedente de la mina a tajo abierto distante a 7 Km. El mineral es procesado en las siguientes etapas: chancado, molienda, flotación, planta de Molibdeno, filtración y espesamiento de relaves. Se obtiene como producto principal concentrado de Cobre y como subproducto concentrado de Molibdeno. El proceso de molienda, que se presenta en este informe, comprende cinco secciones independientes, cuatro de ellas formadas por circuitos convencionales de molinos de barras y bolas, y la quinta sección constituida por un molino unitario.

Cada sección convencional está formada por dos molinos de barras (molienda primaria) de 10 pies de diámetro por 14 pies de longitud los cuales operan en circuito abierto, cada uno de ellos envía su descarga a la alimentación de tres molinos de bolas (molienda secundaria) de 10.5 pies de diámetro por 13 pies de longitud los cuales operan, de manera independiente, en circuito cerrado con un ciclón D26. En la molienda convencional se procesa aproximadamente el 80% del mineral alimentado a la planta.



**Figura 3.1.** Diagrama de Flujo Molienda Convencional.

La quinta sección de molienda está conformada por un molino unitario de bolas de 21 pies de diámetro por 33.5 pies de longitud que trabaja en circuito cerrado con una batería de 8 ciclones D26. En esta sección de molienda se procesa aproximadamente el 20% del mineral alimentado a la planta. (Figura 3.2)



**Figura 3.2.** Diagrama de Flujo Molienda Unitaria.

La molienda entrega un producto en el rebose de ciclones con un  $P_{80}$  de 180 a 190 micrones que equivale aproximadamente 16% acumulado retenido sobre la malla +65.

### **3.2. Equipos y Función dentro del Proceso**

En la tabla 3.1 se listan los equipos que se tiene implementado en la etapa de molienda así como las señales de monitoreo y de control hacia el DCS y los lazos de control que lo conforman.

La planta tiene varias décadas funcionando por lo que su instrumentación es básica sobre todo en los circuitos de molienda barras-bolas donde se tiene del espacio requerido para colocar flujómetros en la alimentación a los hidrociclones o densímetros. Sin embargo en el circuito de la molienda unitaria; que fue parte de una expansión; se tuvieron las consideraciones de instrumentación de campo acorde a la tecnología de esos años por lo que estos inputs serían muy importantes para la etapa de implementación del Sistema Experto.

Mención aparte tiene los splitters; distribuidores de pulpa hacia los 3 molinos de bolas; de estos dependía que la pulpa sea homogéneamente distribuida a los molinos, se identificó que un desnivel de los cajones de paso podían influir considerablemente en el % sólidos y por ende en la distribución de carga, pudiendo ser generador de eventos de sobrecarga o descarga. Por la zona y la exposición a la alta abrasión de la pulpa no se encontraba un sensor robusto que diera el feedback de la posición del actuador.

**Tabla 3.1.** Equipos Circuitos Barras-Bolas.

	Unidades	Señales de monitoreo al DCS	Señales de control al DCS	Lazos de control
<b>Tolva de finos</b>	32	nivel de la tolva (sensor de	-	-
<b>Fajas transportadoras con variadores por cada tolva.</b>	16	status running	start/stop	-
	16	feedback % velocidad del variador	% out al variador del motor	
<b>Fajas transportadoras sin variadores por cada tolva.</b>	16	status running	start/stop	-
<b>Fajas alimentadoras al Molino</b>	16	status running	start/stop	-
	8	pesómetro	-	Lazo de control de Tonelaje al molino de barras, se actúa sobre el % out de los variadores de las fajas de cada bin.
<b>Splitters (Distribuidores de pulpa)</b>	8	-	% out del actuador	-
<b>Molino de Barras</b>	1	status running	start/stop	-
	1	Potencia del molino	-	-
	1	Flujo de agua que ingresa al molino	% out válvula de agua	Lazo de control de agua en cascada con el % sólidos que ingresa el operador.
<b>Molino de Bolas</b>	3	status running	-	-
	3	Potencia del molino	-	-
	3	Flujo de agua que ingresa con el flujo under de los hidrociclones	% out válvula de agua	Lazo de control con el Set Point que ingresa el Operador.
<b>Cajones de las bombas</b>	3	Flujo de agua al cajón de las bombas	% out válvula de agua	Lazo de control con el Set Point que ingresa el Operador.
	3	Nivel de llenado de los cajones de las bombas	-	Lazo de control en cascada, se actúa sobre el % out del variador del motor de la bomba.
<b>Bombas de alimentación a los hidrociclones</b>	3	Frecuencia de los variadores de los motores de las bombas	% out variador del motor de la bomba	-
	3	Amperaje del motor de la bomba	-	-
<b>Hidrociclones</b>	3	Presión de alimentación al hidrociclón	-	-

**Tabla 3.2.** Equipos Circuito Molienda Unitaria.

	Unidades	Señales de monitoreo al DCS	Señales de control al DCS	Lazos de control
<b>Tolva de finos</b>	4	nivel de la tolva (sensor de	-	-
<b>Fajas transportadoras con variadores por cada tolva.</b>	4	status running	start/stop	-
	4	feedback % velocidad del variador	% out al variador del motor	
<b>Fajas alimentadoras al Molino</b>	1	status running	start/stop	-
	1	pesómetro	-	Lazo de control de Tonelaje al molino de barras, se actúa sobre el % out de los variadores de las fajas de cada bin.
<b>Molino Unitario de Bolas</b>	1	status running	start/stop	-
	1	Potencia del molino	-	-
	1	Flujo de agua que ingresa al molino	% out válvula de agua	Lazo de control de agua en cascada con el % sólidos que ingresa el operador.
<b>Cajones de las bombas</b>	1	Flujo de agua al cajón de las bombas	% out válvula de agua	Lazo de control con el Set Point que ingresa el Operador.
	1	Nivel de llenado del cajón de la bomba	-	Lazo de control en cascada, se actúa sobre el % out del variador del motor de la bomba.
<b>Bombas de alimentación a los hidrociclones</b>	1	Frecuencia del variador del motor de la bomba	% out variador del motor de la bomba	-
	1	Amperaje del motor de la bomba	-	-
<b>Nido de Hidrociclones</b>	1	Densímetro en la línea que alimenta al nido de hidrociclones	-	-
	1	Flujómetro en la línea que alimenta al nido de hidrociclones	-	-
	8	Presión de alimentación al hidrociclón	-	-
	8	Válvulas on/off de apertura de pulpa para cada hidrociclón		
<b>PSI (Particle Size Indicator)</b>	1	% +65m	-	-

**Tabla 3.3.** Señales del DCS Circuito Molienda Bolas y Unitaria

Module	Variable name	Process Value	Type	GES Internal / External	R/W	Tag Name	Comment
Communications	Expert Heartbeat Out	current value	Integer	External	R/W	Existent	Alternate 0/1 sent to DCS from MEC
	Expert Heartbeat In	current value	Integer	External	R	Existent	Alternate 0/1 sent to MEC from DCS
Expert Mode	Rod Feed Supervisory Mode Selector	current value	Integer	External	R	New	operator selection sent from Delta V to MEC; 0=MEC advisory, 1=MEC supervisory
	Cyclone Pump Speed Supervisory Mode Selector	current value	Integer	External	R	New	operator selection sent from Delta V to MEC; 0=MEC advisory, 1=MEC supervisory
Stockpile	Level	current value	Float	External	R	Existent	
Feeders	Belt Conveyor 1 speed	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 1
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1
		process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2
		expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2
	Belt Conveyor 2 speed	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 1
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1
		process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2
		expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2
	Belt Conveyor 3 speed	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 1
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1
		process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2
		expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2
		Belt Conveyor 3 speed	current value	Float	External	R	Existent
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1
		process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2
		expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2
Split (Cameras)	F80	current value	Float	External	R	New	current value of the feed F80, microns
	Topsize	current value	Float	External	R	New	current value of the feed topsize, microns
		high	Float	External	R	New	operator input: coarse size, microns
Ball Mill	kW	current value	Float	External	R	Existent	current value of Ball Mill power
		target	Float	External	R	N/A	operator input: desired process value for Ball Mill power
		max	Float	External	R	New	
		min	Float	External	R	New	
	Water Addition	process sp	Float	External	R	New	setpoint requested for the BM Water
		expert sp	Float	External	R/W	New	expert setpoint request for the BM Water
		current value	Float	External	R	New	current value of the BM Water
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the BM Water
	min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the BM Water	
Cyclone Pump Box	Level	current value	Float	External	R	Existent	current value of cyclone pump box level
		target	Float	External	R	Existent	operator input: the limit at which operator takes action to correct
		max	Float	External	R	New	
		min	Float	External	R	New	
	Water Addition	process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
		expert sp	Float	External	R/W	New	expert setpoint request for the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
		current value	Float	External	R	Existent	current value of the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
	min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for Process Water Flow to Cyclone Feed Sump	

**Tabla 3.3. (Continuación) Señales del DCS Circuito Molienda Bolas y Unitaria**

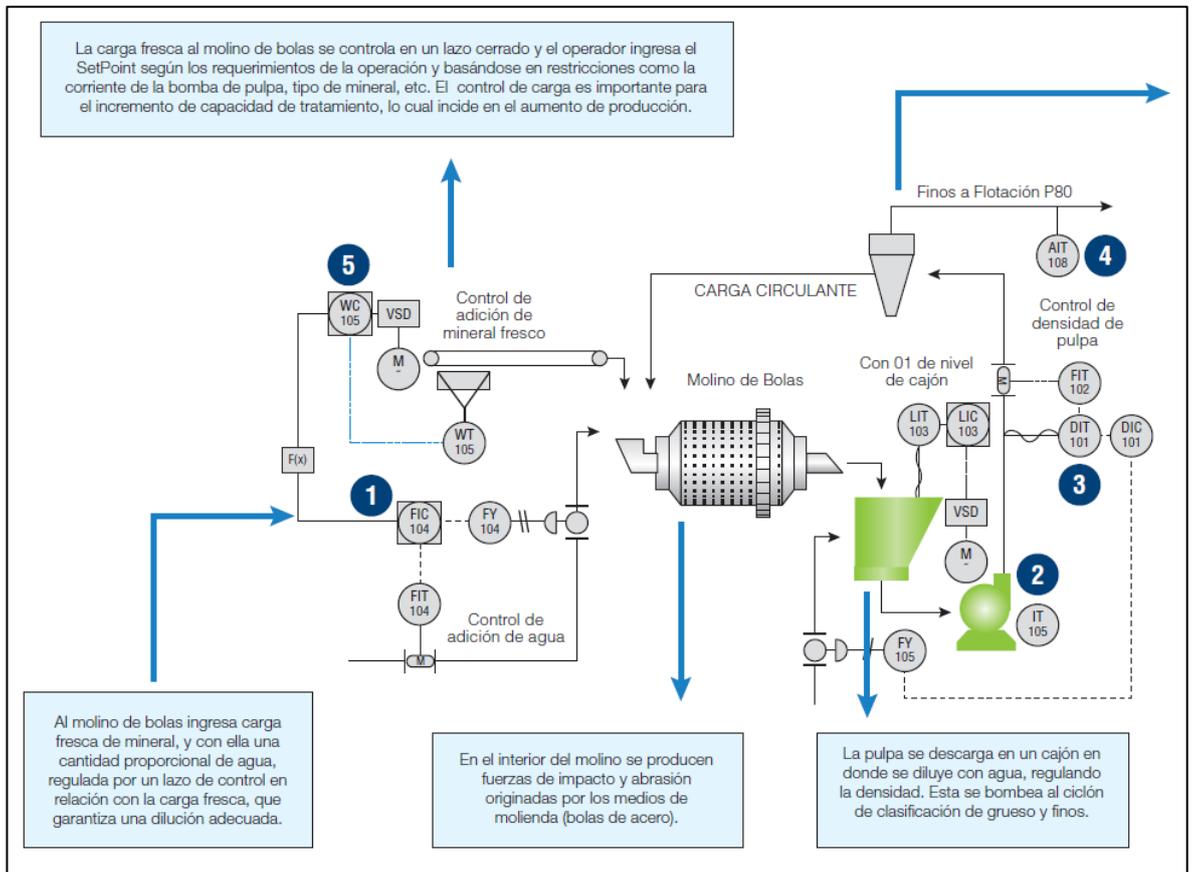
Cyclone Pumps	Pump 1 & 2 Amps	process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the cyclone feed pump speed
		expert sp	Float	External	R/W	New	expert setpoint request for the cyclone feed pump speed
		current value	Float	External	R	Existent	current value of the cyclone feed pump speed
		max	Float	External	R	New	operator input:maximum value allowed for cyclone feed pump speed
		min	Float	External	R	New	operator input:minimum value allowed for the cyclone feed pump speed
	Pump 1 & 2 Speed	process sp	Float	External	R	Existent	
		expert sp	Float	External	R/W	New	
		current value	Float	External	R	Existent	
Cyclone Pak		max	Float	External	R	New	
		min	Float	External	R	New	
	Pressure	current value	Float	External	R	Existent	current value
		target	Float	External	R	new	operator input: Target value
		max	Float	External	R	New	
		min	Float	External	R	New	
	Feed Flow	current value	Float	External	R	Existent	current value
		target	Float	External	R	Existent	operator input: Target value
	Feed Density	current value	Float	External	R	Existent	current value
		target	Float	External	R	Existent	operator input: Target value
Krebs Cyclone		position	Integer	External	R	Existent	current valve position open or closed
		available	Integer	External	R	Existent	available for use by expert system
		status	Integer	External	R	Existent	limit switch position
		request to open/close	Integer	External	R/W	Existent	Open or Close Request
PSI	65 mesh	current value	Float	External	R	Existent	current value of P80, microns
		target	Float	External	R	Existent	operator input: Target value for P80, microns
	48 mesh	current value	Float	External	R	Existent	current value of percentage of minus 70 microns
		target	Float	External	R	Existent	operator input: Target value for percentage of minus 70 microns
	Topsize	current value	Float	External	R	Existent	current value of product toplevel, microns
		target	Float	External	R	Existent	operator input: Target value for product toplevel, microns

**Tabla 3.4.** Señales del DCS Circuito Molienda Barras

Module	Variable name	Process Value	Type	GES Internal / External	R/W	Tag Name	Comment
Communications	Expert Heartbeat Out	current value	Integer	External	R/W	Existent	Alternate 0/1 sent to DCS from MEC
	Expert Heartbeat In	current value	Integer	External	R	Existent	Alternate 0/1 sent to MEC from DCS
Expert Mode	Rod Feed Supervisory Mode Selector	current value	Integer	External	R	New	operator selection sent from Delta V to MEC; 0=MEC advisory, 1=MEC supervisory
	Cyclone Pump Speed Supervisory Mode Selector	current value	Integer	External	R	New	operator selection sent from Delta V to MEC; 0=MEC advisory, 1=MEC supervisory
Stockpile	Level	current value	Float	External	R	Existent	
Feeders	Belt Conveyor 1 speed	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 1
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1
		process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2
		expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2
	Belt Conveyor 2 speed	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 1
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1
		process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2
		expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2
	Belt Conveyor 3 speed	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 1
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1
		process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2
		expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2
	Belt Conveyor 4 speed	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 1
max		Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the speed of feeder 1	
	min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the speed of feeder 1	
	process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the speed for feeder 2	
	expert sp	Float	External	R/W	Existent	expert setpoint request for the speed of feeder 2	
Split (Cameras)	F80	current value	Float	External	R	New	current value of the feed F80, microns
	Topsize	current value	Float	External	R	New	current value of the feed topsize, microns
		high	Float	External	R	New	operator input: coarse size, microns
Rod mill	Load	current value	Float	External	R	Existent	current value of the tonnage
		high	Float	External	R	New	operator input: the limit at which operator takes action to correct
	kW	current value	Float	External	R	Existent	current value of the speed of feeder 3
		high	Float	External	R	New	operator input: the limit at which operator takes action to correct
	Density	process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the Rod density
		expert sp	Float	External	R/W	New	expert setpoint request for the Rod density
		current value	Float	External	R	Existent	current value of the Rod density
		max	Float	External	R	New	operator input: maximum value allowed for the Rod density
		min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for the Rod density
	Rod Inlet Water	flow	Float	External	R	Existent	the current value of the water flowrate to the Rod inlet
		Flow SP	Float	External	R	Existent	
		low	Float	External	R	New	operator input: minimum water flowrate allowed for Rod inlet water
	output	Float	External	R	Existent	the % output of the Rod inlet water valve	
Load Distribution	Distributor splitter location	Current value				Existent	
		Process SP				New	
		Expert SP				New	

**Tabla 3.4.(Continuación) Señales del DCS Circuito Molienda Barras**

Ball Mill	kW	current value	Float	External	R	Existent	current value of Ball Mill power
		target	Float	External	R	N/A	operator input: desired process value for Ball Mill power
	Water Addition	process sp	Float	External	R	New	setpoint requested for the BM Water
		expert sp	Float	External	R/W	New	expert setpoint request for the BM Water
		current value	Float	External	R	New	current value of the BM Water
		max	Float	External	R	New	operator input:maximum value allowed for the BM Water
		min	Float	External	R	New	operator input:minimum value allowed for the BM Water
Cyclone Pump Box	Level	current value	Float	External	R	Existent	current value of cyclone pump box level
		target	Float	External	R	Existent	operator input:the limit at which operator takes action to correct
		max	Float	External	R	New	
		min	Float	External	R	New	
	Water Addition	process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
		expert sp	Float	External	R/W	New	expert setpoint request for the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
		current value	Float	External	R	Existent	current value of the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
		max	Float	External	R	New	operator input:maximum value allowed for the Process Water Flow to Cyclone Feed Sump
	min	Float	External	R	New	operator input: minimum value allowed for Process Water Flow to Cyclone Feed Sump	
Pump A Hertz	process sp	Float	External	R	Existent	setpoint requested for the cyclone feed pump speed	
	expert sp	Float	External	R/W	New	expert setpoint request for the cyclone feed pump speed	
	current value	Float	External	R	Existent	current value of the cyclone feed pump speed	
	max	Float	External	R	New	operator input:maximum value allowed for cyclone feed pump speed	
	min	Float	External	R	New	operator input:minimum value allowed for the cyclone feed pump speed	
Cyclone Pak	Pressure	current value	Float	External	R	Existent	current value
		target	Float	External	R	new	operator input: Target value
		max	Float	External	R	New	
		min	Float	External	R	New	



**Figura 3.3. P&ID Molienda Unitaria.**

## **CAPITULO IV**

### **IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO EN EL PROCESO DE MOLIENDA**

#### **4.1. Bridge**

Es el programa de comunicación que intercambia datos del DCS (Infi90 de ABB) al Sistema Experto (Plataforma G2-Gensym). La interfase es una herramienta orientada a red para el desarrollo de interfaces o puentes entre el Sistema Experto de tiempo real y otros sistemas externos; dicho puente permite el mapeo de variables en una base de conocimientos a puntos de datos del sistema de control.

#### **4.2. Molienda Convencional**

La premisa básica tanto para la Molienda Convencional y la Molienda Unitaria es que las condiciones de sobrecarga o sobreflujo deben direccionarse y satisfacerse antes de que pueda ocurrir alguna optimización del proceso, por lo tanto, el sistema intentará mantener las variables de control en sus respectivos objetivos, haciendo los cambios en las variables manipuladas.

El Sistema Experto basa su operación en el análisis de reglas que han sido evaluadas por los diferentes Departamentos de la Concentradora: Operaciones, Control de Procesos y Metalurgia, las mismas que han sido expresadas en el Sistema Experto como lógica difusa.

La regla es la forma más común de representar el conocimiento por su gran sencillez y por ser la formulación más inmediata del principio de causalidad (causa-efecto). Una regla consta de un conjunto de acciones o efectos y la potencia de una regla es función de la lógica que admita en las expresiones de las condiciones y sus conclusiones

Estas reglas deberán ser evaluadas (scan) cada tiempo “t” definido para la regla en mención y esto debido a que se tiene que esperar la respuesta del lazo de control y la respuesta de la variable a evaluar (de este modo evitamos tomar acción cuando se está rumbo a la estabilización), el proceso de definición de estos tiempos se llama “Sintonía Gruesa y Sintonía Fina”.

Se utiliza lógica difusa para manejar de manera adecuada diversos escenarios de una misma variable, e.g. si la granulometría está baja, entonces el tonelaje podrá ser incrementado en cierto grado observando a la vez otras variables: perturbación de la presión de alimentación a los hidrociclones, niveles de cajón, frecuencia de la bomba, etc.

Para la molienda convencional el incremento o reducción del tonelaje procesado depende principalmente de la pendiente del valor del consumo de energía de los molinos de bolas la cual es revisada por el sistema cada 600 seg. Por ejemplo si la pendiente es positiva significa que el molino se está descargando y por ende se puede incrementar el tonelaje, en caso contrario con pendiente negativa el molino se estaría sobrecargando y se reduciría el tonelaje alimentado para evitar problemas operativos como la generación de un producto grueso para la flotación.

Un factor importante en el Sistema Experto de la molienda convencional es la distribución de pulpa en la descarga del molino de barras para alimentar a los molinos de bolas. Para esto el Sistema Experto evalúa la desviación estándar de la población de datos de las variables: frecuencia de la bomba del ciclón, nivel de cajón de la bomba y la presión al ciclón de clasificación, en los últimos 300 seg. En el caso de que alguna de las anteriores variables superen sets definidos, el Sistema Experto ejecuta una regla que considera corregir el estado de sobrecarga de cada molino y por

ende redistribuye la carga hacia los otros molinos de bolas; en el caso que la sobrecarga se presente en 2 o 3 molinos a la vez, el Sistema Experto considera ejecutar una disminución del tonelaje procesado. La pantalla general contiene los lazos de control, elementos de campo y los flujos de procesos, así como las entradas y salidas hacia el APC (Advanced Controller) que es el controlador para una determinada semi-sección. (Figura 4.1)

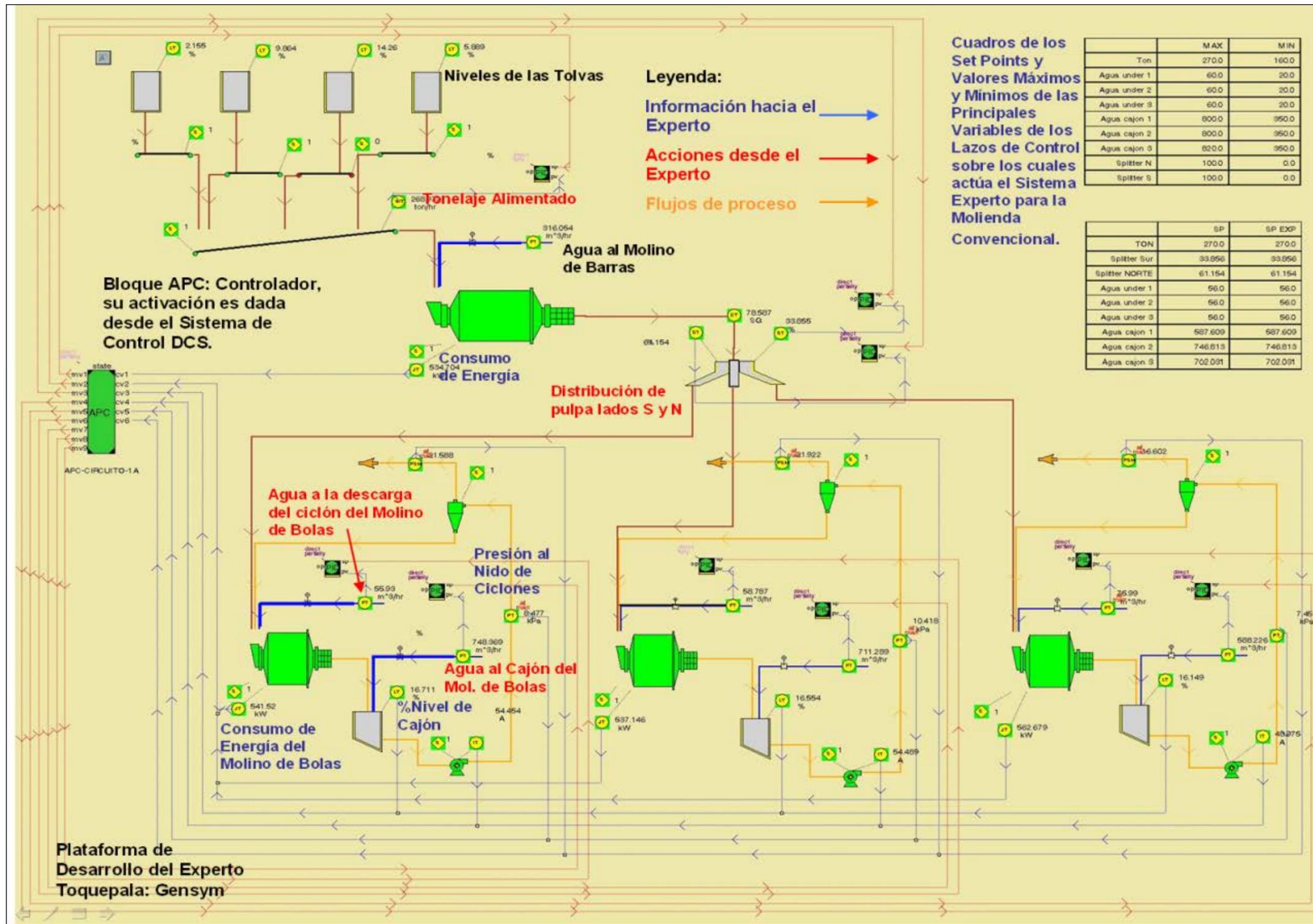


Figura 4.1. Esquemática principal para una semisección de la Molienda Convencional.

### **4.3. Molienda Unitaria**

En el caso del molino unitario los incrementos o reducciones son evaluados por la granulometría que entrega en línea el Analizador de Tamaño de Partículas, posteriormente observa el consumo de energía del molino, luego evalúa el amperaje de la bomba de ciclones. Para la condición de decremento de tonelaje el Sistema Experto además de lo mencionado también evalúa la condición de carga circulante y el agua al cajón de descarga del molino, esto debido al criterio de maximizar el procesamiento y reducir el tonelaje sólo en condiciones muy necesarias. (Figura 4.2)

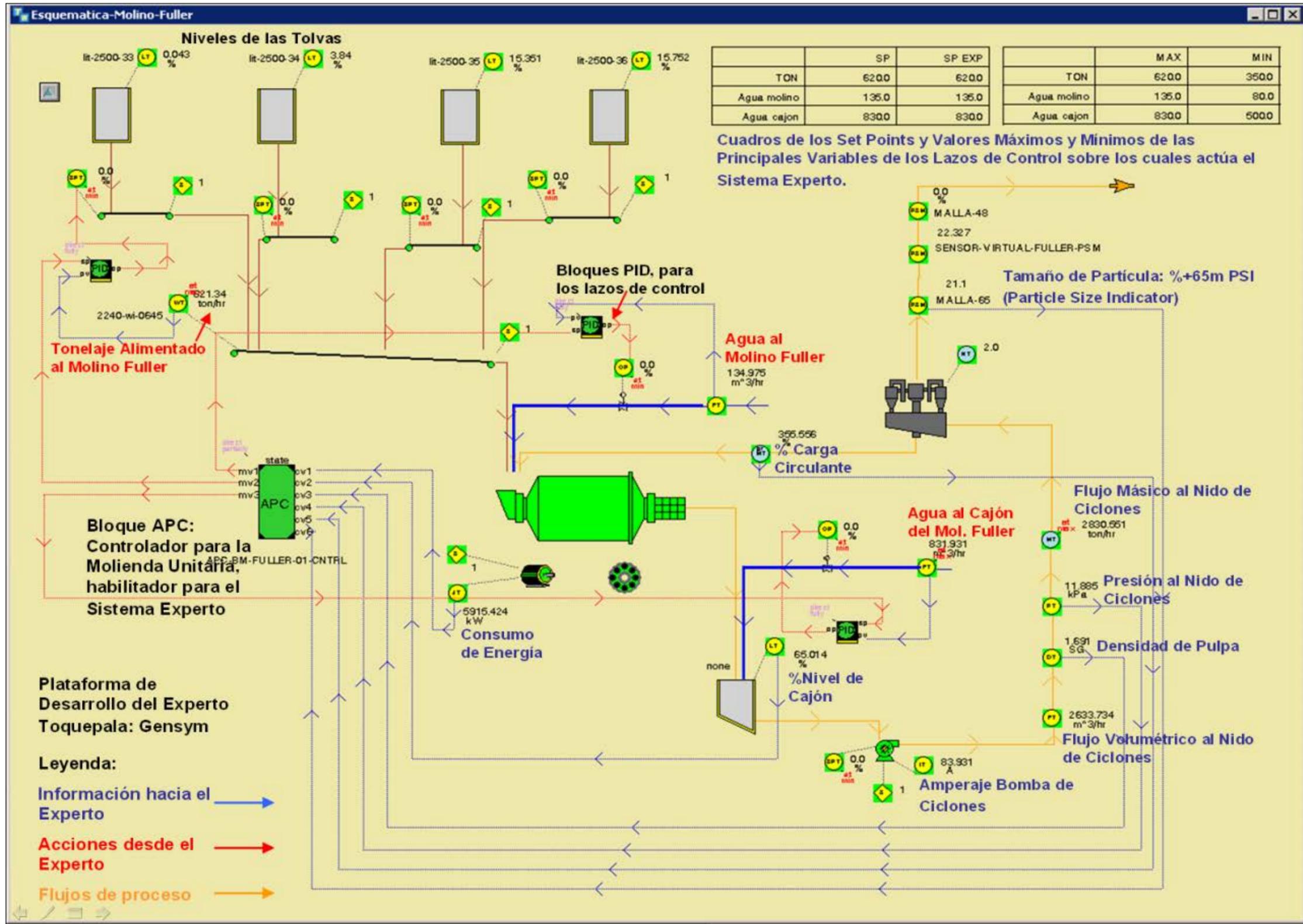


Figura 4.2. Esquemática Principal para la Molienda Unitaria.

#### **4.4. Equipos Instalados Para la Implementación del Sistema Experto**

Con la finalidad de implementar el sistema experto en la molienda de la Planta Concentradora las siguientes facilidades fueron implementadas:

- Actuadores para los brazos de los splitters distribuidores de carga desde los molinos de barras hacia los molinos de bolas, 2 por cada molino de barras para distribuir la pulpa a los 3 molinos de bolas. Comunicación de sus estados y control de los mismos desde la consola de operación DCS.
- Válvulas y flujómetros en las líneas de agua recuperada a la descarga de los ciclones de clasificación.
- Se habilitaron a través de un adecuado mantenimiento los sensores de presión de la línea de alimentación de pulpa a los ciclones.

Además se utiliza en el Sistema Experto instrumentación que ya se tenía implementada (la cual fue sometido a un plan de mantenimiento para incrementar su disponibilidad y confiabilidad), actuadores como los variadores de velocidad de las bombas de ciclones, variadores de velocidad de los alimentadores de mineral y analizador de tamaño de partículas (PSI: Particle Size Indicator).

#### **4.5. Condiciones de Operación Requeridas para Sistema Experto Online**

- ✓ El Operador de Cuarto de Control de Molinos deberá de visualizar en el HMI (Human Machine Interface) que el tonelaje de la Tolva de Finos sea mayor a 7000 ton. en caso contrario el Sistema Experto no deberá ser puesto Online. Hasta la finalización de este procedimiento se está evaluando que este análisis de tolva sea por semi-sección de molinos (para este se debería de tener garantizado que los sensores de nivel estén bien calibrados y no generen confusión) o que siga siendo un punto a consideración de Operaciones puesto que el nivel de tolva será variable para cada sección.

RESUMEN OPERACIONES - CONCENTRADORA TOQUEPALA											2010 - 1 - 28, 16 : 45 : 15			IMPRIMIR							
<b>CHANCADO PRIMARIO</b>		Carros Descarg.	Amps. Motor	Capacid. Térmica	Presión Hidroset	Posición Hidroset	Temper. TqAceite	Nivel TqAceite	Presión Diferenc.	Flujo Int. Excentri.	Flujo Ext. Excentri.										
		437	105.6	17.7	215.1	64.2	51.0	68.7	8.9	44.2	51.1										
<b>CHANCADO SECUNDARIO</b>		Lado A	Lado B	Lado C	Faja 7 (% +1.2 ")	Faja 4B (% +6 ")															
TPH		1,040	986	894	18.83	3.24															
TMH Acumul.		11,040	9,614	7,854																	
<b>MOLIENDA PRIMARIA</b>											1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5		
Tolva de Altura (pies)		8.1	9.7	6.7	7.3	7.2	5.7	9.5	9.6	8.8											
Finos TMH Estimadas		953	1,232	724	840	868	584	1,183	1,167	2,123											
Molinos de Barras (TPH)		255	257	265	252	243	245	254	244	-1											
<b>Producción Horaria</b>				<b>Balance de Mineral</b>																	
Ch. Secund.	Molienda	Diferencia	Ch. Primario	Pila Intermed.	Ch. Secund.	Tolva de Finos	Molienda														
TPH	TPH	TPH	TMH Acum.	(Variación TMH)	TMH Acum.	(Variación TMH)	TMH Acum.														
2,935	2,013	983	27,720	-809	28,508	4,243	24,250														
<b>Mineral en Stock</b>				<b>Cálculos Molienda</b>				<b>%+65M (Overflow Ciclones)-PSI 200</b>													
Pila Intermedios		Tolva de Finos		General		Fuller	Sec. 5	2A1	2A2	2A3											
TMH Total		TMH Total		TMH Estimadas	Work Index	Carga Circ.	23.3	0.0	0.0	0.0											
26,212		9,676		27,748	12.69	0.0															
<b>FLOTACION y REMOLIENDA</b>											Aliment. Roug.	Cola Final	Concen. Bulk	Aliment. Colum.	Cola Colum.	Cola Scavng.	% Rec. Indicada	Radio Concen.	Alimentación Celdas Columna		pH rebose Cycl
% Cu		0.515	0.090	26.569	10.7	0.869	0.099	82.863	62.3	2,572	gpm	Sec 1	11.72								
% Mo		0.027	0.010	0.793	0.741	0.114	0.067	62.903		0.5	% +200M	Sec 2	11.71								
% Fe		4.279	2.697	28.765	22.2	13.750	8.384			9.8	% +400M	Sec 3	11.69								
											Número de Molinos										

Figura 4.3. Tolva de Finos Requerida para SE Online

- ✓ Si algún sensor (sensor de nivel de cajón, sensor de presión de alimentación al hidrociclón, etc), válvula (agua de cajón, agua en el cajón underflow, etc.) u otro actuador (splitters) se encontrara deshabilitado ya sea por parte de Personal de Instrumentación o Mecánicos, el Sistema Experto no debe ser puesto Online. El Sistema Experto trabaja en base a la información de la operación que recibe a través de los diversos instrumentos mencionados líneas arriba, la ausencia de algún dato ocasionará que el Experto no pueda tomar la mejor decisión, pudiendo incluso perjudicar a la operación.
- ✓ En la figura 4.3 se observa una parte del Resumen de Operaciones de la Concentradora, este fue diseñado en la herramienta Process Book del System PI (Plant Information) que brinda información en tiempo real de las principales variables operativas, este sistema tiene una interfaz que se comunica con el DCS. De este modo se tiene los balances de mineral para programar la producción diaria.

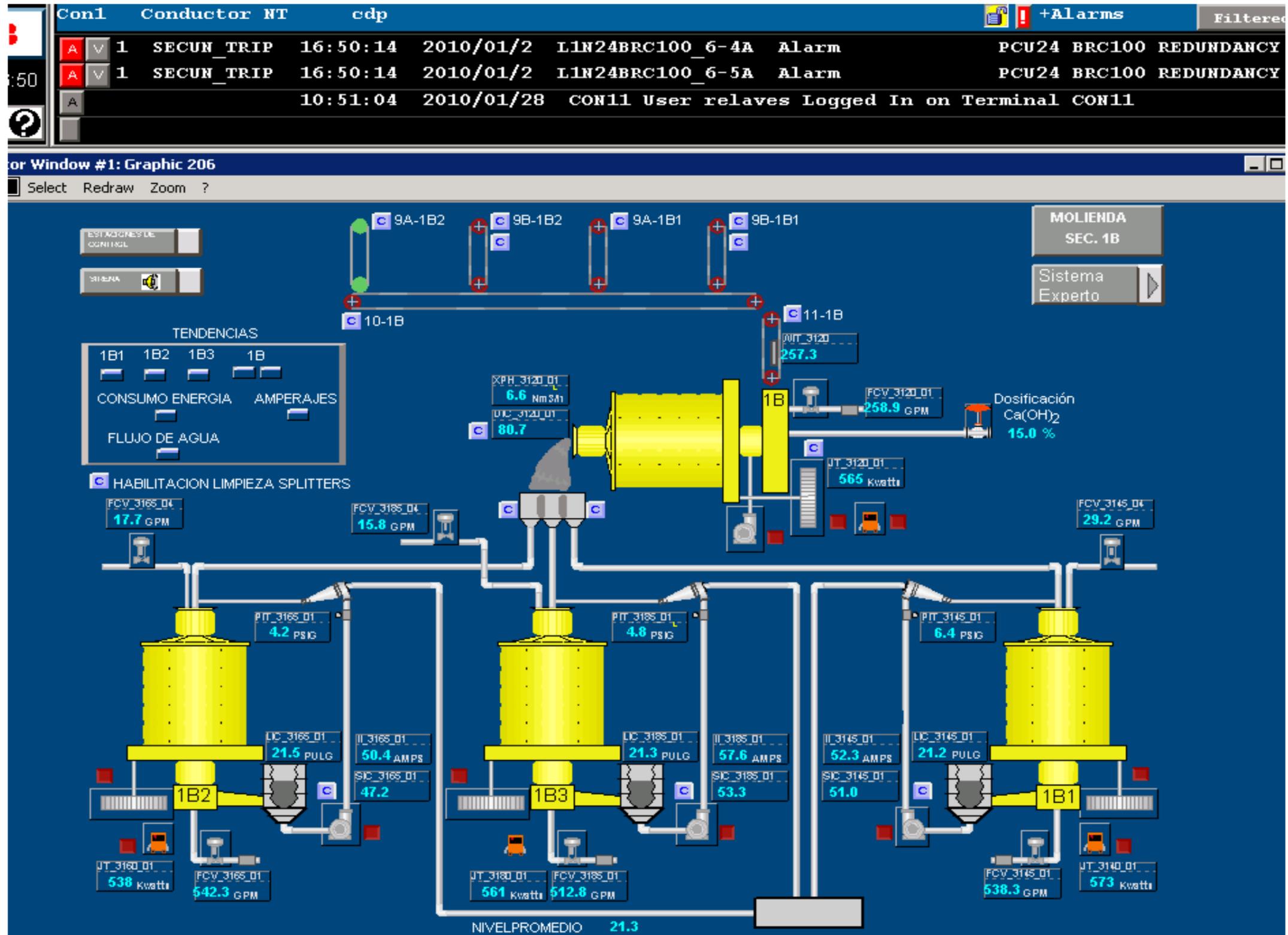
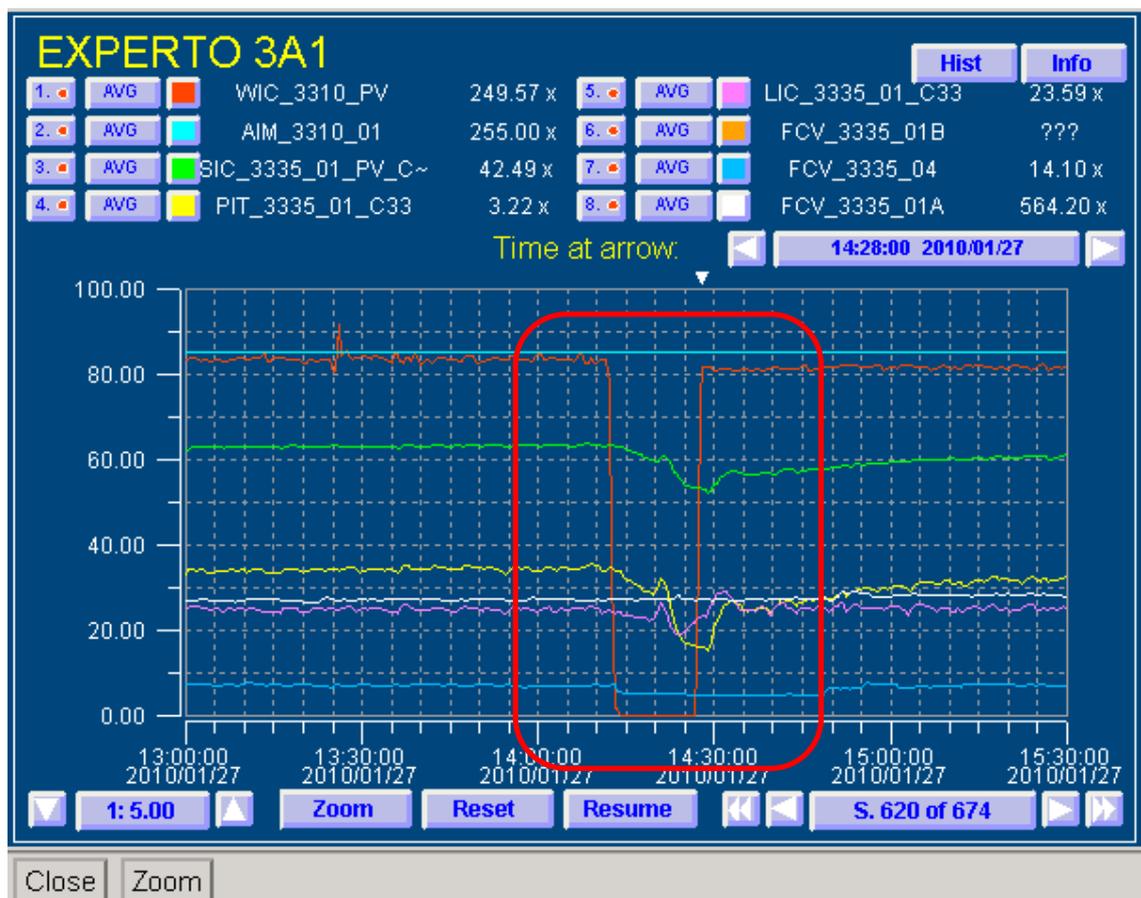


Figura 4.4. Señales de Campo en buena calidad al DCS.

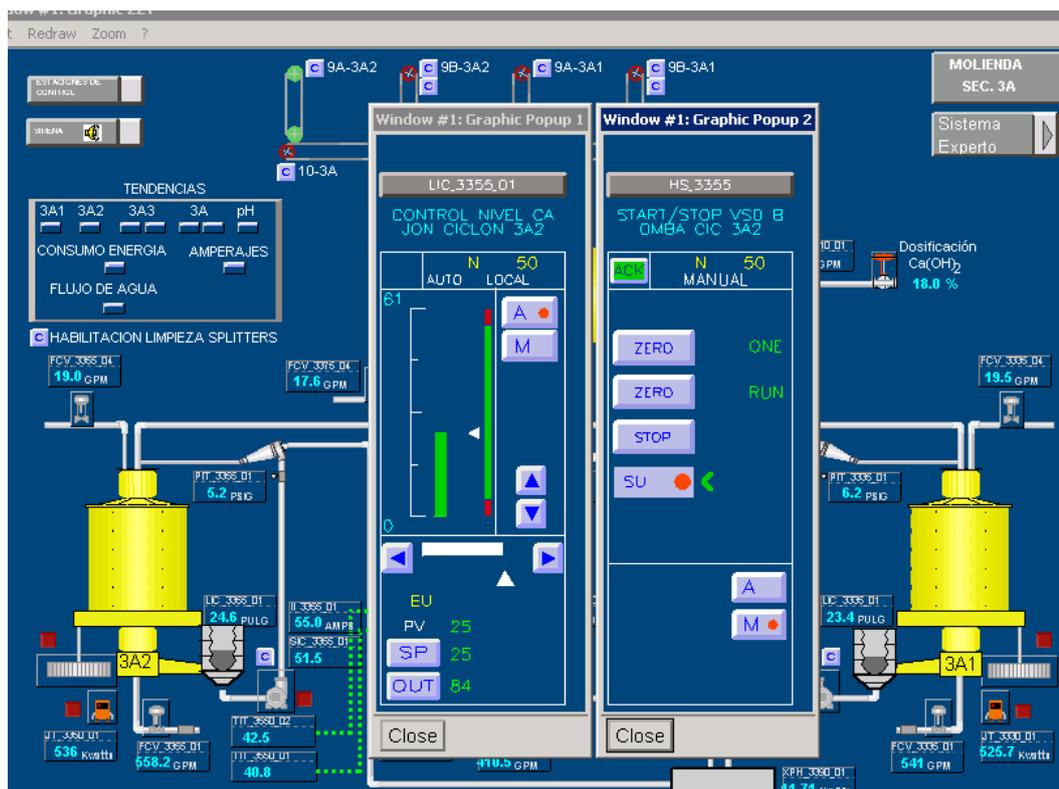
- ✓ Los días miércoles y domingos que se realiza el carguío de barras el Sistema Experto debe ser retirado cuando se realice este procedimiento. Una vez realizado el carguío en una semi-sección, el Sistema Experto no debe ser puesto Online hasta pasado 20 minutos, este se hace con el objetivo de dar tiempo para ESTABILIZAR la Operación (el Experto deberá ser puesto Online siempre bajo condiciones de estabilidad).
  
- ✓ En la figura 4.5 se observa que hubo una parada de las fajas que alimentan de mineral al molino de barras (Tag: WIC\_3310\_PV en rojo) para realizar el carguío de barras, el molino de bolas 3A1 experimenta una reducción de su flujo de pulpa y por ende se ven perturbados las variables de nivel del cajón de la bomba (Tag: LIC\_3335\_01\_C33 en rosado), para tratar de mantener el nivel de dicho cajón el variador de la bomba (que está en modo cascada) disminuye su frecuencia (Tag: SIC\_3335\_01\_PV\_C33 en verde) y como se bombea menos carga la presión con la que se alimenta el hidrociclón disminuye (Tag: PIT\_3335\_01\_C33 en amarillo)



**Figura 4.5.** Estabilidad para SE Online

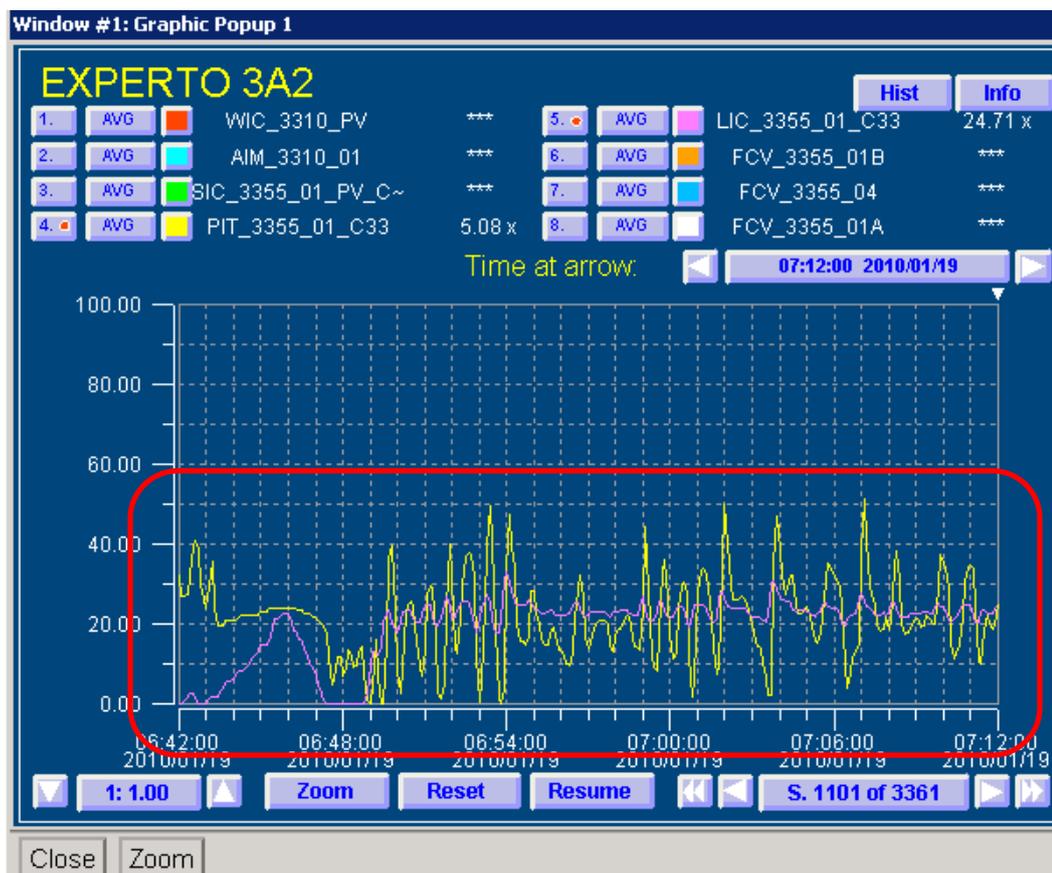
- ✓ Modo Campo del variador: se define así al control que se realiza al variador desde el mismo panel eléctrico de este, para ello se tiene un selector CAMPO/SISTEMA, en este caso todas las lógicas de protección o enclavamientos por proceso sufren un by-pass. Generalmente es usado para trabajos de mantenimiento o cuando por alguna razón el DCS ha perdido comunicación con los buses de campo.
- ✓ Si un variador está en Modo Campo el Sistema Experto no deberá ser puesto Online. El Sistema Experto no entrega un Set Point al lazo de control de nivel de cajón sin embargo es importante que funcione en Modo Sistema: la perturbación de dicho lazo es muy importante, de lo comentado de la figura 4.5 se podría entender que la perturbación de los lazos de control puede ser explicada como la desviación estándar de estas variables (tomando una

muestra de datos en un rango “t”) y ello indicaría que se está identificando un evento de sobrecarga, descarga del molino o evidenciar la probabilidad de un acordonamiento (esto se revisó y comprobó durante la etapa de recolección de datos).



**Figura 4.6.** Variador de la Bomba que Alimenta al Hidrociclón

- ✓ Si el Operador observara que un lazo de control no está funcionando correctamente no deberá poner Online el Sistema Experto. El Sistema Experto como se ha definido anteriormente trabaja sobre la base de una buena Instrumentación de Campo y adecuado Sistema de Control, si esto no ocurriera el Experto tomaría decisiones herradas perjudicando a la Operación. El correcto desempeño de un lazo de control se basa en una buena sintonía y esta deberá ser realizada cada vez que se da una intervención mecánica o de instrumentación sobre el actuador de dicho lazo de control o algún otro equipo asociado a su trabajo (válvulas de agua, limpieza de cajón, limpieza de tuberías, etc.)



**Figura 4.7.** Buena sintonía de los lazos de control.

- ✓ En la figura 4.7 se puede apreciar el efecto negativo de una sintonía del lazo de control del nivel de cajón, no sólo afecta al PV (Process Value) de la variable sino que impacta sobre la presión de alimentación al hidrociclón generando mucha inestabilidad y una ineficiente clasificación incluso pudiendo generar un acordonamiento.

#### 4.6. Puesta en Línea del Sistema Experto

- ✓ El Operador de Cuarto Control Molinos habiendo realizado el punto: **CONDICIONES DE OPERACIÓN A EVALUAR ANTES DE EXPERTO ONLINE** y estando todo conforme dará click en los botones para habilitar los Lazos de Control y luego habilitar el Experto. (Se recuerda que para que el Sistema Experto funcione deberá de darse click en el Lazo respectivo y en el botón general). En la

figura 4.8 se muestran los botones de habilitación de cada lazo de control, esto coloca al respectivo lazo en modo cascada (en este modo el Sistema Experto escribirá el Set Point) y las habilitación general, en caso de emergencia bastará con presionarlo para pasar al modo automático del lazo con los últimos set points, además se deberá de ingresar los valores máximos y mínimos para las principales variables acordes a la operación.



**Figura 4.8.** Sistema Experto Online

✓ El Operador deberá seleccionar en base a su experiencia y la información de campo el Tipo de Mineral con los cuales el Experto seleccionará sus valores de cambio y parámetros de evaluación, un valor referencial para este análisis es el Work Index.

GENERAL FLOT/REMOL	pH	11.00	T° INT.D.PIN.	40.07
	TON. ACUM.	5965	T° EXT.D.PIN.	45.59
	GPM PULPA ALIM.COL.	2820	SCFM AIRE	
	GPM DIST. NORTE	1595	pH SECC 1	
	GPM DIST. SUR	1228	pH SECC 2	
	PSI REMOL %+200M	1.9	pH SECC 3	
	→ %+400M	12.8	pH SECC 4	
	TN/HR TOTAL	2455	NIVEL ALIM. TUB	
	TONS ACUM. GUARDIA	26066	NIVEL TK. AGUA	
	TONS ESTIMADAS	30700	NIVEL TK. AGUA	
WORK INDEX (kW-h/tc)	13.60			
% REC Mo ESTIMADA	88.9	N°BOLSAS Mo E		

**Figura 4.9.** Work Index

Para la Molienda Convencional se tienen tres tipos de mineral:

- Menos Duro
- OK
- Duro

Para la Molienda Unitaria se han definido dos tipos:

- Menos Duro
- Duro

### MAXIMOS Y MINIMOS MOLINO FULLER

<input type="checkbox"/> 580	TONELAJE MAXIMO MOLINO FULLER
<input type="checkbox"/> 350	TONELAJE MINIMO MOLINO FULLER
<input type="checkbox"/> 85	AGUA MAX MOLINO FULLER
<input type="checkbox"/> 40	AGUA MIN MOLINO FULLER
<input type="checkbox"/> 850	AGUA CAJON MAX MOLINO FULLER
<input type="checkbox"/> 450	AGUA CAJON MIN MOLINO FULLER

TENDENCIAS

HEARTBEAT    EXPERTO

%MALLA +65

MAX  23

MIN  19

MIN. KW/HR

MIN  5500

MAX. CARGA CIRC.

MAX.  400

MAX. AMP. BBA.

MAX.  90

ON    HAB. EXPERTO SGS 5TA

**HABILITACION DE LAZOS DE CONTROL MOLINO FULLER**

ON    HAB. TONELAJE 5TA

ON    HAB. AGUA MOLINO 5TA

ON    HAB. AGUA CAJON 5TA

Molienda Unitaria

Molienda Convencional

+ INCREMENTA 10 METROS CUBICOS  
- DECREMENTA 10 METROS CUBICOS

+ INCREMENTA 10 m3  
- DECREMENTA 10 m3

MOLIENDA CONVENCIONAL

C

0: MINERAL SUAVE

1: MINERAL OK

2: MINERAL DURO

Molino Fuller

**Figura 4.10.** Tipos de Mineral

## 4.7. Reglas del Sistema Experto.

### 4.7.1. Sistema Experto Molienda Convencional.

- El Sistema Experto en la Molienda Convencional considera la siguiente jerarquía para el scan (revisión) de reglas:

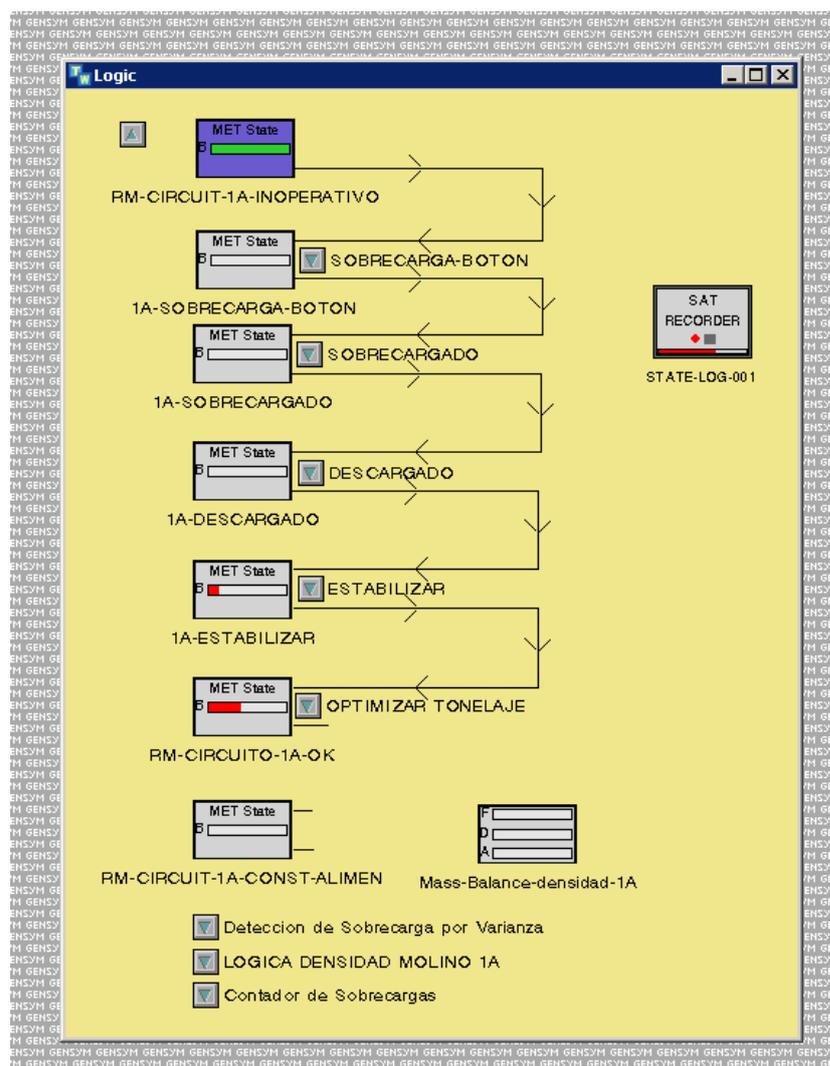


Figura 4.11. Jerarquía de Control

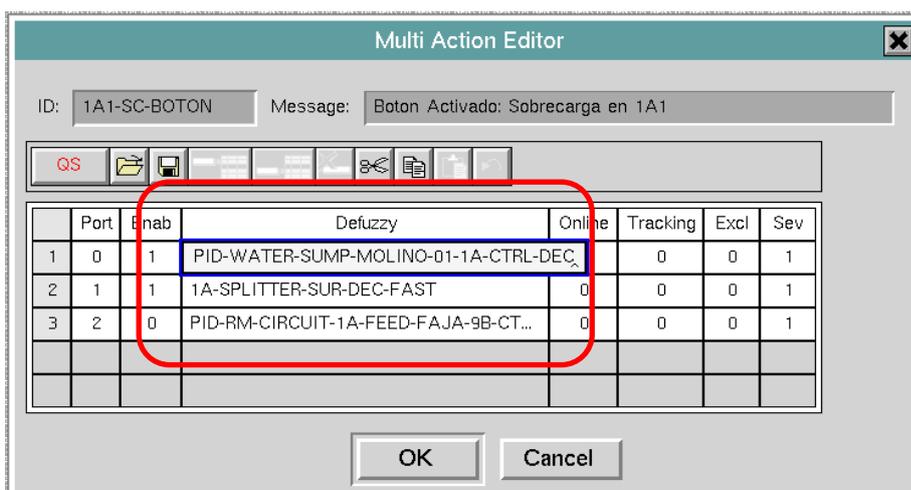
**Regla Inoperativo:** Esta regla verifica que el molino de barras de la semi-sección este operativo.

**Regla Sobrecarga Botón:** Esta regla se gatilla cuando el Operador de Cuarto de Control presiona uno de los botones de CARGADO en la consola de control.



**Figura 4.12.** Botón Sobrecarga

Las acciones que se ejecutarán según el botón para el molino que se presionó son las que se muestran:



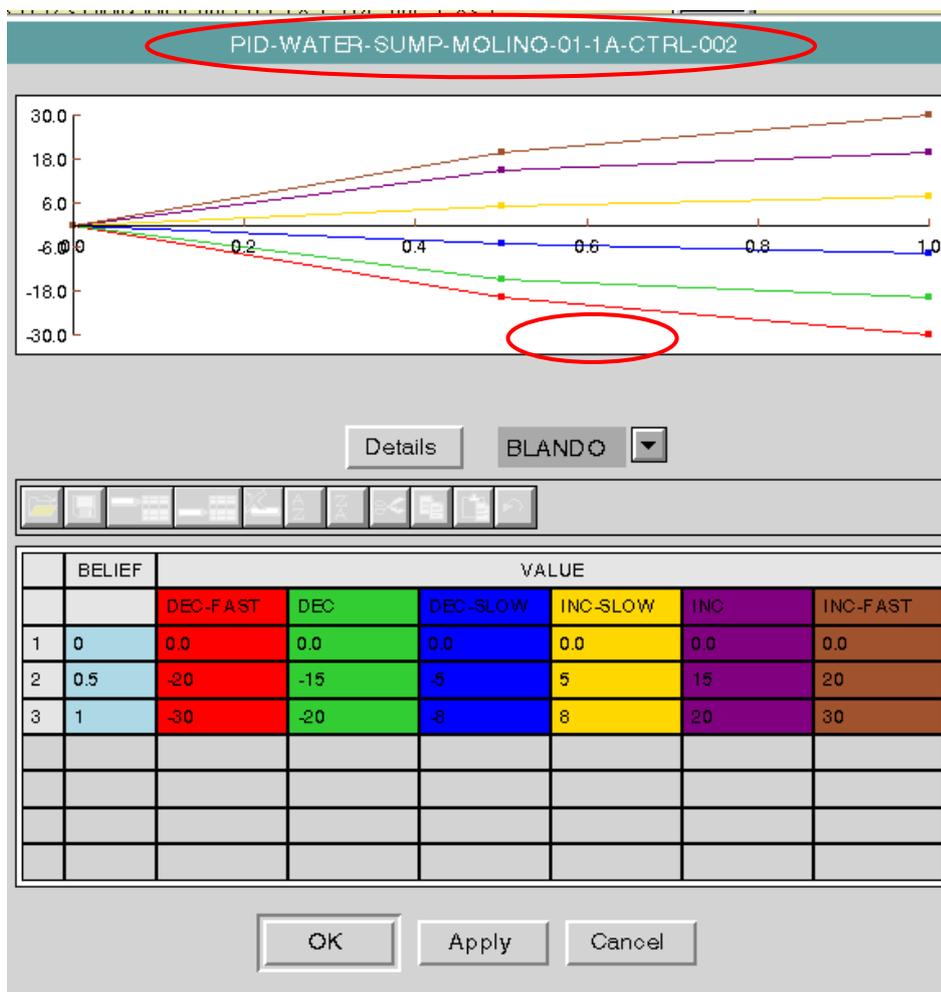
**Figura 4.13.** Sets Defuzzy en Botón Sobrecarga

En estas se muestran los sets Defuzzy que se ejecutan. Para este caso se presionó el botón de cargado para el molino 1A1 y se ejecutan los sets:

- PID-WATER-SUMP-MOLINO-01-1A-CTRL-DEC
- 1A-SPLITTER-SUR-DEC-FAST

Estos sets se interpretan numéricamente en los siguientes cuadros para los tres tipos de mineral:

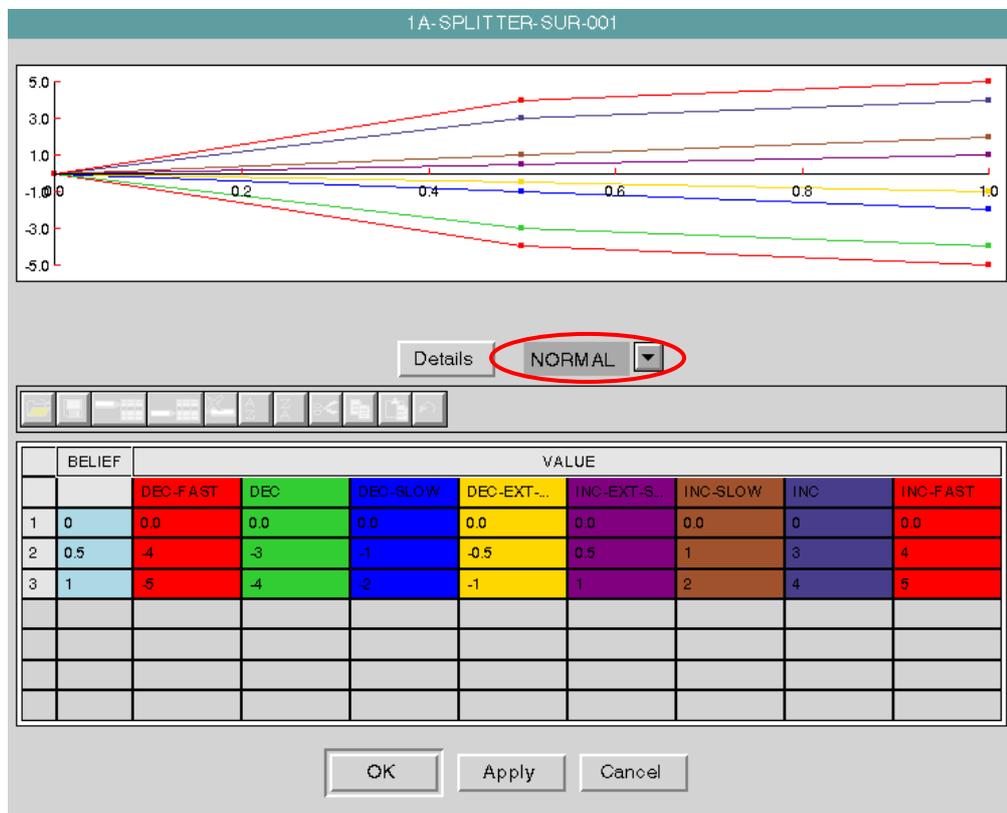
- PID-WATER-SUMP-MOLINO-01-1A-CTRL-DEC



**Figura 4.14.** Conjunto Defuzzy de Agua Cajón

Lo que significa que para el set PID-WATER-SUMP-MOLINO-01-1A-CTRL-DEC el agua cajón del molino 1A1 disminuirá hasta 20gpm, para los otros tipos de mineral en este caso será el mismo valor.

- 1A-SPLITTER-SUR-DEC-FAST



**Figura 4.15.** Conjunto Defuzzy de Splitter Sur

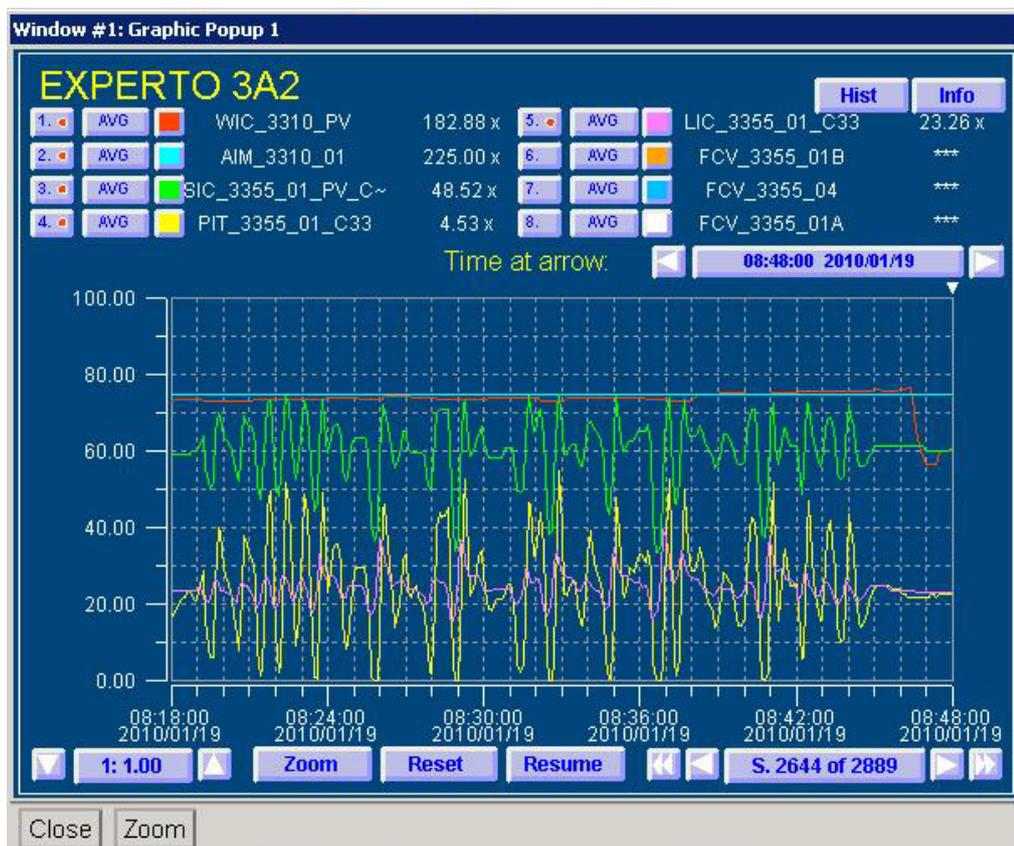
- Lo que significa que para el set 1A-SPLITTER-SUR-DEC-FAST el Splitter Sur del molino 1A1 disminuirá hasta 6 puntos en mineral suave, hasta 5 puntos en mineral OK y hasta 3 puntos para mineral duro. En este set nos damos cuenta de la importancia de la selección del tipo de mineral.

#### 4.8. Regla Sobrecarga

Esta regla se gatilla cuando el Sistema Experto detecta una perturbación en una de las siguientes variables:

- Frecuencia del variador de la bomba que alimenta al hidrociclón.
- Nivel de cajón de la bomba.
- Presión de alimentación al hidrociclón.

Matemáticamente lo que el Experto evalúa es la Desviación Standard que experimentan dichas tendencias.



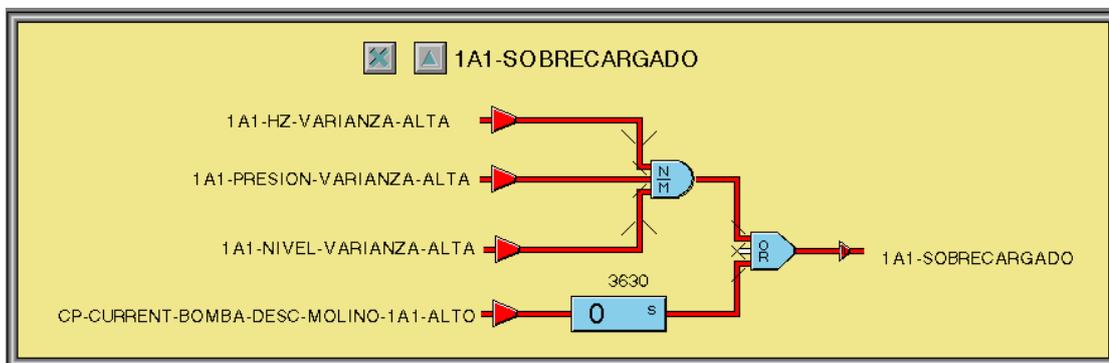
**Figura 4.16.** Evento Sobrecarga

En este gráfico se puede apreciar la alta perturbación que sufren estas tres variables. Durante la etapa de desarrollo del Sistema Experto se experimentó y se concluyó que cuando se presenta una situación de acordonamiento o atoro del hidrociclón esta perturbación se incrementa como resultado de la inestabilidad que se genera en este circuito; si el hidrociclón comienza a atorarse se visualiza en la tendencia que esto no ocurre en un solo instante, previamente este entrará en una secuencia de cerrado y apertura de la descarga de underflow, la presión empieza a incrementarse y disminuir, como consecuencia el nivel del cajón también experimentará inestabilidad y el lazo de control de nivel de cajón de la bomba buscará llevarlo a su Set Point definido variando para esto la salida del variador de dicha bomba.

Pero este evento no sólo podría presentarse en una condición de atoro, se describen otros eventos:

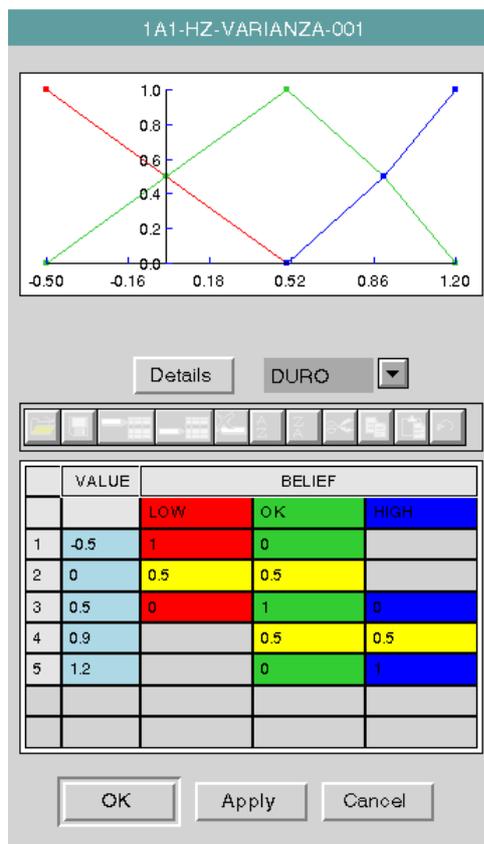
- El cajón de la bomba podría estar obstruido por bolas de acero, en la zona de descarga, también por trapos u otro material que impida el libre flujo de la pulpa a la bomba, volviéndolo irregular. Por esta razón es importante que Operaciones realice la limpieza de los cajones como mínimo una vez al mes, se han presentado ya varios casos en los que limpiando el cajón se corrigió la perturbación de dichas tendencias.
- El sensor de nivel del cajón esté sucio, la pulpa interfiera en la lectura de nivel, esta limpieza debería de ser realizada por Operaciones hasta diariamente, si el lazo de control de nivel está en automático ocasionará que la frecuencia de la bomba esté en constante cambio, pudiendo llegar a los valores de alarmas por nivel de cajón alto.
- El sensor de nivel de cajón este fallando, si el Operador de campo en coordinación con el Operador de Cuarto de Control verifican que el nivel mostrado en la consola de control no corresponde a campo entonces Operaciones deberá de reportar a Instrumentación para que sea intervenido dicho sensor, de igual manera que en el viñeta anterior, el lazo de control ejecutará una acción errónea.
- Se ha tenido experiencias en las cuales el desgaste del apex del hidrociclón ha ocasionado perturbación en el trabajo de la bomba, si el Operador en su inspección se da cuenta que alguna parte del hidrociclón está desgastada o rota comunicará a su Supervisión para que esta coordine con el Departamento de Metalurgia para las pruebas respectivas, en caso se determine su reemplazo, este será efectivo por parte de Mantenimiento Mecánico.
- Si la sintonía del lazo de control se encuentra deteriorada debido a algún cambio realizado en campo sobre alguno de los constituyentes de dicho lazo (sensores, limpieza de cajón, motores), en este caso se deberá de comunicar a Control de Procesos.

Después evalúa para el molino que presenta la sobrecarga cual fue la causa (cuál de las variables anteriormente comentadas esta perturbada).



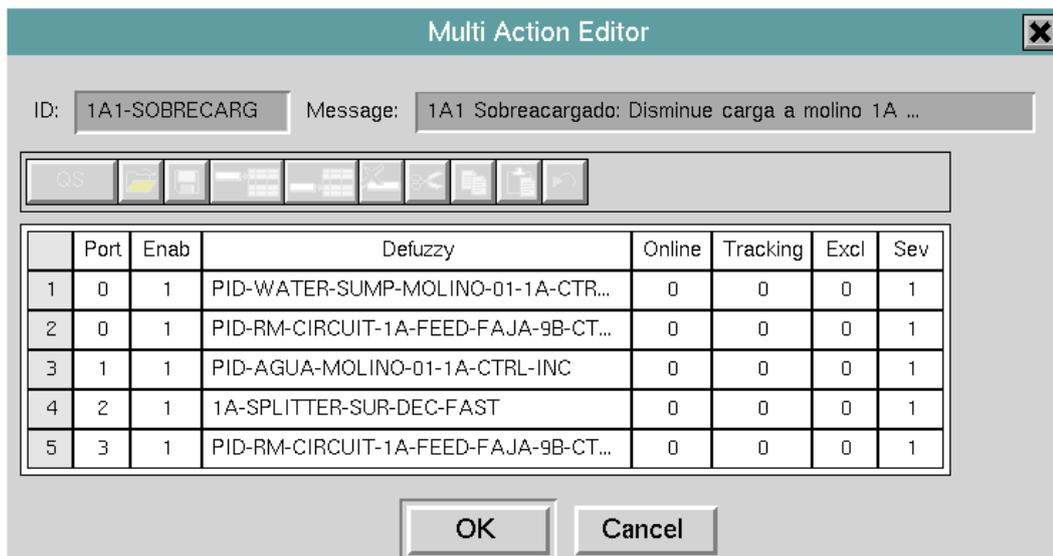
**Figura 4.17.** Señales a evaluar en Lógica Sobrecarga

A continuación se muestran los Sets Fuzzy para una variable:



**Figura 4.18.** Conjunto Fuzzy Varianza Hz





**Figura 4.20.** Sets Defuzzy en Lógica Sobrecarga

Para el caso en que un valor verdadero llegue al puerto 0 y 1 por haberse definido como Sobrecargado al Molino 1A1 se ejecutarán las reglas:

- PID-WATER-SUMP-MOLINO-01-1A-CTRL-DEC-SLOW: Disminución del set point del agua al cajón hasta un valor de 8 gpm para los tres tipos de mineral.
- PID-RM-CIRCUIT-1A-FEED-FAJA-9B-CTRL-DEC-SLOW: Disminución del set point de tonelaje hasta 1 ton/h en mineral suave, 2 ton/h en mineral normal y hasta 4 ton/h en mineral duro.
- PID-AGUA-MOLINO-01-1A-CTRL-INC: El set point del agua del cajón under se incrementará hasta en 4 gpm para cualquiera de los tipos de mineral.

Si en caso se activara el puerto 2 (por definición de Sobrecarga del molino 1A3) se ejecutaría la regla:

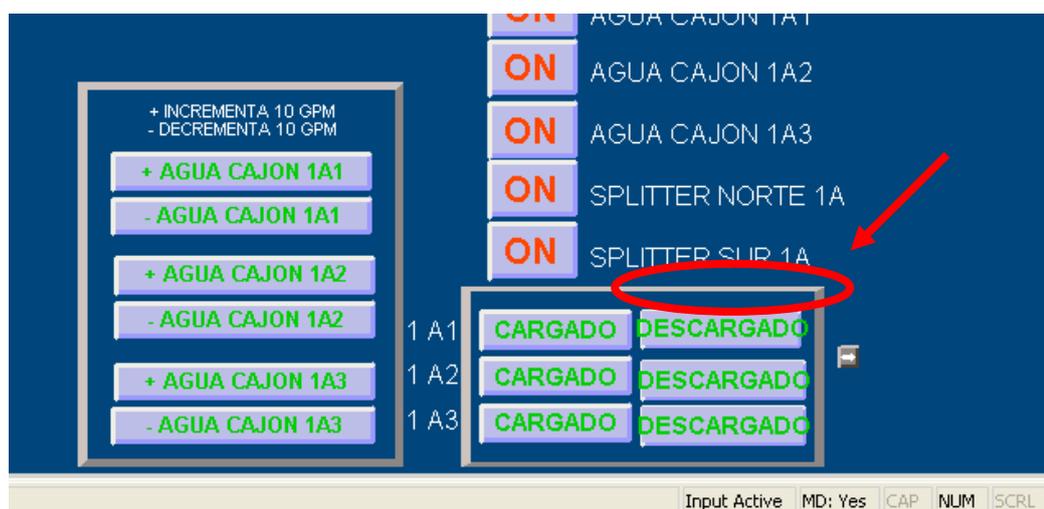
1A-SPLITTER-SUR-DEC-FAST: El set point del splitter sur disminuiría hasta en 6 puntos para mineral suave, 4 puntos para mineral normal y 3 puntos para mineral duro.

Si en caso se activara el puerto 3 (por definición de Sobrecarga del molino 1A2) se ejecutaría la regla:

PID-RM-CIRCUIT-1A-FEED-FAJA-9B-CTRL-DEC: El set point del Tonelaje disminuiría hasta en 2 ton/h para mineral suave, 3 ton/h para mineral normal y 6 ton/h para mineral duro.

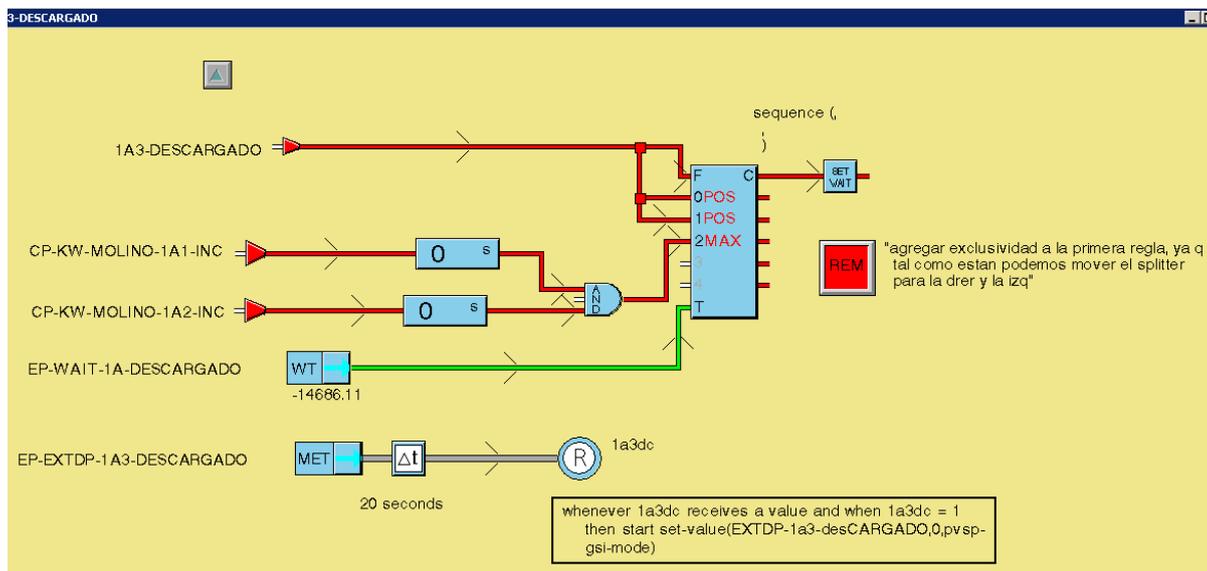
#### 4.9. Regla Descargado

Esta regla se gatilla cuando el Operador presiona el botón de Descargado para un molino de bolas, esto con la intención de incrementar la carga hacia este molino debido a que el Operador de campo considera que el hidrociclón tiene disponibilidad de procesamiento.



**Figura 4.21.** Activación Lógica Descargado

Se muestra la lógica en el Sistema Experto:



**Figura 4.22.** Lógica Descargado

Y dentro del bloque se podrán ejecutar las siguientes acciones:

Multi Action Editor

ID: 1A3-DESC Message: 1A3-DESCARGADO: Cerrar Splitter Norte y Sur

	Port	Enab	Defuzzy	Online	Tracking	Excl	Sev
1	0	1	1A-SPLITTER-SUR-DEC	0	0	0	1
2	1	1	1A-SPLITTER-NORTE-DEC	0	0	0	1
3	2	1	PID-RM-CIRCUIT-1A-FEED-FAJA-9B-CT...	0	0	0	1

OK Cancel

**Figura 4.23.** Conjuntos Defuzzy para activarse

Vamos a interpretar esta lógica:

- Si el Operador presiona el botón DESCARGADO los puertos 0 y 1 se habilitan ejecutándose los Sets Defuzzy:

1A-SPLITTER-SUR-DEC

1A-SPLITTER-NORTE-DEC

- Si adicionalmente la tendencia del Consumo de Energía de los otros dos molinos de bolas (en este caso los molinos 1A1 y 1A2) presentará una pendiente positiva entonces se habilitaría la regla:
- PID-RM-CIRCUIT-1A-FEED-FAJA-9B-CTRL-INC-SLOW

Que incrementará el set point del tonelaje del Molino de barras.

Después de 20 seg. el botón de DESCARGADO se habilitará nuevamente y podrá ser presionado si fuera necesario.

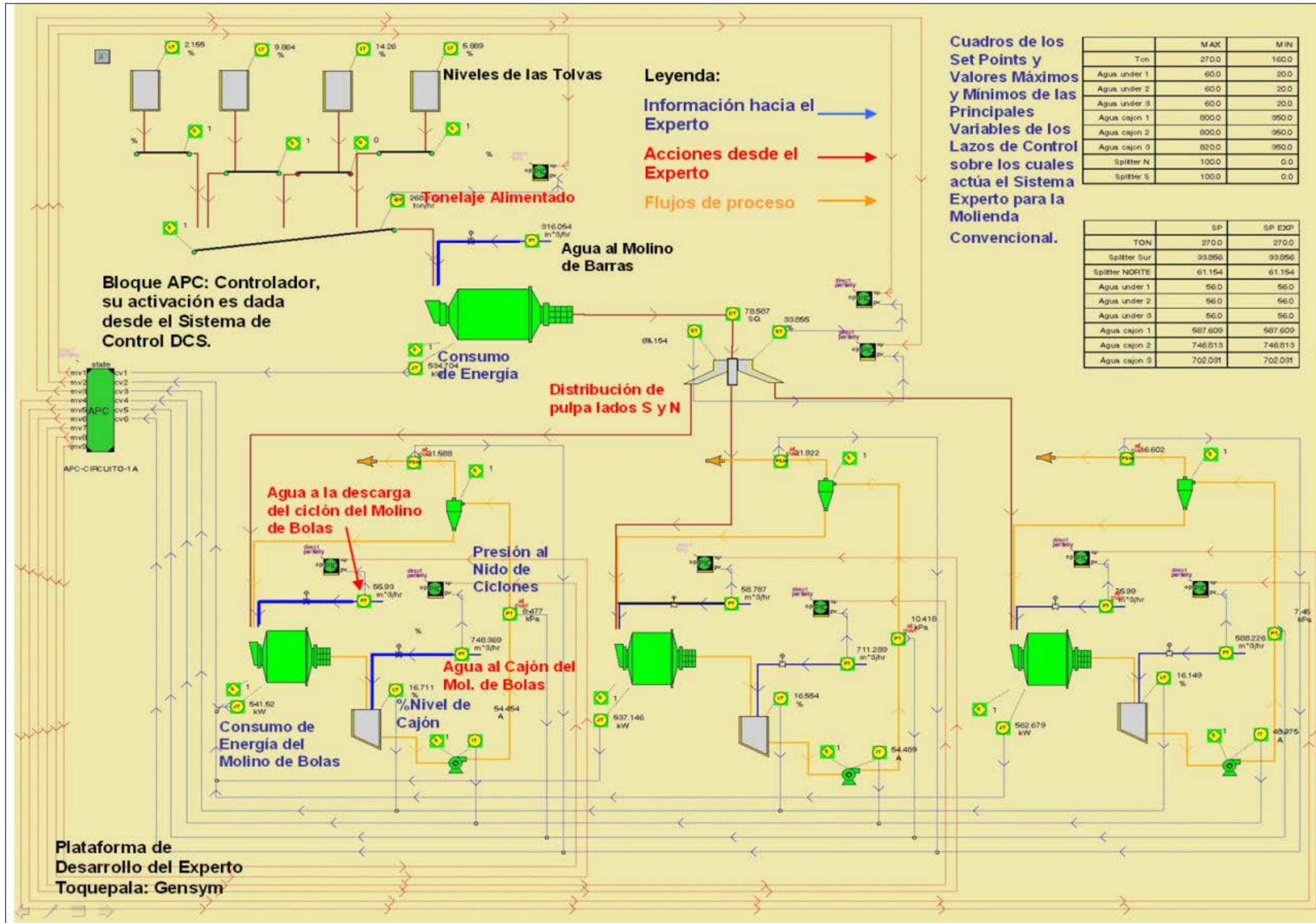


Figura 4.24. Esquemática principal para una semisección de la Molienda Convencional.

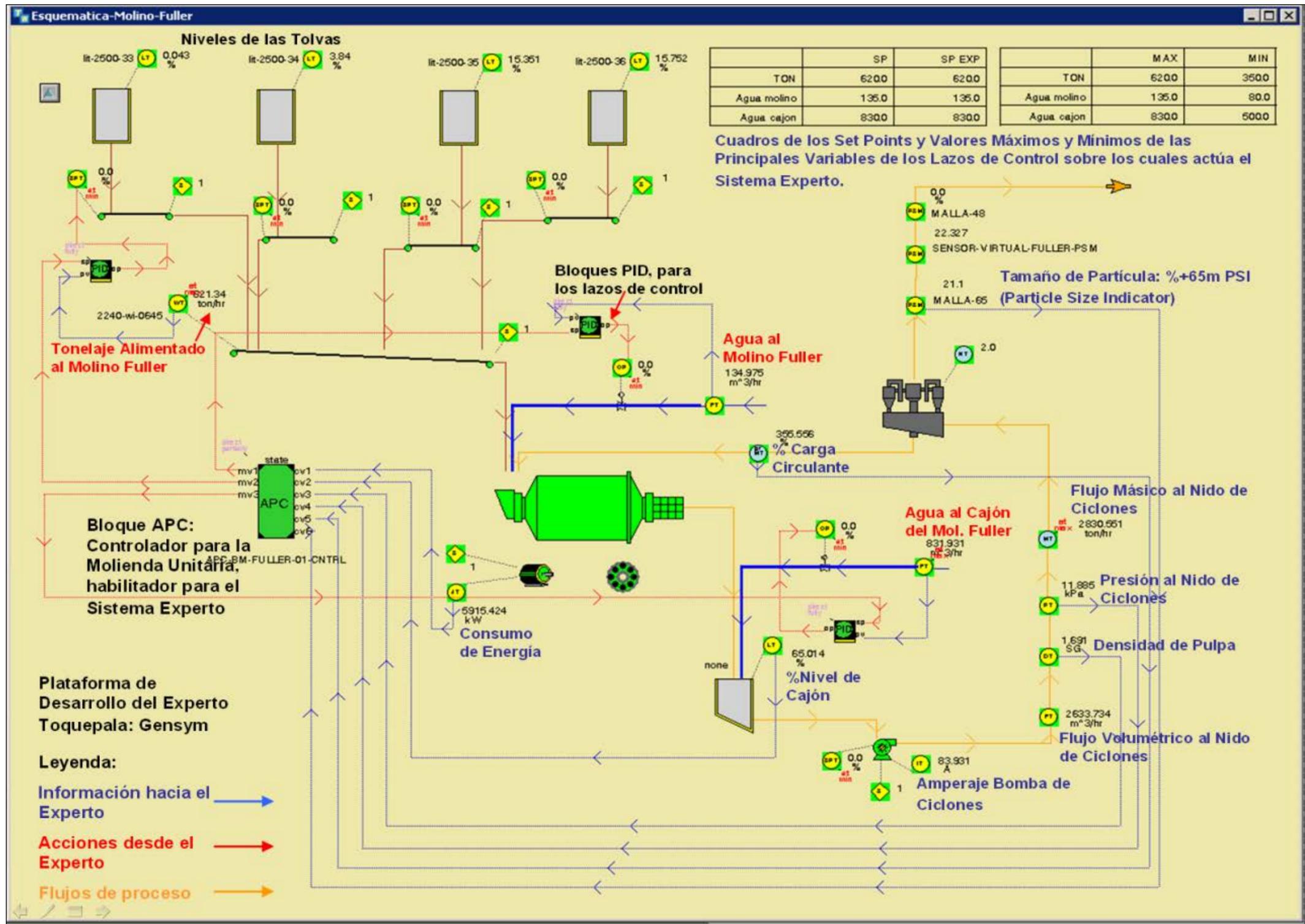


Figura 4.25. Esquemática principal para la Molienda Unitaria.

## CAPITULO V

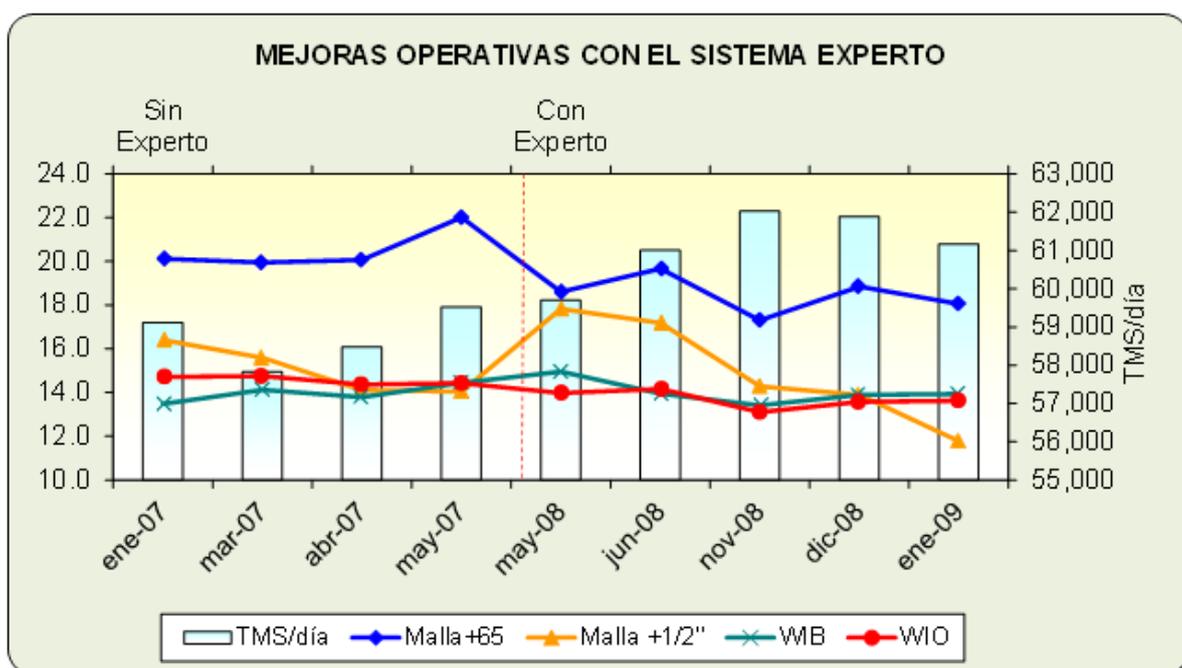
### RESULTADOS

En la tabla 5.1 se muestran las variables más importantes con las que se evaluó el beneficio de la implementación del Sistema Experto, el año 2007 representa la operación sin el Sistema Experto y el 2008-2009 con la implementación de dicho sistema.

**Tabla 5.1.** Variables Operativas Sistema Experto.

Datos	TMS/día	Malla +1/2	WIB	Malla+65
<b>2007</b>				
Enero	59,112	16.40	13.48	20.12
Marzo	57,824	15.58	14.13	19.94
Abril	58,473	14.11	13.79	20.06
Mayo	59,520	14.05	14.45	22.01
<b>Promedio</b>	<b>58,732</b>	<b>15.0</b>	<b>14.0</b>	<b>20.5</b>
<b>2008-2009</b>				
Mayo	59,694	17.82	14.95	18.60
Junio	61,002	17.18	13.95	19.66
Noviembre	62,018	14.28	13.42	17.31
Diciembre	61,883	13.89	13.90	18.85
Enero	61,164	11.78	13.94	18.06
<b>Promedio</b>	<b>61,152</b>	<b>15.0</b>	<b>14.0</b>	<b>18.5</b>

Se presenta a continuación la figura 5.1 en el que se observa la mejora dada con el Sistema Experto en el tonelaje procesado y en la calidad de pulpa alimentada a la flotación primaria expresada como porcentaje retenido sobre la malla +65.



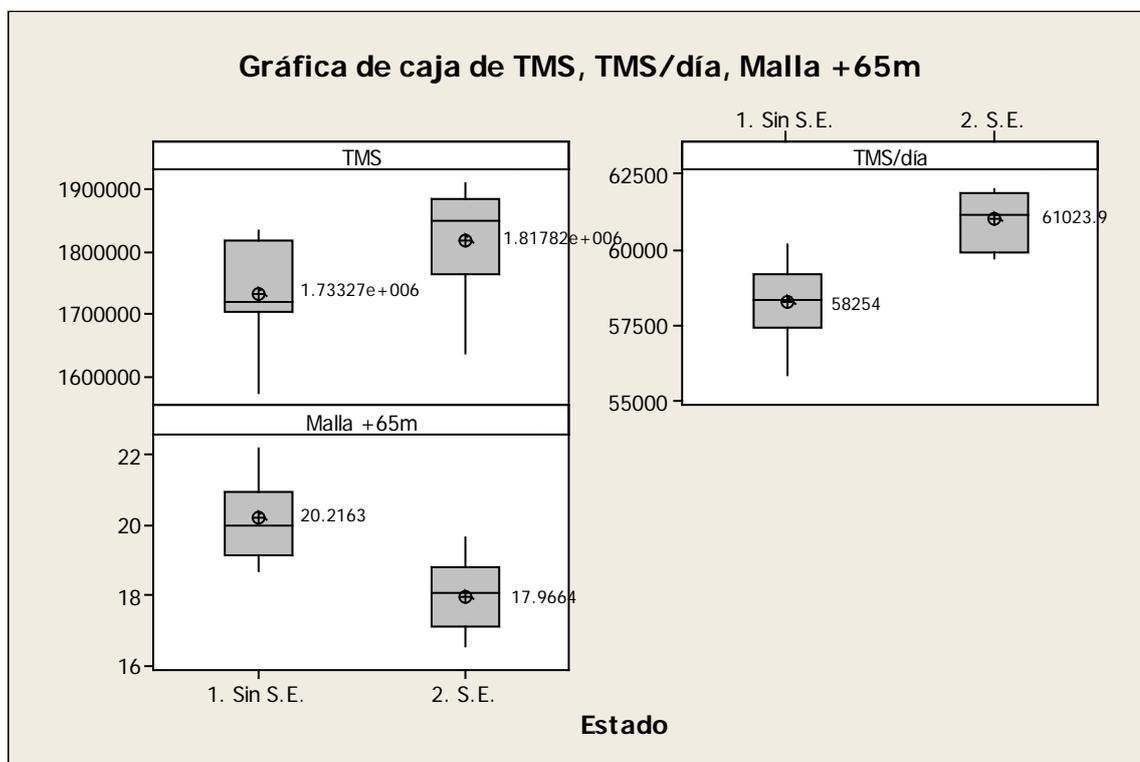
**Figura 5.1.** Principales variables de evaluación de la implementación del Sistema Experto. Valores antes y después de la implementación.

La implementación de este sistema ha demorado 1 año hasta la aceptación final, tiempo en el cual se ha identificado las etapas de:

- Reconocimiento del proceso, obtención de diagramas de flujo y entrevistas con los operadores a fin de recolectar su experiencia y llevarla a filosofías de control.
- Sintonía gruesa de los lazos de control.
- Sintonía fina de los lazos de control.
- Pruebas de optimización y de conformidad.
- Prueba final.

Es importante destacar que el Sistema Experto es una herramienta de apoyo para las actividades de los operadores, estos ahora tendrán un papel más relevante en aspectos de supervisión de este nuevo sistema.

En la figura 5.2 se presenta el Boxplot con las principales variables a evaluar, se evidencia el incremento de tonelaje procesado en la molienda.



**Figura 5.2.** Boxplot de evaluación de variables.

## CONCLUSIONES

- Se logró el objetivo del incremento del tonelaje en un 4.75% sin perjudicar el producto para la siguiente etapa de flotación, la cual tiene como indicador el %malla +65m habiendo esta disminuido también, conjuntamente con la variabilidad de estas señales.
- Se está haciendo un mejor uso de los recursos de la empresa al optimizar su funcionamiento.
- Los sistemas expertos se integran en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección de los casos en que las operaciones pudieran salir fuera de control. El sistema experto detecta y diagnostica en forma continua y aplica modelos de optimización en-línea.
- Las ventajas que presenta la aplicación de los sistemas de control avanzado abarcan: el ahorro de energía, el aumento de capacidad de tratamiento, la disminución del costo de operación y del costo de mantenimiento, y en términos más amplios, la disminución del porcentaje del producto que no cumple las especificaciones durante el procesamiento para los procesos aguas abajo.
- De acuerdo a estimaciones realizadas el incremento de 0.5% en el tonelaje diario de la planta representaría una utilidad anual de aprox. US\$ 2,083,000.00 (cálculo realizado con una utilidad de US\$ 1.00/lb de Cu y US\$ 10/lb de Mo) lo cual justifica con creces la implementación de este sistema experto en la molienda convencional.

- Para realizar un sistema experto integran dos personas el Experto del Dominio (profesional de la especialidad) y un Ingeniero de Conocimiento (programador), que estos van enlazar sus experiencias almacenándolos en la Base de conocimientos que mediante la interface va a permitir al usuario llegar a comunicarse con el motor de inferencia, el cual va a tomar la decisión de aplicar todo lo almacenado en la base de conocimientos.
- Mayor flexibilidad para visualizar el estado de la planta desde su pantalla de control. Los costos de mantenimiento de equipos si bien no disminuyeron se optimizaron, fue necesario coordinar con Mantenimiento un plan de acción para asegurar la disponibilidad de los instrumentos, sensores, actuadores, bombas, revestimientos, etc.
- La continuidad y estabilidad del proceso se incrementó, esto ya era un punto de mejora por sí mismo, dado que se tendría un producto más constante en características para la siguiente etapa de flotación.
- Esta experiencia nos sirvió para implementar válvulas y flujómetros en el ingreso de los molinos de bolas, mejorar los splitters, se perfeccionaron los existentes. Se trabajó en coordinación con Mantenimiento a fin de ejecutar las mejores prácticas para ambas áreas.
- Se consideraron mejoras para realizar las sintonías de los lazos de control y realizar un mantenimiento regular a fin de garantizar un tiempo de respuesta adecuado y estable ante una acción de modificación de algún set point de un lazo de control.
- Situándonos en la Pirámide de Control, se subió al nivel de optimización con sistemas de control, para este caso el Basado en Lógica Fuzzy, lo que permitió aprender y ser los desarrolladores del proyecto

## BIBLIOGRAFÍA

1. GARCÍA SERRANO, ALBERTO, Inteligencia Artificial: Fundamentos, Prácticas y Aplicaciones – Alfaomega. Edición 2013 – México.
2. OCS TRAINING COURSE, Curso de Control Avanzado – 2004 – Perú.
3. QUIÑONEZ M., S., LEON, C., BELTRÁN, L., Optimización de la Molienda Mediante la Implementación de un Sistema Experto, PERUMIN 2009.
4. REYNOSO MEJIA, MARIO; MANRIQUEZ VALENCIA, VICTOR, Aplicación de un Sistema Experto para Molienda en Plantas de Concentración. Mexicana de Cananea S. A. 2000
5. SAMPER MÁRQUEZ, JUAN JOSÉ, Introducción a los Sistemas Expertos <http://www.redcientifica.com/doc/doc199908210001.html> – 2006
6. SLOAN, R., PARKER, S., CRAVEN, J., SCHAFFER, M. Expert Systems on SAG Circuits: Three Comparative Case Studies, MinnovEX Technologies, Inc.
7. VIEJO HERNANDO, DIEGO, Sistemas Expertos - <http://www.divulgacion.com>. - 2003
8. Página WEB ABB PERU: <http://www.abb.com.pe/>