

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO  
PARA PREPARACIÓN DE LECHADA DE CAL A PARTIR  
DE CAL SECA CON LA UTILIZACIÓN DE AGUA DE  
PLANTA PARA CONTROL DEL PH DE PLANTA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO - ELECTRICISTA**

**RONALD ELY ROQUE CHAMORRO**

**PROMOCIÓN 2010 – II**

**LIMA-PERU**

**2015**

Dedico el presente trabajo a mis padres quienes han estado en todo momento conmigo brindándome todo su apoyo.

## **Agradecimiento**

Le agradezco a Dios por haberme guiado durante toda mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.

A mis padres que me han apoyado en todo momento, por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación, en el transcurso de toda mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida.

A mis Profesores quienes fueron los mis guías en la realización del presente trabajo.

## INDICE

PRÓLOGO	01
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	03
1.1. Antecedentes	03
1.2. Objetivo principal	04
1.3. Objetivo secundario	04
1.4. Justificación de la realización	05
1.5. Alcances	05
1.6. Limitaciones	05
CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO Y SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE DOSIFICACIÓN DE CAL	06
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO	06
2.1.1 Carga de Cal al Silo: Sistema de carga de cal de la bombona al silo (Uploading).	14
2.1.2 Sistema de descarga de cal.	15
2.1.3 Preparación de la lechada de cal	16
2.1.4 Principales características de la planta de Lechada de Cal	20
2.1.4.1 Sistema captador de polvo	21
2.1.4.2 Activador de Fondo Vibratorio	21
2.1.4.3 Válvula de Guillotina accionamiento neumático	21

2.1.4.4	Válvula Rotativa	21
2.1.4.5	Alimentador de Tornillo	21
2.1.4.6	Apagador de Cal Viva	21
2.1.4.7	Agitadores – Atricionadores de Apagador de Cal	21
2.1.4.8	Sistema de Captación y Lavado de Gases	21
2.1.4.9	Hamero Vibratorio	22
2.1.4.10	Estanque de Traspaso de Lechada de Cal	22
2.1.4.11	Agitador de Estanque de Traspaso de Lechada de Cal	22
2.1.4.12	Bomba de Estanque de Traspaso de Lechada de Cal	22
2.1.4.13	Estanque de Alimentación de Lechada de Cal	22
2.1.4.14	Agitador de Estanque de Alimentación de Lechada de Cal.	22
2.1.4.15	Instrumentos	22
2.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO	23
2.2.1	Descripción de Estrategias de Control	23
2.2.2	Filosofía de control	24
2.2.3	Descripción y Enclavamientos	26
2.2.3.1	Carga Silo de Cal. (500-SL-001)	26
2.2.3.2	Descarga de cal de Silo Slaker	27
2.2.3.3	Preparación de la Lechada de Cal.	28
2.2.3.4	Sistema de dilución y Clasificación de Lechada de Cal	32
2.2.3.5	Lavador de Gases	34

CAPITULO 3: IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y DETERMINACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO	35
3.1. Identificación del problema.	35
3.1.1 Estado Situacional encontrado	35
3.1.2 Estado Futuro deseado	35
3.1.3 Dificultades encontradas en el proceso	35
3.2 Planteamiento de la Hipótesis de Trabajo.	36
3.2.1 Diagrama Medios-Fines.	36
3.2.2 Planteamiento de la Hipótesis	38
CAPITULO 4: FUNDAMENTO TEÓRICO	39
4.1 CRITERIO DE SELECCIÓN GENERAL DE VÁLVULAS DE CONTROL.	39
4.1.1 Característica de flujo	40
4.1.2 Dimensionamiento de válvulas de control	40
4.1.3 Procedimiento general para el dimensionamiento	41
4.1.3.1 Determinar la caída de presión a través de la válvula $\Delta pV$ .	41
4.1.3.2 Determinación de los caudales de operación	42
4.1.3.3 Calculo de CV para líquidos	42
4.1.3.3 Calculo de CV para gases o vapor	42
4.1.3.4. Determinación del Diámetro	45
4.2 CRITERIO DE SELECCIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA	46
4.2.1. Alcance de medición	47
4.2.2. Exactitud	47

4.2.2.1. Termómetro Patrón de Resistencia de Platino (SPTR)	47
4.2.2.2. Termómetros de Termopar. (TC)	48
4.2.2.3. Termistores	48
4.2.2.4. Termómetros de Líquido en Vidrio (TLV)	48
4.2.3. Condiciones bajo la cual la medición debe ser realizada	48
4.2.3.1. Medición en superficie	49
4.2.3.2. Medición en Inmersión	49
4.3 CRITERIO DE SELECCIÓN DE FLUJOMETROS	50
4.3.1. Requerimientos de aplicación	51
4.3.2. Requerimientos de performance.	52
4.3.3. Requerimientos de costo	52
4.4. SELECCIÓN DEL PLC	53
4.4.1. Tamaños de PLC's	53
4.4.2. Definición del Sistema de Control	54
4.4.3 Consideraciones para Entradas y Salidas	55
4.4.4. Organización del Sistema de Control	55
4.4.5. Consideraciones de Memoria	56
4.4.6. Consideraciones de Software	57
4.4.7. Periférico	57
4.4.8. Condiciones Físicas y Ambientales	58
CAPITULO 5: SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	59
5.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN	59
5.1.1 Diseño de Plano P&ID	59
5.1.2 Elaboración del Listado de Instrumentos	59

5.2	Diseño del Sistema de Control	59
	5.2.1 Elaboración del Listado de Entradas y Salidas	59
	5.2.2 Diseño del Diagrama de Interconexión	60
5.3	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL	61
	5.4.1 Dimensionamiento del PLC	61
	5.4.2 Diseño del Diagrama Unifilar	61
CAPITULO 6: ANÁLISIS ECONÓMICO		62
6.1	INVERSIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN	62
6.2	ESTIMADO DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN	62
CONCLUSIONES		63
RECOMENDACIONES		64
BIBLIOGRAFÍA		65
ANEXOS		
PLANOS		

## PRÓLOGO

El presente informe tiene como objetivo principal el diseño del control automático para preparación de lechada de cal a partir de cal seca con la utilización de agua de planta para controlar el PH de la planta en los distintos procesos donde sea necesario.

En el capítulo uno se hace mención al objetivo principal y los objetivos secundarios, se da a conocer el alcance y las limitaciones del trabajo para darnos una mejor idea de lo que se quiere lograr.

En el capítulo dos se describe a detalle el proceso de producción, el sistema de control de la planta de cal, el procedimiento que se sigue desde la carga, preparación y descarga de la lechada de cal, se da a conocer cada uno de los equipos de la planta, se da a conocer la filosofía de control de la planta.

En el capítulo tres se hace la identificación del problema para proponer la hipótesis de trabajo a realizar.

En el capítulo cuatro se menciona el fundamento teórico de cada uno de los componentes tales como criterio de selección características, etc.

En el capítulo cinco se plantea la solución al problema con el diseño del sistema de instrumentación, diseño del sistema de control, elaboración del listado de instrumentos, elaboración del listado de entradas y salidas diseño del diagrama de interconexión y el diseño del tablero de control.

En el capítulo seis se realiza un breve análisis económico del tiempo de recuperación de la planta de cal cuando entre en funcionamiento la Planta.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

La cal es probablemente el producto de una reacción química más antiguo utilizado por el hombre. Sus usos han sido y son innumerables y muy nobles, especialmente en la construcción, agricultura y Minería.

Actualmente la Cal es ampliamente utilizada en las distintas ramas de la industria. Entre las más importantes que se usan podemos señalar:

- La industria de la pulpa y del papel.
- La industria petrolífera.
- La industria de los alimentos y
- La del tratamiento de aguas.

Como materia prima, un uso industrial importante de ella es para la producción de carburo de calcio, compuesto que al descomponerse en presencia de agua forma el inflamable gas acetileno, usado en los sopletes de soldar. El carburo de calcio es a su vez materia prima para producir el

cianuro de calcio, un compuesto para la fabricación de ciertas resinas plásticas.

Finalmente, las excelentes propiedades neutralizantes y costo de la cal hacen de ella el mejor reactivo para usar en todo tipo de reacciones industriales reguladoras del PH.

Dado ésta última propiedad por la cual la cal se ha constituido en uno de los más importantes reactivos de la metalurgia extractiva y del procesamiento de minerales, usándose para ese fin en la hidrometalurgia y en la concentración de minerales por flotación. Por otra parte las ventajosas características que presenta la cal para uso como fundente y como desmoldante, la han llevado a constituirse en uno de los principales insumos de las fundiciones de cobre.

## **1.2. OBJETIVO PRINCIPAL**

Diseñar un sistema de control automático para preparación de lechada de cal a partir de cal seca con la utilización de agua de planta para control del PH de planta.

## **1.3. OBJETIVO SECUNDARIO**

Seleccionar la instrumentación del sistema.

Diseñar el control automático del sistema.

Diseñar el tablero de control del sistema.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA REALIZACIÓN**

Con el sistema de control automático podremos monitorear desde lugares remotos o salas de control remotos todas las variables controladas del proceso, permitiéndonos actuar de manera precisa ante cualquier falla eventual.

El diseño del sistema de control automático permitirá el ahorro en personal destinado para esta tarea, además logrará una dosificación con mayor precisión reduciendo las pérdidas de cal

#### **1.5. ALCANCES**

En el diseño del sistema de control automático se contempla:

- Selección de los instrumentos.
- Diseño del sistema de control.
- Diseño del tablero de control.

El diseño del sistema de control automático no contempla el sistema de, alimentación hacia los motores, arrancadores de motores, cableado a través de bandejas hacia los instrumentos.

#### **1.6. LIMITACIONES**

El presente informe se limita al diseño del sistema de control automático de la planta y abarca el área específica de la instrumentación y control.

## **CAPITULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO Y SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE DOSIFICACIÓN DE CAL**

#### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO**

El término “Apagado” se refiere a la producción de pulpa de hidróxido de calcio a partir de (cal viva o CaO) con más agua de la que se necesita para la hidratación.

Cuando el óxido de calcio se combina con agua (se hidrata) y su peso aumenta en un 32 por ciento. Por ejemplo 1,0 kg de CaO se convierte en 1,32 kg de Ca(OH)<sub>2</sub> o cal apagada.

El apagado inicial de la cal ocurre cuando se mezcla la cal viva con agua de acuerdo con la reacción.



A medida que la reacción continúa, las partículas de cal viva se convierten en partículas más pequeñas de cal apagada. La cal calcinada (cal viva) simplemente se denomina cal. El proceso es ayudado mediante agitación,

molienda o cizallamiento automático de la masa en reacción. La pulpa de cal apagada en agua recibe el nombre de lechada de cal.

Los siguientes sistemas se analizan en esta descripción del proceso y de los equipos:

- Descarga desde tolva y manipulación de cal.
- Preparación de la lechada de cal.

El apagado puede verse afectado por varios factores: la reactividad de la cal, el tamaño de las partículas, la temperatura de apagado, la temperatura del agua y la calidad del agua.

Los tipos de cal más reactivos producen un calentamiento rápido, se apagan más rápidamente dando una pulpa suave y usan más agua para mantener temperaturas entre los 70 y 80°C.

El agua caliente (sobre los 18 °C) acelera la reacción inicial, aumenta la temperatura y por lo general, aumenta la eficiencia de la operación. El agua fría no sólo desacelera la reacción inicial, sino que también reduce la temperatura general al extraer calor desde dentro del apagador de cal y de la pulpa.

Cuando se agrega demasiada agua fría, se produce una condición llamada ahogamiento. La superficie de la partícula de cal viva se hidrata rápidamente,

formando una capa que impide la hidratación del núcleo interior. Muy poca agua o agua excesivamente caliente da lugar al hidrato calcinado. Esta condición es potencialmente peligrosa debido a que las temperaturas extremas alcanzadas pueden de hecho consumir por ebullición el agua utilizada en la hidratación inicial, deshidratando las partículas inicialmente hidratadas.

Estudios de la calidad del agua han demostrado que la abundancia de iones sulfito y sulfato en el agua de apagado pueden ejercer un efecto perjudicial sobre el apagado. Los iones de sulfito y sulfato tienden a tapar las superficies de cal viva e impiden que el agua penetre en las partículas de cal viva, dando como resultado cal de mala calidad, no completamente apagada que es rechazada junto con el residuo de arenisca y de partículas sin contenido de cal.

La cal viva puede contener impurezas como sílice y piedra caliza no calcinada, denominados colectivamente arenisca. Al realizarse el apagado en un molino de molienda, la arenisca y las partículas no apagadas de cal viva se reducen de tamaño hasta que logran pasar a través del sistema con la lechada de cal, eliminando así la necesidad de rechazar los residuos de arenisca y de partículas sin contenido de cal.

El describir un apagador de cal como sólidos en suspensión es un error. La realidad es que una muy pequeña porción de la mezcla de cal estará en solución (ver tabla 1).

La cal no sólo tiene muy baja solubilidad en el agua (menos del 0.2%), sino que también su solubilidad es inversamente proporcional a la temperatura, la planta operará con una relación aproximada agua-cal 4:1 y corresponden al tipo de "Detection tipe slaker" la razón de alimentación de 4 a 1 produce la siguiente mezcla.

1.00	Lbs. CaO	————	1.32	Lbs. Ca(OH) <sub>2</sub>
4.00	Lbs. H <sub>2</sub> O	————	3.68	Lbs. Free H <sub>2</sub> O
5.00	Lbs. Total		5.00	Lbs. Slurry
4.00 Lbs. Ca(OH) <sub>2</sub>		=	26.4 % Sólidos por Peso	
5.00 Lbs. Slurry				

La reacción entre cal y agua es exotérmica y espontánea. Ya que la primera cal reacciona con agua, se produce calor y los materiales circundantes se calientan. (ver tabla 2).

El próximo incremento de cal reacciona en esta base cálida y eleva sus temperaturas de manera uniforme.

Una vez que la lechada está dentro del apagador, pierde calor al tomar contacto con el agua. El agua precalentada produce una reacción aún más

caliente. El proceso continúa hasta alcanzar un equilibrio entre el calor producido y el calor perdido en la lechada y fuera del apagador (ver tabla 3).

El Apagador está diseñado con una chaqueta en paredes verticales, por la cual el agua circula antes de ser introducida a la cámara de apagado. En esta chaqueta el agua eleva su temperatura a aproximadamente 30°C antes de entrar a la cámara del apagador. No se requiere ningún recurso externo para precalentar el agua. Sólo al inicio de una operación después de una detención prolongada.

La hidratación de una gran cantidad de lechada generará calor, con una temperatura promedio de 80° C en un rango de 70°C a 80° C cuando se agrega agua a una proporción de 1 parte de cal viva por 4 partes de agua (La temperatura puede variar al ser dependiente de la calidad y reactividad de cal a utilizar) Las aspas del agitador que están en movimiento a lo largo del apagador generan una mezcla y suspensión inmediata, facilitando la dispersión y la disolución de grumos durante unos 10 minutos de detención o residencia desde la entrada a la descarga.

La estructura del agitador está soportada en los terminales del apagador por ejes tubulares, los cuales van insertos en empaquetadura de sello de con agua para evitar la salida del material.

Una estructura de aspiración mantiene la cámara bajo presión negativa leve para prevenir el escape de polvo y vapores no deseados.

La cal puede alcanzar alta o baja reactividad, debido a muchos factores presentes al producir cal, a veces una misma carga del mismo fabricante variará en sus características y tamaño de apagado, de apariencia y cantidad de núcleo producido.

La cal más reactiva produce una lechada caliente, sin grumos, y usa más agua para mantener temperaturas de entre 70° a 78° C. Algunas cales son “engañosas” como que son relativamente lentas para comenzar el apagado, pero una vez que alcanzado calor, se torna más activa.

Es probable que partículas más pequeñas se activen más fuertemente y tenga más altos porcentajes de pequeños grumos que grandes partículas de la misma cal.

La Figura 1 muestra clasificaciones de cal descritas por AWWA B-202-83- Estudio de Índice de Apagado.

La temperatura del agua puede también afectar el resultado del apagado. El agua tibia (alrededor de 18° C) acelera la reacción inicial, eleva la temperatura total y generalmente aumenta la efectividad de la operación. El agua fría (bajo los 5° C) no sólo retarda la reacción inicial sino también

reduce la temperatura total, ya que quita calor desde la superficie de la partícula de cal viva lo que produce la formación de una capa que impide la hidratación del núcleo.

La Cal apagada contendrá partículas de arena y cantidades de sólidos las cuales serán retenidas por el harnero. El agua excesivamente caliente provocará un hidrato “quemado”.

Esta condición, es potencialmente peligrosa, ya que las temperaturas alcanzadas pueden hacer hervir el agua usada inicialmente en la hidratación y deshidratar las partículas hidratadas inicialmente lo que se traduce en un aumento en el consumo de cal.

La calidad del agua puede ser críticamente importante en el apagado de la cal. Los estudios han mostrado que una alta concentración de iones de sulfito y sulfato en el agua de apagado puede ejercer un efecto nocivo para la correcta hidratación de la cal.

La presencia de estos iones tiende a “Blindar” la superficie de las partículas de cal viva evitando que el agua necesaria para el apagado penetre hasta el centro de las partículas. Esto se traduce en un apagado incompleto de la cal viva.

La buena operación del apagador está basada en que la mezcla tendrá un contenido de sólidos que producirán una buena temperatura de apagado (entre 70°C y 80°C) y una viscosidad tal que le permita separarse fácilmente de la arenilla (Grit). Estas partículas se asemejan a arena mojada alcanzando tamaños de ¼” a 100 mallas. El apagador tiene una positiva eliminación de arenilla descargando la lechada al 15 % de sólidos.

El apagador es capaz de descargar una gran cantidad de lechada cremosa, hasta con un 30% de sólidos, sin embargo el 25% es más estándar.

#### Características del Apagador:

1. Produce una lechada de cal a un 25% de sólido (4:1) que puede ser diluida a un 10 a 15%.
2. Al pasar el agua de alimentación por la chaqueta de precalentamiento, permite un buen apagado. No requiere recurso calórico externo.
3. Continuo monitoreo de la temperatura de apagado.
4. Control de alimentación automático para mantener la temperatura de la lechada.
5. Construcción sólida de chapa de acero y estructuras resistentes.
6. Agitador y aspas de acero sólido en todos los compartimentos del apagador mantienen la lechada in suspensión constante, evitando la formación de “puntos calientes”.

7. Eficiente malla removedora de arenilla asegura nula oportunidad de arenilla hacia el estanque de almacenamiento de lechada (en caso de requerirse, dependiendo del contenido de impurezas de la cal a ser procesada ).
8. Poseen rodamientos (descansos) aislados de la lechada.
9. Pocas piezas móviles, diseño simple.

#### **2.1.1 Carga de Cal al Silo: Sistema de carga de cal de la bombona al silo (Uploading).**

El sistema de apagado de cal recibe habitualmente cal viva con una densidad aparente de aproximadamente 0.9 ton/m<sup>3</sup> en camiones de aproximadamente 28 ton de capacidad.

La cal viva se transfiere a través de un sistema de transporte neumático accionado por un compresor de pistones hacia el Silo de Almacenamiento Principal de cal de 380 toneladas métricas de capacidad.

La cal viva se extrae desde el Silo de Almacenamiento Principal de cal mediante un cono vibrador o activador de fondo vibratorio hacia la válvula rotativa, la cual ajusta su capacidad mediante un variador de frecuencia, esta válvula a su vez descarga sobre el tornillo volumétrico quien transporta la Cal hasta el equipo apagador.

Hay varios enclavamientos asociados durante el proceso de operación a fin de garantizar una operación continua y segura.

### **2.1.2 Sistema de descarga de cal.**

La cal contenida en el Silo de almacenamiento 500 – SL - 001 es descargada a través de un activador de fondo vibratorio 500 – VB – 001/002, pasando por una válvula de guillotina con accionamiento neumático 500 – VC – 001, llegando a la válvula rotatoria 500 – RV – 001, quien regula el flujo de Cal y descarga en el tornillo alimentador 500 – FE - 001, el cual desplaza la cal a una velocidad prefijada.

El motor de la válvula rotatoria es accionado por un variador de frecuencia, cuyo propósito es permitir ajustar la velocidad de giro de la válvula y controlar el flujo de cal a dosificar. Durante la fase de puesta en marcha de la planta se realiza la calibración y curva de operación del equipo, normalmente una vez ajustada su velocidad esta no cambia salvo nuevo ajuste que desee el operador. Por lo tanto, el ajuste es un proceso manual.

Posteriormente, la cal que abandona la boca de salida del tornillo alimentador, ingresa a la primera cámara del apagador de cal 500 – SR - 001.

Equipos principales involucrados:

- Silo de Almacenamiento de Cal, 500 – SL - 001
- Activador de fondo vibratorio, 500 - VB – 001/002

- Válvula Guillotina con accionamiento neumático, 500 – VC – 001
- Válvula rotativa, 500 – RV - 001
- Tornillo Alimentador, 500 - FE – 001

### **2.1.3 Preparación de la lechada de cal**

El proceso de apagado se realiza descargando la cal transportada por el Tornillo Alimentador 500 - FE - 001, al interior del equipo apagador 500 – SR – 001, donde se produce la reacción de apagado mediante el agregado continuo de agua.

La reacción con el agua de apagado, cuyo flujo es medido por flujómetro FIT0500116 genera un aumento brusco de la temperatura que puede llegar a provocar ebullición dentro de las cámaras del apagador, alcanzando una temperatura superior a la temperatura de ebullición del agua, si el proceso no es convenientemente controlado.

Debido a que la reacción es exotérmica, es la temperatura la variable crítica del proceso. Por tal razón, dado un valor de flujo másico constante de cal viva, el flujo de agua de apagado se controla por medio de una válvula de control TV0500122, cuya modulación mantiene una razón cal/agua al apagador, manteniendo un rango de temperatura que asegura el proceso completo de apagado.

Dado eventuales variaciones y propias del proceso de alimentación de cal viva al apagador, se registrarán variaciones de medición de temperatura manteniéndose la operación del proceso dentro de un rango de temperatura que varíe entre los 70 °C a 80 °C, la cual es medida mediante termocuplas TT0500121/122 instaladas en la cámara del apagador.

El valor de temperatura de operación deberá ajustarse finalmente en terreno, durante el comisionamiento y puesta en marcha, dado que es muy dependiente de la calidad de cal procesada.

La válvula rotativa 500 - RV – 001 dispone de un sensor de velocidad cero SSL0500110, para indicación de condición de alarma, y de un VDF para la regulación de la velocidad de giro.

El Tornillo Alimentador 500 - FE – 001 dispone de un sensor de velocidad cero SSL0500112, para indicación de condición de alarma.

El apagador está diseñado con una chaqueta externa que permite que la temperatura del agua de entrada al apagador se lleve a aproximadamente 30°C, sin calentamiento externo usando el calor generado por la propia reacción de apagado de la cal.

Los agitadores atricionadores 500 - AG – 003/004 instalados en cada cámara de apagado, proveen el cizalle necesario para disgregar partículas, junto con

el grado de mezcla necesario para homogeneidad del medio y la turbulencia necesaria para mantener las partículas sólida en suspensión evitando así su decantación en el fondo de las cámaras de apagado.

El sistema de aspiración compuesto por: lavador 500 – SK – 001, venturi 500 – VT – 001, y ventilador 500 – FA – 001, el cual mantiene una leve presión negativa dentro de las cámaras del apagador, lo cual favorece el escape de vapores de agua.

La relación másica de agua necesaria para el correcto apagado es de aproximadamente 4:1 con respecto a la cal viva alimentada, concentración que en definitiva, es dependiente de la temperatura de apagado de la cal. La concentración de sólidos de un 25 % produce menos incrustaciones en las líneas de trasvasije.

La lechada de cal es descargada por gravedad hacia el harnero vibratorio 500 – SC – 001, para eliminar posibles impurezas que pueda contener la lechada y material inerte que no reacciona durante el proceso de apagado, además es en este equipo donde se incorpora el agua de necesaria para alcanzar las condiciones operativas deseadas (15% p/p de sólidos en lecha final). Las partículas que no reaccionan se evacuan hacia un recipiente que debe ser retirado periódicamente.

Esta agua de dilución cumple una doble función, pues además de diluir realiza un lavado de las arenillas y/o impurezas que son retiradas de la lechada por el harnero.

El flujo de agua de dilución es medido por flujómetro FIT0500114 y ajustado automáticamente mediante modulación de la válvula de control FV0500114.

La lechada diluida descarga al estanque de traspaso 500 – TK – 001, el cual está provisto de agitador 500 – AG – 001 cuyo objetivo es homogenizar y mantener suspendidas las partículas de cal apagada ( insolubles en agua ) y de un sensor indicador de nivel LIT0500131 el cual controla la operación de las bombas de traspaso de lechada 500 – PU – 003 A/B, las cuales impulsan el fluido hacia el estanque de almacenamiento 500 – TK – 002, cuya función es garantizar el stock de lechada para el proceso productivo, este estanque también posee un agitador 500 – AG – 002 y cuya función es mantener la suspensión de la lechada.

Este estanque cuenta con un sensor de nivel LIT 0500136, el cual alarma en caso de nivel alto procediendo a detener la preparación de lechada, e indicará cuando es requerido reiniciar el proceso de preparación en caso de encontrar un nivel bajo.

Equipos involucrados:

- Válvula Rotativa 500 – RV - 001

- Tornillo Alimentador 500 – FE – 001
- Equipo Apagador de Cal 500 – SR – 001
- Agitadores Atricionadores 500 – AG – 003/004
- Termocupla TT0500121/122
- Lavador 500 – SK – 001
- Venturi 500 – VT – 001
- Ventilador 500 – FA – 001
- Estanque de Traspaso 500 – TK – 001
- Agitador TK de traspaso 500 – AG – 001
- Lazo de Control Agua de Apagado, flujómetro FIT0500116 / válvula TV0500122
- Lazo de Control Agua de Dilución, flujómetro FIT0500114 / válvula FV0500114
- Sensor de nivel LIT0500131
- Bombas de traspaso 500 – PU – 003 A/B
- Estanque de alimentación 500 – TK – 002
- Agitador TK Alimentación 500 – AG – 002
- Sensor de Nivel LIT0500136

#### **2.1.4 Principales características de la planta de Lechada de Cal**

Equipos principales:

##### *2.1.4.1 Sistema captador de polvo*

Ver características del sistema captador de polvo en la tabla 5.

#### *2.1.4.2 Activador de Fondo Vibratorio*

Ver características del activador de fondo vibratorio en la tabla 6.

#### *2.1.4.3 Válvula de Guillotina accionamiento neumático*

Ver características de la guillotina de accionamiento neumático en tabla 7.

#### *2.1.4.4 Válvula Rotativa*

Ver características de válvula rotativa en tabla 8.

#### *2.1.4.5 Alimentador de Tornillo*

Ver características de alimentador de tornillo en tabla 9.

#### *2.1.4.6 Apagador de Cal Viva*

Ver características de apagador de cal viva en tabla 10.

#### *2.1.4.7 Agitadores – Atricionadores de Apagador de Cal*

Ver características de agitadores – atricionadores de apagador de cal en tabla 11.

#### *2.1.4.8 Sistema de Captación y Lavado de Gases*

Ver características del sistema de captación y lavado de gases en tabla 12.

#### *2.1.4.9 Harnero Vibratorio*

Ver características de Harnero Vibratorio en tabla 13.

#### *2.1.4.10 Estanque de Traspaso de Lechada de Cal*

Ver características del estanque de traspaso de Lechada de Cal tabla 14

#### *2.1.4.11 Agitador de Estanque de Traspaso de Lechada de Cal*

Ver características de agitador de estanque de traspaso de lechada de cal en tabla 15.

#### *2.1.4.12 Bomba de Estanque de Traspaso de Lechada de Cal*

Ver características de bomba de estanque de traspaso de lechada de cal en tabla 16.

#### *2.1.4.13 Estanque de Alimentación de Lechada de Cal*

Ver características de estanque de alimentación de lechada de cal en tabla 17.

#### *2.1.4.14 Agitador de Estanque de Alimentación de Lechada de Cal*

Ver características de agitador de estanque de alimentación de lechada de cal en tabla 18.

#### *2.1.4.15 Instrumentos*

Ver listado de instrumentos en tabla 19.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO**

### **2.2.1 Descripción de Estrategias de Control**

Se definen dos modos de operación MANUAL y AUTOMATICO. La selección del modo de operación quedará definida por la posición del selector virtual MANUAL/AUTOMATICO, incorporado en las pantallas de la estación de operación. Independiente del modo de operación, todas las señales de estados de los equipos serán monitoreados desde el sistema de control y los enclavamientos de seguridad.

Los equipos serán comandados por botoneras de “software” configurados en la estación de operación del sistema de control.

#### **a) Modo Automático**

En mando automático la planta funcionará de acuerdo a las secuencias y restricciones de operación definidas más adelante en este documento. Este mando será seleccionado por defecto y será el modo normal de operación.

#### **b) Modo Manual**

En este modo, cada equipo en forma individual podrá ser comandado desde la estación de operación a voluntad del operador, sin responder a secuencias de enclavamientos o restricciones de partida o parada, respetando las paradas de emergencia y los enclavamientos de seguridad. Esta modalidad es exclusivamente para uso en mantención.

### **2.2.2. Filosofía de control**

Como ya se ha indicado, la filosofía de control de la planta se basa principalmente en controlar la temperatura dentro del apagador y en controlar el porcentaje de sólidos de la lechada de cal final. Para poder controlar estas dos variables, el sistema regula los flujos de agua de alimentación al apagador y al estanque de dilución. En condiciones normales de operación, el sistema regula el flujo de agua necesario para apagar las 6 tph de cal viva del set point y el flujo de agua agregada a la salida del apagador para obtener una lechada de cal con un 15 % de sólidos aproximadamente.

La temperatura del apagador depende directamente de la cantidad de cal viva alimentada, de su porcentaje de pureza y del flujo de agua ingresada al apagador.

Debido a que las dos primeras variables poseen una alta estabilidad en su valor, el control directo de la temperatura se realiza regulando el flujo de agua que ingresa al apagador. Según lo anterior, si la temperatura del apagador aumenta, el controlador comanda abrir la válvula que regula el ingreso de agua, ayudando a la disminución de la temperatura. La cantidad estándar de agua agregada en el apagador permite obtener una cal apagada con un porcentaje de sólidos del 25% aproximadamente.

El porcentaje de sólidos final de la lechada se logra mediante la regulación del flujo de agua al estanque de dilución. El lazo de control estima por balance de masa, la cantidad de agua necesaria para lograr un 15 % de sólidos, agregando una parte en el apagador y la otra parte después del apagado de cal, en el estanque indicado. El modo de control por defecto de la planta es el modo automático, permitiendo de esta manera que el DCS regule los flujos de cal viva y agua, según la lógica de programación definida.

En el modo de operación automático, las principales responsabilidades del operador son:

Velar por el cumplimiento de las normativas de seguridad, medio ambiente y calidad de vida, revisando constantemente inspecciones en terreno con el fin de detectar posibles derrames, cables eléctricos sueltos o mal conectados, vibraciones anormales, mala iluminación, exceso de ruido o polvo, disponibilidad de las vías de escape, estado de equipos y sistemas de seguridad, estado de válvulas de purga, etc.

Asegurar la disponibilidad de insumos que permitan una normal operación de la planta, principalmente agua, electricidad y cal viva.

Revisar y coordinar que el sistema receptor de la lechada de cal está operativo y con capacidad de recepción.

Revisar en terreno que los switch manuales partir/parar de algunos equipos e instrumentos se encuentren encendidos (motores de tornillos, válvulas solenoides, calefactor, motores de agitadores, motor de bomba, etc.).

Definir en la Pantalla de Control Principal el set point de las toneladas por hora (tph) de cal viva que serán alimentadas a los apagadores y el porcentaje de sólidos de la lechada de cal final.

Revisar periódicamente la pantalla de alarmas y tomar acciones correctivas según corresponda.

### **2.2.3. Descripción y Enclavamientos**

A continuación se definen los enclavamientos, condiciones de partida, parada y funcionamiento por sistemas funcionales.

Todas las señales serán representadas en el sistema de control DCS. Cada una de las señales de entradas digitales deben ser configuradas como señal de alarmas y/o evento en la base de datos del sistema supervisor.

#### *2.2.3.1. Carga Silo de Cal. (500-SL-001)*

Equipos involucrados:

- Compresor 500-GB-001.
- Silo Almacenamiento de Cal 500-SL-001.
- Filtro de Polvo 500-DC-001.

- LT-0500101, Transmisor de Nivel Silo de Cal.
- LSH-0500103, Switch de Nivel Alto Silo de Cal.
- LSL-0500104, Switch de Nivel Bajo Silo de Cal.

La carga del silo se efectúa por medio de camiones caleros, quienes cargarán el silo de cal por medio de transporte neumático, activado por las botoneras ubicadas en el controlador incorporado en el compresor. Además se consideran enclavamientos de nivel alto LSH-0500103, que detendrán en forma automática el suministro de transporte fluidizado de cal, al silo.

El controlador del filtro cartucho se activará una vez que la presión diferencial entre el silo y la atmosfera supere los 0,01 BAR, comenzando la secuencia de limpieza las mangas. (500-DC-001).

#### *2.2.3.2. Descarga de cal de Silo Slaker*

Equipos involucrados:

- Silo de Cal 500-SL-001
- Fondo Vibratorio 500-VB-001; 500-VB-002
- Válvula de Compuerta 500-VC-001, (HV-0500107)
- Válvula Rotatoria 500-RV-001
- Alimentador de Tornillo 500-FE-001

La cal seca contenida en el silo es inducida a salir por medio del fondo vibratorio 500-VB-001; 500-VB-002 y dosificada por la válvula rotatoria 500-RV-001 el cual descargará en tornillo alimentador 500-FE-001.

El circuito de alimentación de cal, dispone de una válvula rotatoria y un tornillo alimentador.

En la válvula rotatoria disponemos de un variador de velocidad, el cual será aforado y se ingresará un setpoint de peso.

La descarga del tornillo alimentador es directa en el apagador Slaker. En este punto la cal se mezcla con agua para ser hidratada y apagada.

La válvula Rotatoria, dispone de un sensor de velocidad cero, para indicación de condición de alarma.

En pantalla de operación (DCS) se visualizarán los estados de los equipos y las mediciones de los instrumentos. Se tendrá una curva de tendencia de los caudales y temperaturas.

#### *2.2.3.3. Preparación de la Lechada de Cal.*

Equipos involucrados:

- Slaker 500-SR-001
- Válvula de Control Agua de Apagado TV-0500122

- Medidor de Caudal FIT-0500116
- Sensor de Temperatura Lechada TT-0500121; TT-0500122
- Sensor de Temperatura Cámara Calefactora TT-0500128
- Switch de Nivel Lechada de Cal, LS-0500124
- Switch de Nivel Cámara Calefactora , LS-0500132
- Válvula Solenoide Agua de Emergencia HV-0500120
- Scrubber 500-SK-001
- Válvula Solenoide Agua Scrubber HY-0500119
- Ventilador Scrubber, 500-FA-001
- Agitadores Slaker, 500-AG-003; 500-AG-004

El apagador Slaker está diseñado con una chaqueta externa que permite que la temperatura del agua de entrada al apagador se lleve a aproximadamente 40°C, por medio de un control de temperatura que se debe realizar en el PLC, solo si el switch de nivel LS-0500132, está activado.

El proceso de apagado se realiza descargando la cal transportada por el tornillo al slaker.

Nunca se puede agregar cal si no tenemos agua en el interior, por lo tanto debemos asegurar que existe un nivel de agua en el interior del slaker por medio del switch de nivel LS-0500124.

En este punto se produce la reacción de apagado de la cal, es decir su paso de cal viva ( $\text{CaO}$ ) a cal apagada o hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Esto provoca un aumento de la temperatura, que puede llegar provocar ebullición dentro del reactor alcanzando incluso temperaturas por sobre los  $100^\circ\text{C}$ .

La temperatura es controlada por medio de la válvula de control TV-0500122 que regula el caudal de entrada de agua al equipo.

En modo automático la temperatura será controlada por el PLC a través de un bloque de control PI, donde el operador pondrá el set point de temperatura de trabajo, comprendido en un rango entre  $60^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$ . En el caso de que la temperatura baje de  $25^\circ\text{C}$  menos de la temperatura de set point el programa generará una alarma siendo necesario revisar válvula rotatoria, tornillo alimentador, fondo vibratorio, nivel de cal en silo.

Por ser el control de temperatura lo más crítico de este proceso se definirán dos niveles de alarma de temperatura alta, estos umbrales serán dependientes de la temperatura de Set Point.

El primer nivel de alarma ( $5^\circ\text{C}$  sobre la temperatura de Set Point) dará la señal para que entre en funcionamiento la válvula solenoide HV-0500120 del agua de emergencia y tendrá como objetivo bajar la temperatura al punto de set point.

El segundo nivel alarmará (10°C sobre la temperatura de Set Point) detendrá la alimentación de cal hasta que la temperatura del sistema se encuentre 5°C bajo el set point.

Temperatura Set Point: 60° C.

Temperatura Primera Alarma (se abre agua de emergencia): Temperatura de Set Point más 5°C :65°C.

Temperatura Segunda Alarma (se detiene alimentación de cal): Temperatura de Set Point más 10°C: 70°C.

El circuito de alimentación de cal, dispone de una válvula rotatoria y tornillo alimentador. En válvula rotatoria disponemos de un variador de velocidad, el cual será regulado según el setpoint de peso que se ingresará en el PID asociado en el PLC. Según la curva de aforo de la válvula rotatoria.

La válvula rotatoria 500-RV-001, dispone de un sensor de velocidad cero, para indicación de condición de alarma.

En modo manual el operador desde pantalla podrá abrir o cerrar las válvulas y partir y parar motores a su voluntad.

Los Agitadores 500-AG-003; 500-AG-004, debe operar permanentemente y se debe generar una alarma ante su detención. Ante una falla del agitador se debe parar el sistema (cae en lavado).

El sistema de aspiración compuesto por ventilador extractor 500-FA-001 y la Válvula Solenoide Agua de Lavado Scrubber HY-0500119, mantiene una leve presión negativa dentro del sistema de apagado de cal a fin de prevenir el escape de vapores y polvo haciéndolos pasar por dos cámaras de lavado de vapores, entregando un aire limpio al ambiente.

La relación de agua necesaria para el correcto apagado es de aproximadamente 4:1 con respecto a la cal viva alimentada, concentración que en definitiva, es dependiente de la temperatura de apagado de la cal.

La concentración de sólidos de un 25 % produce menos incrustaciones en las líneas de trasvasije.

#### *2.2.3.4. Sistema de dilución y Clasificación de Lechada de Cal*

Equipos involucrados:

- Estanque de Traspaso 500-TK-001
- Estanque de Almacenamiento 500-TK-002
- Agitador TK de Traspaso 500-AG-001
- Agitador TK de Almacenamiento 500-AG-002
- Bombas de Descarga TK de Traspaso 500-PU-003A/ 500-PU-003B
- Sensor de nivel TK de Traspaso LIT-0500131
- Sensor de nivel TK de Almacenamiento LIT-0500136
- Harnero de Cal, 500-SC-001
- Válvula de control para la Dilución FV-0500114

El slaker descarga la lechada por rebose a través del harnero de cal, permitiendo que la lechada de cal pase al estanque de traspaso.

El estanque de traspaso cuenta con un agitador de alta eficiencia 500-AG-001 el cual mantiene las partículas en suspensión y listas para ser impulsadas por las bombas 500-PU-003A / 500-PU-003B. Dichas bombas cuentan con un variador de frecuencia lo que permite fijar una altura de operación en el estanque de traspaso.

El agitador no puede operar en vacío, por consiguiente y dado que cuenta con una medición de nivel continuo, se fijarán niveles de parada, partida y de operación de acuerdo al nivel del estanque.

Nivel Bajo-Bajo: 15%. Da orden de parada a las bombas de trasvasije de cal.

Nivel Bajo: 40%. Da orden de partida al agitador y bombas de impulsión de pulpa.

Nivel Alto: 85% Se detiene la alimentación de cal y el sistema cae a lavado y se incorpora la bomba que estaba en Stand By.

Nivel Alto-Alto: 100% Máximo nivel del estanque antes de su rebose.

En este estanque se incorpora el agua necesaria a través de la válvula de dilución FY-0500114 para alcanzar los niveles de densidad requeridos. Este

control es efectuado con la medición que nos entrega el flujómetro de agua de apagado FIT- 0500116 y el agua de dilución FIT-0500114, y de acuerdo al setpoint ingresado en PLC controlaremos la abertura de la válvula de control de adición de agua al estanque de traspaso.

#### *2.2.3.5. Lavador de Gases*

Equipos involucrados:

- Ventilador 500-FA-001
- Válvula HV- 0500119

Estos equipos deben operar cuando el apagador de cal esté funcionando.

## **CAPITULO 3**

### **IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y DETERMINACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO**

#### **3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Considerando el estado situacional encontrado, el estado futuro deseado y las dificultades encontradas en el proceso productivo tal como se indica a continuación:

##### **3.1.1 Estado Situacional encontrado**

Se encontró un sistema donde es necesario el control de PH para procesar el mineral y obtener la pulpa deseada.

##### **3.1.2 Estado Futuro deseado**

Establecer un control automático del PH del sistema en los diferentes procesos de este mediante el diseño de la planta de cal.

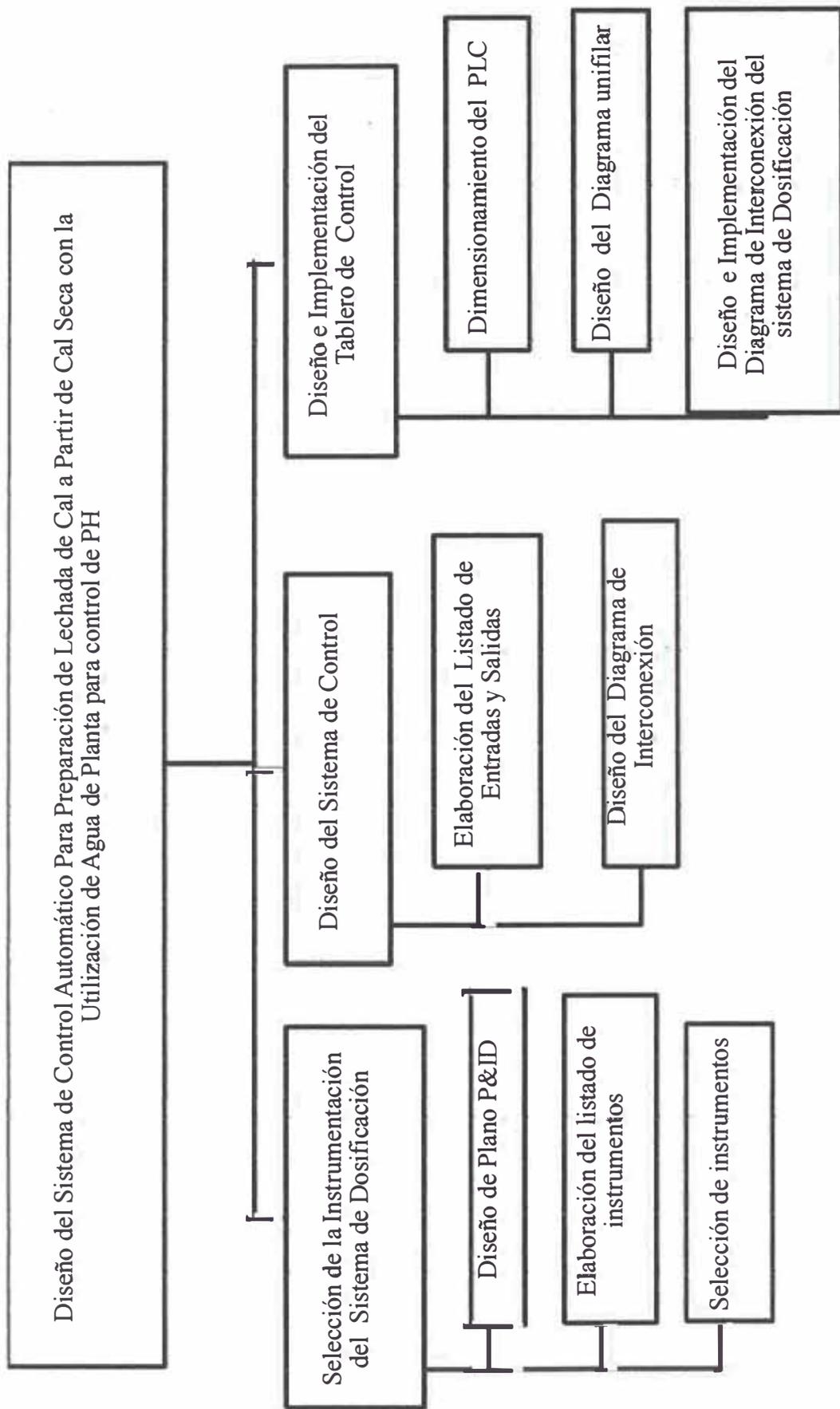
##### **3.1.3 Dificultades encontradas en el proceso**

Se plantea el problema mediante la siguiente interrogante.

¿Implementando un sistema de control automático para preparación de lechada de cal a partir de cal seca se lograra controlar el PH del sistema?

### **3.2 Planteamiento de la Hipótesis de Trabajo.**

#### **3.2.1 Diagrama Medios-Fines.**



### **3.2.2 Planteamiento de la Hipótesis**

En virtud de que se puede validar el logro del componente N°1, componente N° 2, componente N° 3 y siendo posible establecer y completar las consideraciones complementarias necesarias para realizar la prueba final y obtener el resultado correspondiente (o logro final ) se podrá consusitar el logro del propósito y plantear la siguiente hipótesis:

Implementando el Sistema de Control Automático de dosificación de cal se logrará controlar el PH en los diferentes procesos de operación, un proceso de mayor eficiencia con un control de relación cal/agua de proceso más preciso.

## **CAPITULO 4**

### **FUNDAMENTO TEÓRICO**

#### **4.1 CRITERIO DE SELECCIÓN GENERAL DE VÁLVULAS DE CONTROL.**

Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Los valores normales y límites de presión que soporta el cuerpo de la válvula
2. Dimensionamiento y capacidad de flujo
3. Característica de flujo y rangeabilidad
4. Límites de temperatura
5. Caudal de fuga
6. Pérdidas de presiones normales y cuando la válvula está cerrada
7. Requerimientos de las conexiones de la válvula al sistema de cañería
8. Compatibilidad del material con la aplicación y durabilidad
9. Costo y vida útil

Los proveedores de válvulas suministran al usuario tablas de selección en función de la aplicación, comentaremos, en particular, las características de flujo de las válvulas de control.

#### **4.1.1 Característica de flujo**

Un criterio importante en la selección de las válvulas es la característica inherente de flujo que define la relación caudal - apertura del elemento final de control cuando la caída de presión a través de la válvula se mantiene constante. En forma equivalente, la característica de flujo inherente es la relación entre coeficiente de flujo  $C_v$  y la apertura.

Las características inherentes de flujo típicas son: lineal, igual porcentaje, parabólica y apertura rápida.

La elección de la característica de flujo inherente tiene influencia en la estabilidad y controlabilidad debido a la influencia de la ganancia del cuerpo de la válvula en la ganancia global de los elementos del lazo. Ver Figura 2 donde se muestra las distintas características de flujo de las válvulas comerciales.

Para más información (ver tabla 20).

#### **4.1.2 Dimensionamiento de válvulas de control**

Una vez seleccionado el tipo de válvula teniendo en cuenta los aspectos enunciados anteriormente se la debe dimensionar.

La ecuación general de flujo de una válvula de control se obtuvo gracias a los esfuerzos de Daniel Bernoulli y a pruebas experimentales.

$$F = C_v \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\gamma}}$$

F = Caudal [gpm]

Cv = Coeficiente de dimensionamiento de la válvula. Determinado midiendo el caudal de que circula a caída de presión constante a 60 F.

P1 = presión aguas arriba

P2 = presión aguas abajo

$\gamma$  = Densidad relativa

Dimensionar una válvula significa determinar el diámetro del orificio de manera que cuando deba circular el caudal normal mínimo y normal máximo las aperturas se encuentren en el tramo intermedio de su carrera (entre el 30 y el 70 %). La apertura será del 100 % para el caudal máximo. Con estas condiciones de cálculo se aseguran capacidad de regulación y rangeabilidad adecuadas.

### **4.1.3 Procedimiento general para el dimensionamiento**

#### *4.1.3.1 Determinar la caída de presión a través de la válvula $\Delta p_v$ .*

Hay dos situaciones para fijar el salto de presión:

La válvula se instalará en una línea existente. Planteando el balance de presiones (Teorema de Bernoulli) se puede conocer la distribución de presiones en la línea dónde se montará la válvula. Se deben considerar las pérdidas en equipos accesorios y en el caso de órganos de impulsión la energía

de suministro. La diferencia entre la fuerza impulsora y la pérdida de carga de la línea es lo que tiene disponible la válvula

La válvula estará en una línea nueva en la que se deben especificar los sistemas de impulsión inclusive. Un heurístico propone que se establezca en 50% de la caída de presión en la línea sin válvula (33% de la caída de presión total).

#### *4.1.3.2 Determinación de los caudales de operación*

Se deben conocer (información del proceso) los caudales normales de trabajo (máximo y mínimo): FN<sub>mín</sub>, FN<sub>máx</sub>. Al caudal máximo (válvula completamente abierta) se lo puede calcular como el máximo que circularía si válvula estaría completamente abierta. Se puede adoptar como estimación 1.25 veces el caudal normal máximo.

#### *4.1.3.3 Calculo de CV para líquidos*

Si la viscosidad cinemática es  $\geq 20$  cst el régimen es laminar y la ecuación del coeficiente de descarga de la válvula es:

$$C_V = 0.072 \left( \frac{\mu [C_p] F [gpm]}{\Delta P_V [psi]} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Si la viscosidad cinemática es  $\leq 20$  cst el régimen es turbulento y se debe analizar:

Si hay riesgo de cavitación incipiente que se da para las válvulas con alto coeficiente de recuperación de la caída de presión a la salida de la misma respecto a la que se produciría en la vena contracta.

Si el flujo es crítico (flasheo) ó subcrítico.

Estas tres situaciones deben ser identificadas para la caída de presión que debe utilizarse para el cálculo de CV de la válvula

Verificación de cavitación incipiente. La válvula cavitará si:

$$\Delta P_V = K_C(P_1 - P_V)$$

P1 = presión aguas arriba

PV = Presión de vapor del fluido a la temperatura de trabajo

KC= coeficiente de cavitación incipiente, suministrado por el fabricante

Verificación de flujo crítico ó subcrítico

**Flujo Crítico:**

$$\Delta P_V \geq C_f^2 \Delta P_S$$

$$\Delta P_S = P_1 - \left[ 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{P_V}{P_C}} \right] P_V$$

PC: presión crítica

Cf: factor de fluido crítico suministrado por el fabricante Masoneilan (ver Tabla 3)

$$\text{Si: } P_V < 0.5P_1 ; \quad \Delta P_S = P_1 - P_V$$

En este caso se usa la ecuación [1] para el cálculo de  $C_V$  pero la caída máxima de presión admisible será:

$$\Delta P_V = C_f^2 \Delta P_S$$

y este es el valor que se usa.

### Flujo Subcrítico

$$\Delta P_V < C_f^2 \Delta P_S$$

#### 4.1.3.3 Cálculo de $C_V$ para gases o vapor

##### Flujo crítico

$$\Delta P_V \geq 0.5 C_f^2 P_1$$

En este caso se usa la ecuación [1] para el cálculo de  $C_V$  pero la caída máxima de presión admisible será:

$$\Delta P_V = C_f^2 \Delta P_S$$

Y este es el valor que se usa.

##### Flujo subcrítico

$$\Delta P_V < C_f^2 P_1$$

En este caso se usa la ecuación [1] para el cálculo de  $C_V$  se usa el  $\Delta P_V$  calculado.

#### 4.1.3.4. Determinación del Diámetro

Del catálogo se determina el diámetro de la válvula según el Cv requerido en función de la apertura. Si el diámetro de la válvula y cañería son los mismos allí termina el dimensionamiento. Debe tenerse en cuenta que el Cv disponible por el fabricante puede ser mayor que el requerido lo que con lleva al cálculo de los nuevos caudales.

Si el diámetro de la válvula y la cañería son diferentes se debe tener en cuenta la pérdida de carga adicional usando un factor de corrección para recalcular el CV requerido.

El CV corregido se calcula como:

$$C_{V\text{Corregido}} = \frac{C_{V\text{calculado}}}{R}$$

R: Factor de corrección de capacidad por reducción

Este valor aparece en la tabla 2 para  $d/D=1.5$  y 2. Si la relación es otra se usa la ecuación 13.

$$R = \sqrt{1 - 1.5 \left[ \frac{1 - \left[ \frac{d}{D} \right]^2}{R} \right] \left[ \frac{C_V(100\%)}{30d^2} \right]^2}$$

d: diámetro de la válvula

D: diámetro de la cañería

Si el ángulo de reducción es menor de 40 ° se reemplaza el valor 1.5 por 1.

En el caso que haya reducción cañería válvula y el flujo es crítico (para gases y vapores) el factor de verificación de flujo crítico que se utiliza es  $C_{fr}/R$

El flujo es crítico si:

$$\Delta P_V \geq \left( \frac{C_{fr}}{R} \right)^2 P_1$$

Y el  $\Delta P_V$  que se usa en la ecuación es:  $\left( \frac{C_{fr}}{R} \right)^2 P_1$

## 4.2 CRITERIO DE SELECCIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA

Seleccionar un sensor de temperatura puede ser muy sencillo y algunas veces difícil, pero siempre, el objetivo es de hacerlos bien. Esto es porque los sensores, especialmente para uso científico o para la ingeniería, pueden significar la diferencia entre mediciones repetibles o números disparados. El objetivo es medir con exactitud y con incertidumbres aceptables.

Existe una gran variedad de instrumentos para la medición de temperatura, pero ¿Qué características metrológicas se deben considerar para seleccionar el mejor termómetro para su aplicación?

Se muestran los principales requisitos a considerar en la selección de termómetros.

#### **4.2.1. Alcance de medición**

Determine que alcance es crítico para su operación, ¿qué instrumento tiene este alcance? ¿Cubre todo este alcance y es todavía rentable o se requiere de más de un instrumento?

#### **4.2.2. Exactitud**

La segunda más importante decisión. Al establecer los requisitos de exactitud del laboratorio o proceso, la inversión apropiada en el instrumento correcto puede eliminar los errores que se pasan a menudo por alto. La exactitud de un instrumento depende no solo de los resultados de la calibración si no de sus características físicas y metrológicas, por ejemplo se puede tener un sensor termopar industrial que en su informe de calibración mejore su exactitud, pero sus características podría tener una deriva en el tiempo.

##### ***4.2.2.1. Termómetro Patrón de Resistencia de Platino (SPTR)***

Para uso de laboratorio y termómetro de Resistencia (RTD PRT) industriales. Ofrecen grandes beneficios en exactitud y estabilidad. Las tolerancias de temperatura especificadas en la norma IEC-751 para sensores industriales se clasifican en clase A y B y se refieren a la exactitud de las tolerancias. A es más estricta que B, comercializados también en fracciones de la tolerancia, como  $1/3A$

#### **4.2.2.2. Termómetros de Termopar. (TC)**

Tienen un alcance de temperatura muy amplio pero la exactitud es algo limitada. Las tolerancias o errores máximos esperados en los diferentes tipos de termopares se clasifican en normal y especial y aplican a termopares nuevos antes de uso.

#### **4.2.2.3. Termistores**

Ofrecen grandes beneficios cuando se requiere alta resolución sobre su reducido alcance.

#### **4.2.2.4. Termómetros de Líquido en Vidrio (TLV)**

En general una buena guía práctica para el error de escala de un termómetro es su división mínima y tipo de inmersión.

#### **4.2.3. Condiciones bajo la cual la medición debe ser realizada**

El problema fundamental para medir la temperatura de un fluido es el de asegurar el acoplamiento térmico, el sensor debe estar en equilibrio con la temperatura del fluido, por lo cual habrá de determinarse las medidas y formas del sensor, conocer las condiciones de enfriamiento-calentamiento, junto con una estimación de la estimación de los gradientes de temperatura, buscando dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Es posible tocar el objeto a medir? ¿puede ser afectado el sensor o el objeto a medir por el contacto?, si es así, un sensor de temperatura sin contacto es necesario.

#### ***4.2.3.1. Medición en superficie***

##### **Sin contacto:**

Pirómetros infrarrojos

Pirómetros Ópticos

Radiación

##### **Contacto**

Termopares

Termómetros de resistencia

Indicadores de Color y Crayones

#### ***4.2.3.2. Medición en Inmersión***

##### **Gas**

Termómetro de resistencia

Termopares

Bimetálicos

##### **Líquidos**

Termómetro de resistencia

Termopares

Líquido en vidrio

Bimetálicos

Actuados por gas

**Solidos**

Termómetro de Resistencia

Termopares

Bimetálicos

Actuados por gas

Para mayor información (ver tabla 23)

**4.3 CRITERIO DE SELECCIÓN DE FLUJOMETROS**

El caudal es una de las variables de proceso que más frecuentemente se mide. Los caudalímetros acaparan casi el 75% del monto de ventas anuales de transmisores convencionales. La gran demanda ha llevado a la proliferación de caudalímetros de todo tipo y tamaño. Con tanta variedad y cantidad de proveedores, la selección se hace cada vez más difícil. La elección deberá satisfacer los requerimientos de la aplicación, performance y costo. En esta tarea se puede emplear como referencia la información proporcionada en la norma británica BS-7405 que se basa en más de 100 diseños con más de 200 proveedores. La norma BS-7405 empleó el principio de funcionamiento para clasificar los distintos tipos de medidores de flujo y que conformaron la base de la estructura de la norma:

Tipos de flujómetros:

GRUPO	DESCRIPCION
1	Convencionales de Presión diferencial
2	Otros tipos de presión diferencial
3	De desplazamiento Positivo
4	Inferenciales
5	Oscilatorios para fluidos
6	Electromagnéticos
7	Ultrasónicos
8	Másicos directos e indirectos
9	Térmicos
10	Otros para fluidos en ductos cerrados
11	Para sólidos
12	De canal abierto

La norma BS-7405 no considera los dos últimos grupos. Las condiciones a ser analizadas en la selección son entonces:

#### **4.3.1. Requerimientos de aplicación**

Las necesidades de una aplicación específica constituye el primer conjunto de criterios a examinar. El tipo de líquido y la viscosidad son parámetro más que obvios. Para descartar las alternativas que no satisfacen los requerimientos de aplicación se puede emplear la Tabla 24. En la Figura 4 se pueden consultar el rango de diámetros de los dispositivos. Hay condiciones vinculadas a las propiedades del fluido (Ver Tabla 25), restricciones impuestas por la

instalación (Ver Tabla 26) y limitaciones ambientales (Ver Tabla 27) que también deben ser tenidas en cuenta.

#### **4.3.2. Requerimientos de performance.**

Los requerimientos de performance son relativamente sencillos y reflejan la calidad de la medición y las necesidades para el control del sistema. Se puede consultar la (Ver Tabla 28) y la figura 5 y así descartar los elementos primarios que no cumplan las exigencias.

#### **4.3.3. Requerimientos de costo**

Las evaluaciones de costo pueden ser subjetivas y tienden a concentrarse en los costos iniciales de compra, despreciándose los gastos a largo plazo. El costo de compra e instalación son fáciles de examinar (a modo de referencia puede consultarse la Figura 3). Los costos de mantenimiento y operacionales son más difíciles de definir y a veces se los pasa por alto, aunque pueden ser importantes.

Los costos de mantenimiento incluyen costos de recalibración y reparación mientras que los costos operacionales incluyen por ejemplo los de bombeo relacionados con la pérdida permanente de presión del instrumento. Para tener una idea aproximada puede tomarse como referencia las indicaciones de la Tabla 28.

#### 4.4. SELECCIÓN DEL PLC

Los Controladores Programables están disponibles en todas las formas y tamaños cubriendo un amplio espectro de capacidades. En el límite bajo están los controladores “reemplazadores de relés” con mínimas entradas, salidas y capacidades de memoria. En el límite alto están los grandes controladores supervisores que juegan un rol importante en sistemas jerárquicos, llevando a cabo una gran variedad de funciones de control y adquisición de datos. Entre estos dos extremos están controladores multifuncionales con capacidades de comunicación, que les permite la integración con varios periféricos, y capacidades de expansión, para adaptarse a los requerimientos de cambio de la aplicación.

El decidir el Controlador correcto para una aplicación dada, se ha vuelto una tarea cada vez más difícil. La selección de un controlador programable afecta a muchos factores, de tal suerte que el diseñador debe determinar qué características son deseables en el sistema de control y cuál es el mejor controlador que se ajusta a las presentes y futuras necesidades de la aplicación.

##### 4.4.1. Tamaños de PLC's

Previo a la evaluación de los requerimientos del sistema, el diseñador debería entender los diferentes rangos de los PLC y las características típicas encontradas dentro de cada rango. Este entendimiento habilitará al diseñador

para rápidamente identificar el tipo de producto que más se acerca a los requerimientos de la aplicación.

En la figura 1 se ilustra los rangos de productos PLC divididos en cinco mayores áreas. La base para la segmentación de estos productos es el número posible de I/O, la cantidad de memoria disponible para el programa de aplicación y la estructura general de hardware y software del sistema. Tanto como se incrementa el número de I/O la complejidad y costo del sistema también se incrementan. Similarmente, así como la complejidad del sistema se incrementa, la capacidad de memoria, la variedad de módulos de I/O y las capacidades del conjunto de instrucciones, también se aumentan (ver figura 6).

#### **4.4.2. Definición del Sistema de Control**

Seleccionar el correcto PLC para una máquina o proceso involucra evaluar no solamente las necesidades actuales, sino también los requerimientos futuros. Si los objetivos presentes y futuros no son apropiadamente evaluados, el sistema de control podría quedar rápidamente inadecuado y obsoleto.

Teniendo el futuro en mente cuando se escoja un PLC, se minimizarán los costos de cambios y adiciones al sistema. Por ejemplo, con una apropiada planificación, la futura expansión de memoria podría solamente requerir la instalación de un módulo de memoria. Toda vez que la base de control de la

aplicación ha sido definida, el usuario debería continuar la evaluación de los requerimientos del controlador, incluyendo:

- Entradas / Salidas
- Tipo de control
- Memoria
- Software
- Periféricos
- Aspectos físicos y ambientales

#### **4.4.3 Consideraciones para Entradas y Salidas**

La determinación de entradas y salidas requeridas es típicamente el primer paso en la selección de un controlador. Una vez que la decisión para automatizar una máquina o proceso, la determinación de la cantidad de entradas y salidas es simplemente una tarea de contabilizar los dispositivos discretos y analógicos que serán monitoreados o controlados. Esta contabilización ayudará a identificar el tamaño mínimo del PLC. Se debe recordar que el controlador debería permitir futuras expansiones y reposiciones, en el orden del 10% al 20%.

#### **4.4.4 Organización del Sistema de Control**

Con el advenimiento de nuevos y más inteligentes controladores programables, la decisión acerca del tipo de control viene a ser una consideración muy importante. Conociendo el proceso de aplicación y los futuros requerimientos de automatización ayudará al usuario a decidir que tipo

de control, y consecuentemente el PL requerido. Las posibles configuraciones de control incluyen: Control individual, control centralizado y control distribuido, que se ilustran en la figura 7.

#### **4.4.5. Consideraciones de Memoria**

Los dos factores a considerar cuando se escoja la memoria son el tipo y la cantidad. Una aplicación puede requerir dos tipos de memoria: Memoria No volátil y memoria volátil con batería de respaldo. Una memoria No volátil tal como la PROM, puede proveer confiabilidad y un medio de almacenamiento permanente una vez que el programa ha sido creado y depurado.

Los pequeños PLC's normalmente tienen una memoria fija con capacidad de 1/2K a 2K. Entonces, la cantidad de memoria no es de mucha importancia cuando se seleccionan pequeños controladores. En medianos y grandes controladores, sin embargo, la memoria es expandible en unidades de 1K, 2K, 4K, etc. Aunque no hay reglas fijas para determinar la cantidad de memoria requerida, ciertos procedimientos podrían ayudar a estimar tales requerimientos.

La cantidad de memoria requerida para una aplicación dada es una función del número de entradas y salidas a ser controladas y de la complejidad del programa de control. La complejidad se refiere a la cantidad y tipo de funciones aritméticas y de manipulación de datos que el PLC llevará a cabo. Algunos fabricantes tienen ciertas fórmulas que ayudan a determinar

aproximadamente los requerimientos de memoria. Estas fórmulas sugieren multiplicar el número total de I/O por una constante (usualmente de 3 a 8); y si el programa involucra funciones aritméticas y de manipulación de datos, esta aproximación de memoria debería ser incrementada del 25% al 50%.

La mejor manera de determinar el requerimiento de memoria de datos, es crear el programa y contabilizar el número de Words o bytes utilizados. El conocimiento del número de words o bytes requeridos para almacenar cada instrucción, permitirá al usuario determinar los requerimientos exactos de memoria.

#### **4.4.6. Consideraciones de Software**

Durante la implementación del sistema, el usuario debe programar el PLC. Debido a que la programación es importante, el usuario debería examinar cuidadosamente las capacidades del software, que generalmente están a la medida para controlar el hardware disponible en el controlador. Sin embargo, algunas aplicaciones requieren funciones especiales que van más allá del control de los componentes de hardware.

#### **4.4.7. Periférico**

El dispositivo de programación es el periférico clave en un sistema PLC. Este dispositivo es de primordial importancia debido a que debe proveer todas las capacidades para de manera exacta y fácil ingresar el programa de control al

sistema. Los dos más comunes dispositivos de programación son el dispositivo de mano y el computador personal.

En adición al dispositivo de programación, un sistema puede requerir otros tipos de periféricos en ciertas estaciones de control, para proveer una interface entre el controlador y el operador. Entre los periféricos más comunes están, las interfaces de operador, la impresora en línea, los desplegados alfanuméricos para enviar mensajes o alarmas, manejadores de disco, etc.

Los requerimientos de periféricos deberían ser evaluados conjuntamente con la CPU, puesto que la CPU determinará el tipo y número de periféricos que puede ser integrado al sistema. La CPU también tiene influencia en el método de interface, al igual como en la distancia que el periférico puede ser ubicado del PLC.

#### **4.4.8. Condiciones Físicas y Ambientales**

Las condiciones, tales como temperatura, humedad, nivel de polvo y corrosión, pueden afectar la correcta operación del controlador. El usuario debería determinar las condiciones de operación (temperatura, vibración, EMI/RFI, etc.) antes de seleccionar el controlador y el sistema de I/O.

## CAPITULO 5

### SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

#### 5.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

##### 5.1.1 Diseño de Plano P&ID

Ver planos:

1	P01-S011-0500-07-55-2000_1
2	P01-S011-0500-07-55-2000_2
3	P01-S011-0500-07-55-2000_3

##### 5.1.2 Elaboración del Listado de Instrumentos

Ver hoja de cálculo:

1	P01-S011-0500-07-45-2001
---	--------------------------

#### 5.2 Diseño del Sistema de Control

##### 5.2.1 Elaboración del Listado de Entradas y Salidas

Ver hoja de cálculo:

1	P01-S011-0500-07-45-2000
---	--------------------------

### 5.2.2 Diseño del Diagrama de Interconexión

Ver plano

1	P01-S011-0500-07-55-2027-1
2	P01-S011-0500-07-55-2027-2
3	P01-S011-0500-07-55-2027-3
4	P01-S011-0500-06-55-2001-1
5	P01-S011-0500-06-55-2001-2
6	P01-S011-0500-06-55-2001-3
7	P01-S011-0500-06-55-2001-4
8	P01-S011-0500-06-55-2001-5
9	P01-S011-0500-06-55-2001-6
10	P01-S011-0500-06-55-2001-7
11	P01-S011-0500-06-55-2001-8
12	P01-S011-0500-06-55-2001-9
13	P01-S011-0500-06-55-2001-10
14	P01-S011-0500-06-55-2001-11
15	P01-S011-0500-06-55-2001-12
16	P01-S011-0500-06-55-2001-13

## 5.3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL TABLERO DE CONTROL

### 5.4.1 Dimensionamiento del PLC

Ver Plano:

1	P01-S011-0500-07-55-2025-1
2	P01-S011-0500-07-55-2025-2

### 5.4.2 Diseño del Diagrama Unifilar

Ver plano:

1	P01-S011-0500-06-54-2000
---	--------------------------

## CAPITULO 6

### ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 6.1 INVERSIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

La empresa Planta de Óxidos Cerro SAC realizó la instalación de la Planta de Lechada de Cal con una inversión de 3 000 000 \$, teniendo en cuenta que la parte de la instrumentación y control representa el 8% del costo total el cual equivale a 200 000 \$.

#### 6.2 ESTIMADO DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN

Los valores de diseño para esta planta son los siguientes:

**Producción de Mineral:** 2500 ton/día.

**Producción Concentrado de Plata:** 380 kg/día.

**Utilidad:** 22 \$/onza.

**Utilidad Anual:**  $\frac{380\text{Kg}}{\text{día}} \times \frac{22\$}{\text{onza}} \times \frac{35.24\text{onza}}{\text{Kg}} \times \frac{360\text{días}}{1\text{año}} \approx 106\ 000\ 000\ \$/\text{Año}$

**Utilidad Mensual:** 8.8 000 000 \$/mensual.

Se considera una amortización del 70% de la utilidad: 6.16 000 000 \$/mensual

Por lo tanto de acuerdo al análisis el tiempo de recuperación sólo de la Planta de Lechada de cal sería al primer mes de funcionamiento de la Planta.

## CONCLUSIONES

1. Se valida en base al logro final de la obtención del propósito de la investigación.
2. La temperatura es la variable más importante a controlar en proceso de reacción de la cal viva, la ingeniería se contempló el control de esta variable.
3. Con la implementación de la planta de lechada de cal se logrará el control eficiente del PH en todos los procesos que requiere la planta.
4. El tiempo de recuperación de la implementación del sistema de control automático es muy corto por lo tanto es rentable la implementación de la planta de lechada de cal

## **RECOMENDACIONES**

1. Considerar utilizar equipos que transmiten su señal mediante buses de campo para hacer el cableado más sencillo y eficiente.
2. Se debe verificar que todos los equipos cumplan con estos parámetros de diseño a fin de garantizar el funcionamiento acorde con la ingeniería desarrollada.
3. Poner énfasis en los enclavamientos y considerar cada uno de estos como importante ya que dichos enclavamientos permitirán el trabajo continuo y seguro de la planta.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Instrumentación Industrial**, Antonio Creus Sole 8va. Edición. Editorial Alfa-Omega
2. **Instrumentación Industrial**, Soisson Harol E, 1ra Edición. 2012 Editorial; Limusa Wiley.
3. **Manual de Operación y Mantenimiento Planta de Cal** Bisa Ingenieros- Revisión 1 – 2014.
4. **Manual de control de Procesos – Facet UNT- Tema 3 Criterio de Selección de Flujometros**, [www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/tema\\_3/Tp3a.pdf](http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/tema_3/Tp3a.pdf)
5. **Guía de Selección del sistema de controladores programables**. RockwellAutomation-2014,[literature.rockwellautomation.com/idc/groups/.../1785-sg001\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/.../1785-sg001_-es-p.pdf)
6. **Manual de selección de Sensores de Nivel-Vega** [www.vega.ch/downloads/PI/ES/29023-ES.PDF](http://www.vega.ch/downloads/PI/ES/29023-ES.PDF)
7. **Manual y catálogo del electricista – Schneider Electric-MYCE 2012**, 8va. Edición.
8. Ediciones Díaz de Santos, **Instrumentación y Control Avanzado de Proceso**-José Acedo Sánchez, 1ra Edición 2003.