



REACTIVOS EN MINERÍA

Antecedentes Generales de Reactivos en Procesos Mineros



15 DE DICIEMBRE DE 2025

ALFONSO VIDEGAIN
avidegain9@gmail.com

Contenido

1. Letras Preliminares	4
2. Forma de Suministro de Reactivos	6
3. Concentradoras de Cobre	7
4. Colectores de Cobre	7
5. Colectores Tipo Xantatos	7
6. Colectores de Suministro Líquido	9
7. Estanques Atmosféricos de Almacenamiento	10
8. Algunos Reactivos en Cerro Verde	14
9. Colectores en Flotación Colectiva	14
10. Sodium Hydrosulfide en Flotación Selectiva	19
11. Algunos Reactivos en Laguna Seca	22
12. Espumantes en Flotación Colectiva Laguna Seca	23
13. Colectores en Flotación Colectiva Laguna Seca	27
14. Acidificación en Planta AVR Cerro Vanguardia	33
15. NH₃ Buffer Tank Proyecto PACMAN	39
16. Algunos Reactivos en Esperanza	42
17. Colector Primario Flotación Colectiva	42
18. Algunos Reactivos en Antamina	46
19. Fuel Oil Flotación Selectiva	51
20. Estanques de Dosificación de Reactivos	51
21. Cianuro en Flotación de Cobre-Zinc en Antamina	53
22. Control de pH con Dosificación de MOL en Antamina	56
23. Consideraciones Finales	60
 Figura 1: Esquemas de Succión y Descarga Bomba PULSA GLM de Pulsafeeder	5
Figura 2: Esquema preparación de xantato	8
Figura 3: Descomposición del Xantato SIPX en Solución	9
Figura 4: Niveles Crítico, Alto Alto y Normal de Operación Estanque Almacenamiento..	11
Figura 5: Esquema de Estanque Atmosférico Vertical de Fondo Plano.....	12
Figura 6: Estanque de Almacenamiento Colector Primario Cerro Verde	15
Figura 7: <i> inyector “Enraf” para Dosificación de Reactivo</i>	16

Figura 8: Esquema simplificado de Planta de Estanques de Reactivos Cerro Verde	16
Figura 9: Estanques de Disolución y de Almacenamiento Colector Secundario Cerro Verde	18
Figura 10: Planta de Molibdeno Almacenamiento y Distribución de NaHS Cerro Verde..	20
Figura 11: Estanque de Almacenamiento Sulfhidrato de Sodio (Plano PSP108-C-3500-55N-401 Rev. 0).....	21
Figura 12: Esquema Simplificado Disposición General Estanques de Reactivos Laguna Seca.....	24
Figura 13: Esquema Simplificado P&ID Espumantes Laguna Seca	25
Figura 14: Estanque de Almacenamiento Espumante y Estanque Diario Espumante.....	26
Figura 15: Cuadro de Boquillas del plano que muestra el estanque (0360-TK-122)	26
Figura 16: Esquema de Control de Dosificación de Espumantes a Flotación	27
Figura 17: Esquema Simplificado P&ID Colector Primario Laguna Seca	28
Figura 18: Esquema Simplificado P&ID Colector Secundario Laguna Seca	30
Figura 19: Estanque 0360-TK-063 Mezcla Colector Secundario.....	31
Figura 20: Esquema Simplificado Proceso AVR Cerro Vanguardia	35
Figura 21: Esquema Layout Planta AVR Cerro Vanguardia	36
Figura 22: Esquema Estanque Almacenamiento Ácido Sulfúrico	37
Figura 23: Esquema P&ID desarrollado por UNIFIELD	38
Figura 24: Esquema Circuito Preparación Soluciones antes de Torres de Stripping	40
Figura 25: Esquema Simplificado P&ID Estanque AR1-701-TK01	41
Figura 26: Esquema del Estanque 332-TK-001 en Memoria de Cálculo Estructural.....	42
Figura 27: Esquema Estanques de Reactivos de Flotación Minera Esperanza	43
Figura 28: Esquema Disposición General Estanques de Colectores Esperanza.....	44
Figura 29: Esquema Circuito ampliado de Molienda Antamina	47
Figura 30: Esquema Circuito Estanques Presurizados.....	48
Figura 31: Esquema Estanques de Reactivos Antamina	49
Figura 32: Fotografía Estanques de Reactivos Antamina	50
Figura 33: Esquema Estanque Almacenamiento de Fuel Oil.....	51
Figura 34: Esquema Estanque de Fondo Cónico Dosificación de Reactivos.....	52
Figura 35: Diagrama P&ID Preparación de Cianuro Antamina	54
Figura 36: Diagrama P&ID Distribución de Cianuro Antamina	55

Figura 37: Silo, Molino de Torre y Estanques de Almacenamiento de MOL Antamina	57
Figura 38: Esquemas de Instrumentación y Control Circuito de MOL	58
Figura 39: Esquema Arranque de MOL en un Punto de Dosificación	59
Figura 40: Estanque de Almacenamiento de Lechada de Cal de una Minera en Chile	60

Letras Preliminares

Hace varios años, posiblemente en los tiempos antes de Worley Ingeniería y Construcción, antes de Jacobs, antes de SKM, en los tiempos de Aker Solutions, me pasó una anécdota que paso a relatar.

En ese tiempo, en especial cuando había poco trabajo en ingeniería de diseño de plantas mineras, la especialidad de procesos, en Chile, estaba tratando de seguir los pasos del rol que oficinas internacionales le asignaban al ingeniero de procesos. En esa época, algunos, entre los que me contaba, estábamos convencidos de que el ingeniero de procesos debía ser algo más que un metalurgista. No se trata de disminuir la labor indiscutible de los metalurgistas extractivos¹ que tienen un rol fundamental en entender los procesos de tratamiento de rocas para obtener productos con valor comercial. Para esto, los metalurgistas deben manejar áreas de especialidades complejas tales como: muestreo de minerales, geometalurgia, análisis químico y análisis instrumental, equipos de procesamiento de minerales, y otras yerbas.

En Chile, en varias de las empresas en que trabajé, se daba la cultura corporativa, más bien arraigada en los ingenieros mecánicos y de instrumentación, de que la labor del ingeniero de procesos era realizar los balances de masa y desarrollar los diagramas de flujo. Poco más que eso existía, pero las horas asignadas a la especialidad en cada proyecto no estaba contemplado en el presupuesto del proyecto.

Para dar más relevancia a la especialidad, y mejor aún, para seguir los pasos de empresas internacionales de ingeniería, algunos gerentes funcionales empezaron a exigir que procesos se involucrara en temas de control automático, de piping y en definitiva que tuvieran un rol más importante en el desarrollo de los P&ID: Diagramas de Piping e instrumentación. En una empresa Finlandesa que trabajé (Jaakko Poyry), incluso denominaban a estos planos PP&ID, es decir “Process Piping & Instrument Diagrams”.

La verdad “existencial” del dominio y administración de los planos P&ID´s es que dichos planos son tan fundamentales, complejos e importantes en el desarrollo de un proyecto de una planta industrial, en particular una planta de procesamiento de minerales es que el tiempo, es decir las horas (HH) asignadas a dichos planos son muy superiores a las horas asignadas a otros planos, en particular los diagramas de flujo. Entonces, tener participación en el desarrollo de los P&ID´s significa más horas dentro de un proyecto.

Sucede que el que escribe había dedicado tanto tiempo al estudio de planos P&ID´s, que incluso un ingeniero senior de instrumentación y control automático, durante la puesta en marcha de la Fase 1 de la concentradora Los Colorados, un poco cansado de mis eternas preguntas, me dio el mote de “mozandilla”, que según el significaba una mezcla de mosquito, zancudo y ladilla. El hecho es que yo estaba decidido a aprender no solamente a leer y comprender los planos P&ID´s, sino que a ser capaz de desarrollarlos. Estos planos, como se sabe, incluyen información y nomenclatura de cañerías, procesos, instrumentación y control automático. Se requieren conocimientos de todas esas especialidades para dominar estos

¹ Existe la especialidad de los ingenieros que se dedican a la metalurgia física, entre otras cosas, las propiedades de los metales en función de su estructura de grano, morfología y características de resistencia de dichos metales. Los metalurgistas extractivos se dedican a lo que su nombre indica: las técnicas de extracción de metales desde las rocas o de otras fuentes.

planos. Ya la especialidad de piping es un tema que incluye no solamente un cierto conocimiento de cañerías, válvulas, bombas de todo tipo, hidráulica, y toda la parafernalia de fittings. Como se sabe, normalmente los ingenieros de piping provienen fundamentalmente de la especialidad de ingeniería mecánica.

Los ingenieros de instrumentación, como se les llamaba antes de que Codelco pusiera de moda la expresión ingenieros TICA (Telecomunicaciones, Instrumentación y Control Automático), deben ser verdaderos magos en su especialidad. Plasmar toda la instrumentación, enclavamientos, lazos de control y alarmas en un plano P&ID es un desafío no menor. Incluso muchas empresas de ingeniería no siguen la norma ANSI/ISA 5.1 que se supone fija las pautas para este trabajo.

En un proyecto para mejorar la calidad del agua ácida que Collahuasi estaba empleando, después de reemplazar el uso de agua de buena calidad por normativas ambientales que restringían el uso de agua fresca de pozos, yo destinado como ingeniero de procesos a desarrollar el sistema de tratamiento de dichas aguas ácidas, tenía el mandato de mi gerente funcional para desarrollar no solamente los diagramas de flujo, sino que también los P&ID's.

En eso estaba, cuando el líder de la especialidad de instrumentación (recordar que en ese tiempo ese era el nombre de esa especialidad), me llama a una reunión en una sala pequeña de reuniones, y cuando me presento observo que no solamente estaba dicho líder funcional, sino que, además buena parte de los demás ingenieros de instrumentación de Aker Solutions.

Este señor que me interpelaba se para frente a un pizarrón y dibuja una válvula "Pressure Control Valve" (PCV), pero con el piloto dirigido agua arriba, es decir una válvula "backpressure". Me mira muy enojado y me dice que yo había puesto, en un plano del proyecto, una tal válvula en la descarga de una bomba dosificadora de diafragma (obviamente de desplazamiento positivo). Mira a los demás y recordando que él había sido profesor de física, me advierte que eso es un error de concepto fundamental. Agrega que eso no podría trabajar como yo pretendía en mi plano. Que el flujo nunca se establecería. Yo confundido y atemorizado por el desarrollo de la reunión, le contesto: No entiendo bien tus argumentos, pero yo lo que hice fue seguir las indicaciones del manual de operaciones de la bomba positiva dosificadora, y en dicho manual aparece como aconsejable el uso de dicha válvula en caso de que exista una diferencia de nivel entre la bomba y el punto de llegada del flujo que, si está en un nivel inferior, por efecto sifón, las válvulas de bola tipo check de la bomba impedirán que la bomba mantenga su precisión de dosificación.

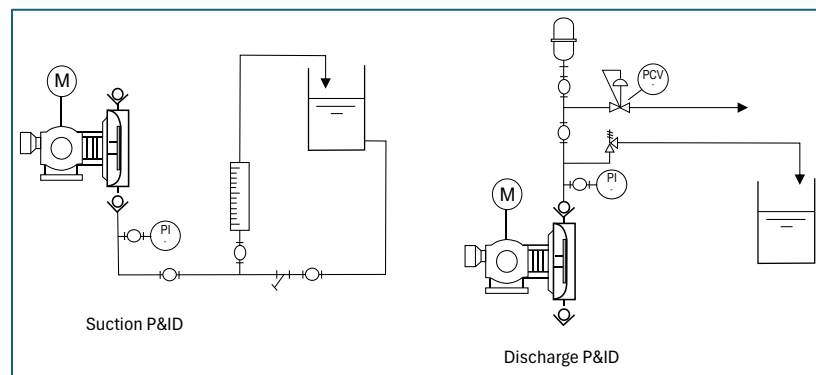


Figura 1: Esquemas de Succión y Descarga Bomba PULSA GLM de Pulsafeeder

Forma de Suministro de Reactivos

En general, las formas más comunes de suministro de reactivos utilizados en plantas de proceso en mineras se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Reactivos suministrados en forma líquida, ya sea en semirremolques cisterna de alrededor de 24 m³ de capacidad, o en contenedores de plástico generalmente de 1 m³ de capacidad. También se distribuyen reactivos líquidos en ISOTANQUES de distintas capacidades, las más comunes de 15 m³ y de 26 m³.
- Reactivos suministrados en forma sólida, ya sea a granel o en maxisacos. A granel es típico el suministro de cal sólida en camiones. Otros reactivos sólidos son suministrados en maxi sacos de 750 kg, o de 1.000 kg.

El tema de los reactivos utilizados en minería es bastante amplio, de manera que, en este documento solamente se abordarán los más comunes en plantas concentradoras o en plantas de hidrometalurgia ya sea de cobre o de oro.

Como se sabe, dependiendo del tipo de mineral, el proceso y, por lo tanto, los reactivos utilizados son diferentes. La clasificación más general de minerales tipo menas, se clasifican en minerales tipo óxidos y minerales tipo sulfuros. Hasta hace muy poco tiempo, los sulfuros se trataban, sin distinción, mediante procesos de concentración, comúnmente por flotación para obtener un concentrado del metal a concentrar. En cambio, los minerales tipo óxidos se trataban mediante procesos hidrometalúrgicos para obtener soluciones concentradas que eran sometidas a procesos de purificación y precipitación. Desde hace varios años, los denominados sulfuros secundarios (por ejemplo: calcosina Cu₂S, covelina CuS, etc.) han sido tratados mediante procesos hidrometalúrgicos, con uso de bacterias, para obtener soluciones cargadas con sulfato de cobre (en realidad iones cúpricos, Cu⁺²), y continuando con los procesos típicos para óxidos, es decir extracción por solventes (SX) y electro obtención (EW). Entre los minerales de cobre tipo sulfuros existen los denominados sulfuros primarios, por ejemplo, la calcopirita, CuFeS₂, la cual es bastante refractaria a procesos de disolución con ácido sulfúrico, H₂SO₄. Actualmente se realizan estudios para incrementar la cinética de disolución de sulfuros secundarios mediante la adición de ácido sulfúrico y de cloruro de sodio, NaCl, sal común, con resultados positivos a nivel industrial.

Como el lector se habrá dado cuenta, el párrafo anterior está dedicado exclusivamente a la metalurgia extractiva de minerales de cobre. En la metalurgia del oro los procesos se dividen en dos ramas. La rama más utilizada aplica a minerales de oro denominados “Free Milling”, refiriéndose a minerales de oro que pueden ser recuperados por procesos hidrometalúrgicos con altas recuperaciones al ser sometidos a una molienda con un P₈₀ de 75 micrones. Para que un mineral de oro amerite ser tratado con etapas de chancado y molienda hasta tamaños como el señalado, las leyes de oro deben justificar el mayor costo que significa esa reducción de tamaño. Minerales de baja ley, digamos alrededor de 1 g/t, para indicar una cifra arbitraria (la cifra correcta depende de la naturaleza del mineral), normalmente no pagan el costo de molienda y pueden ser tratados mediante lixiviación en pilas con procesos de reducción de tamaño que llegan hasta chancado secundario. El caso de minerales porosos, como los que trató por varios años la mina Yanacocha en Perú, es extraordinario en el sentido que la lixiviación en pilas se realizaba con mineral “Run Off Mine” (tamaño entregado por la mina sin chancado).

Este trabajo iniciará con descripciones generales de reactivos usados en la metalurgia extractiva de minerales de cobre, para posteriormente visitar minerales de oro.

A su vez, en el caso de minerales de cobre se iniciará con los reactivos usados en concentradoras.

Concentradoras de Cobre

El proceso estándar para concentrar minerales tipo sulfuros de cobre es la flotación espumante. Existen concentradoras que tratan minerales polimetálicos como, por ejemplo, Antamina en Perú, donde se usan circuitos para flotar cobre, otros para flotar zinc, y otros para flotar molibdenita, o bismuto, en cuyo caso la cantidad de reactivos crece.

Como el tema de los procesos específicos para cada tipo de mineral, excede el alcance de este documento, se advierte que el hilo conductor será la descripción del suministro, almacenamiento y distribución de reactivos más bien que su uso en cada caso específico.

Colectores de Cobre

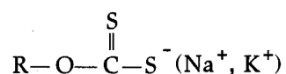
Los colectores de cobre son reactivos formados por una cadena de átomos que le confieren a dicha cadena características hidrofóbicas, y estos reactivos tienen, además, un grupo polar, es decir con carga eléctrica que interactúa con la superficie de ciertos minerales y se adhieren mediante mecanismos cuya definición queda fuera del alcance de este escrito.

En la industria existen familias de reactivos tipo colectores, y al no poder abarcarlos a todos, este documento se centrará en los más comunes, a juicio del autor. Se deja constancia que ya han pasado más de cien años de la aplicación de la flotación espumante, de manera que la cantidad de literatura es prácticamente inabarcable en un resumen como éste.

El reactivo más utilizado como colector, parecen ser la familia de los xantatos, que, aunque poco selectivos siguen siendo muy utilizados por su precio inferior a otros colectores más selectivos.

Colectores Tipo Xantatos

Los xantatos fueron introducidos como colectores en 1925 y en la actualidad todavía se usan para minerales fáciles de flotar, donde la selectividad no es un problema. Su estructura química se representa de la siguiente manera:



Solamente agregaremos que esta familia presenta cadenas de átomos de carbono de distinta longitud, los de menor longitud son los más selectivos. En cambio, aquellos con cadenas más largas son más potentes como colectores, pero presentan menor selectividad. Se recuerda que la pirita FeS_2 es un sulfuro de hierro generalmente asociado a los pórfidos cupríferos y no es deseable flotar pirita, ya que disminuyen la ley del concentrado de cobre final.

Desde el punto de vista del manejo de este reactivo denominado genéricamente como un xantato, agregaremos que su forma de suministro usual es en forma de sólidos que deben ser disueltos en agua para su uso en flotación.

La Figura 2 presenta un esquema simplificado de la preparación de xantato. El xantato es recibido en forma de pellets en sacos de 1 tonelada que deben ser almacenados en una bodega aislada.

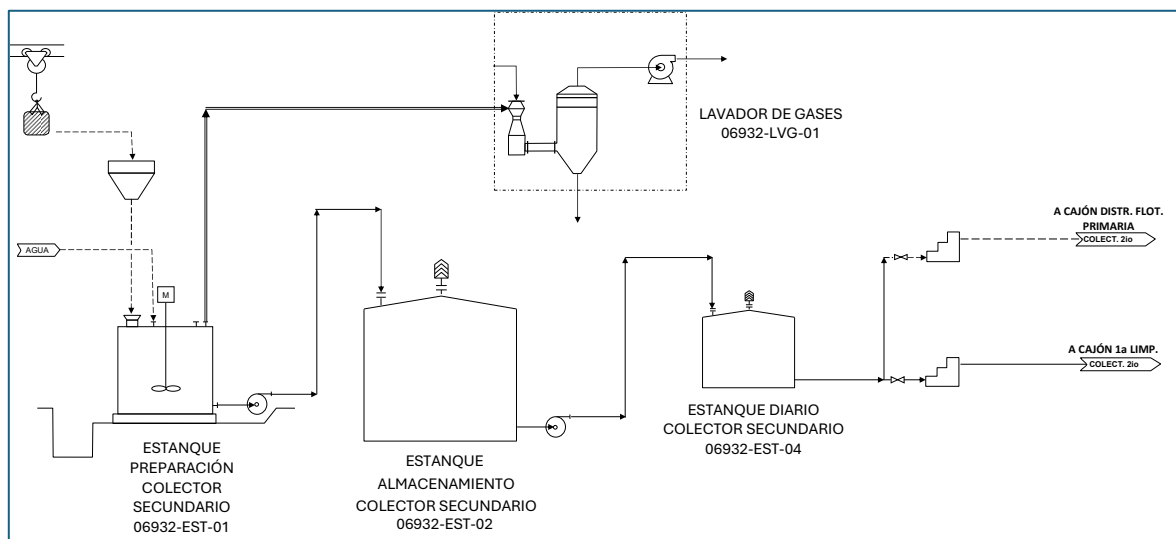


Figura 2: Esquema preparación de xantato

Los pellets de xantato se mezclan con agua fresca para producir una solución al 10% de concentración en peso. El estanque de preparación está equipado con un venteo que está conectado a un lavador de gases. La concentración en peso puede ser superior a 10%, pero a medida que dicha concentración sube, se manifiesta un fenómeno de descomposición que aumenta con más alta concentración y mayor temperatura. Ver **Figura 3**.

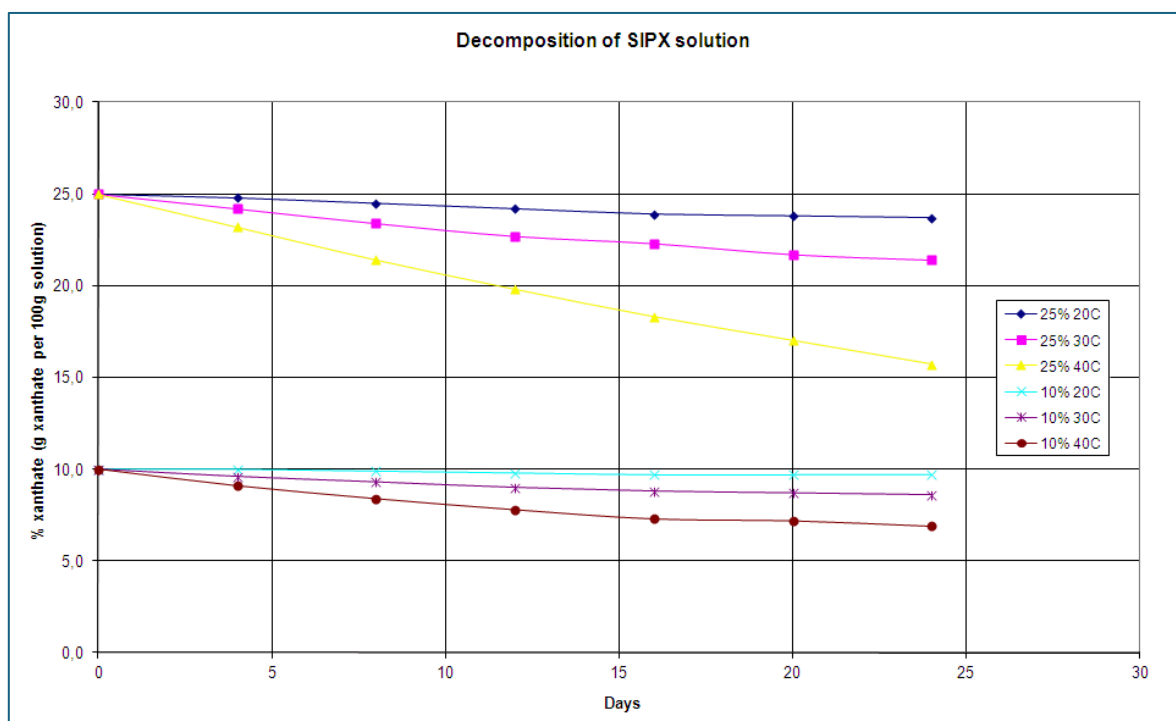


Figura 3: Descomposición del Xantato SIPX en Solución

Después de la preparación de un batch² de solución de xantato, debe utilizarse un hidrómetro para medir la densidad y estimar la concentración de la solución.

Siempre debe haber una ducha de emergencia en la vecindad de cualquier área donde se prepare o almacene reactivos. En el caso, por ejemplo, de SIPX (Isopropil xantato de sodio) utilizado en la flotación de sulfuros de cobre, este reactivo, al igual que todos los xantatos es un sólido de combustión espontánea, y debe almacenarse seco en una bodega aislada y no debe permanecer guardado por más de un año (máximo).

Debe evitarse el uso de cañerías y válvulas de cobre, latón y zinc. No se recomienda el uso de agitadores de aire para disolver el producto debido a la oxidación y al olor excesivo.

Colectores de Suministro Líquido

Muchos colectores como, por ejemplo, tionocarbamatos, son suministrados en forma líquida y su transporte se realiza en camiones cisterna tipo semirremolque de diferentes capacidades. El tema del peso máximo para el transporte de reactivos líquidos por vía terrestre en Chile es un tema complejo, ya que el límite de peso bruto total puede ser de hasta 45 toneladas. El peso neto es el peso real de la carga transportada. Normalmente, en la garita de recepción de camiones en cada minera se encuentra una balanza de camiones donde es posible determinar el peso del camión a la entrada y posteriormente el peso a la salida, obteniendo el diferencial

² Se suele traducir la palabra “batch” como “lote”. Pero en el ambiente de la minería se emplea la expresión batch muy frecuentemente. Se refiere a una cantidad dada (un lote) de reactivos a mezclar con agua.

neto. Algunas mineras, con problemas de control instrumental en la dosificación de reactivos, utilizan estas mediciones de peso para tener un registro de consumo de reactivo.

En un proyecto se realizó una consulta a Cytec acerca de la capacidad de los camiones que transportaban reactivo líquido para flotación a Collahuasi. La respuesta fue que el camión tiene una capacidad neta de 26.500 kg y que normalmente suben llenos, ya que a pesar de que dichos camiones tienen baffles interiores “rompeolas”, no se recomienda que suban con menos del 70% de la capacidad del camión. Los baffles rompeolas permite minimizar el efecto de movimiento brusco del centro de gravedad de la carga durante aceleraciones, frenadas y durante los virajes en curvas.

Entonces, se observa la importancia de obtener la densidad del reactivo líquido para convertir el peso en volumen y de esta forma tener un criterio, entre otros, para dimensionar el estanque de recepción y almacenamiento del reactivo líquido.

En general, la densidad del tionocarbamato líquido suministrado es muy cercana a $1,0 \text{ t/m}^3$, de manera que, para efectos de la “química de balde” utilizada en minería, es un dato aproximado suficiente. El que escribe este documento aconseja que como mínimo, el estanque de almacenamiento de colector líquido tenga una capacidad de 1,5 a 2,0 camiones de suministro. Esto porque se hace difícil pensar una situación en que por alguna razón el camión llegue y no tenga espacio en dicho estanque para vaciar su carga. He observado proyectos en que la capacidad del estanque de almacenamiento de colector líquido es solamente un poco superior a la capacidad de carga neta del camión de transporte. Por ejemplo, el proyecto Cerro verde en Perú, tiene un estanque de almacenamiento de colector líquido de 3,8 m de diámetro por 4,4 m de altura total. Esto representa un volumen total de casi 50 m^3 . Sin embargo, dependiendo de la geometría del estanque, de la sumergencia para evitar que la bomba de descarga cavite, y otras consideraciones, se estima que el volumen neto es de alrededor de $38,6 \text{ m}^3$, es decir, casi 1,5 veces la capacidad neta del camión de suministro.

Por otra parte, el proyecto Escondida concentradora Laguna Seca, contempló dos estanques de almacenamiento de colector líquido de 150 m^3 de capacidad total, cada uno. Se observa un criterio completamente diferente en esta última concentradora.

Estanques Atmosféricos de Almacenamiento

Al desarrollar benchmarking entre diferentes proyectos se puede observar que, al parecer, no existe un procedimiento estándar para definir la relación entre volumen total y volumen vivo de un estanque de almacenamiento de líquido. Por esta razón se asumirá el riesgo de proponer una guía general que aborde este tema. Para comenzar, se usa una nomenclatura que posiblemente exista formalmente. El volumen útil que corresponde a aquel volumen que puede ser utilizado dentro de los rangos de nivel bajo y nivel alto, se denominará volumen neto. Esto significa que no se considera volumen útil aquellos niveles alto- alto ni bajo-bajo; tampoco la revancha, ni el nivel de altura mínima para evitar la cavitación (nivel de sumergencia).

Durante una ingeniería conceptual no se dispone de planos detallados de los estanques, de manera que el ingeniero de procesos deberá proponer a la disciplina mecánica el volumen neto requerido según el criterio de diseño. Pero este ingeniero de procesos debería verificar que el ingeniero mecánico defina en su hoja de datos una geometría que asegure dicho volumen neto.

La **Figura 4** permite definir el nivel crítico, como aquel justo antes del rebose, el nivel Alto Alto, como el máximo (High High Liquid Level), que indica no solamente una alarma sino el disparo de un enclavamiento que impida que continúe ingresando líquido al estanque, y el nivel de operación normal, el cual se sitúa bajo el nivel Alto Alto.

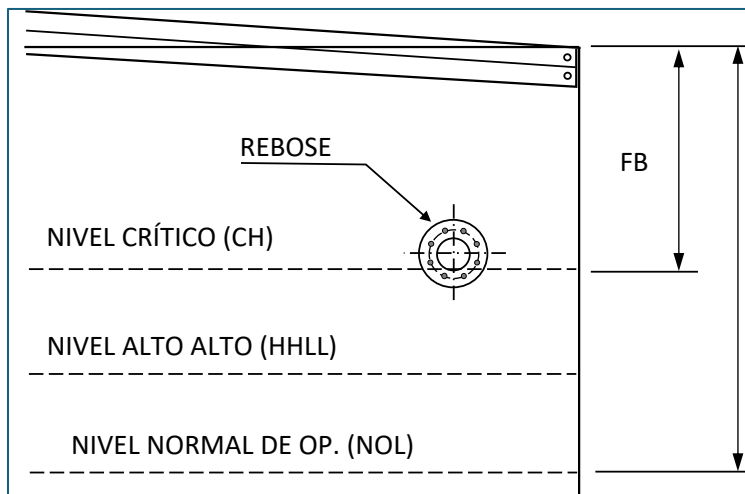


Figura 4: Niveles Crítico, Alto Alto y Normal de Operación Estanque Almacenamiento

Las capacidades se calculan utilizando el área o sección transversal (A), del estanque, multiplicada por una altura. Por ejemplo, la capacidad nominal (NC), será el área multiplicada por la altura total (H) de pared del estanque:

$$NC = ((\pi \times D^2) / 4) \times H$$

La capacidad neta de trabajo (NWC) será:

$$NWC = A \times (NOL - LLL)$$

Donde LLL es el nivel “Low Liquid Level” o (distancia) mínima que el líquido debe alcanzar durante el vaciado del estanque. Bajo dicho nivel puede ocurrir daño a la bomba instalada en la boquilla de succión del estanque.

Factores externos al diseño del estanque, tales como la altura de ola sísmica, el NPSH de las bombas y la ubicación de las boquillas de salida y de rebose pueden modificar los niveles de operación y deben ser considerados en el diseño.

La **Figura 5** muestra un esquema basado en la norma API 650, “Welded Steel Tanks for Oil Storage”, 11th Edition Addendum 3.

En la **Figura 5** se observan cuatro niveles relacionados con la nomenclatura de control automático: “Level Alarm Low-Low” (LALL), “Level Alarm Low” (LAL), “Level Alarm High” (LAH) y “Level Alarm High-High” (LAHH). Se define el volumen neto como la capacidad del estanque entre los niveles LAL y LAH. Fuera de ese rango, todavía se puede utilizar el líquido del estanque, pero el operador debería haber tomado una acción cuando el nivel actual del estanque se acerca a dichos niveles de alarma.

Por otra parte, este esquema que deja un volumen entre los niveles de alarma Bajo-Bajo y Alto-Alto, respectivamente, indica un tiempo de reacción del operador, lo cual no debe ocurrir en

condiciones normales de operación ya que el operador debe estar en comunicación con el área de logística. La llegada de un camión con suministro debe ser coordinada tanto para poder descargar la totalidad del camión, como para que exista un volumen que cubra el tiempo de respuesta de la empresa de suministro.

Una distancia excesiva de nivel entre aquellos valores definidos para las alarmas LAL y LALL, y LAH y LAHH aumentan el volumen total y, por lo tanto, el costo del estanque de almacenamiento. Dependiendo del riesgo de interrupciones en el transporte de reactivo hacia la planta, debe establecerse un criterio de volumen neto o tiempo de residencia para asegurar el suministro al proceso.

Muchos proyectos muestran valores de volúmenes totales y volúmenes netos en documentos tales como Diagramas de Flujo, o P&ID's, pero no siempre dichos valores son consistentes con el criterio de diseño de procesos, el listado de equipos, o con los volúmenes mostrados en planos o en la maqueta del proyecto.

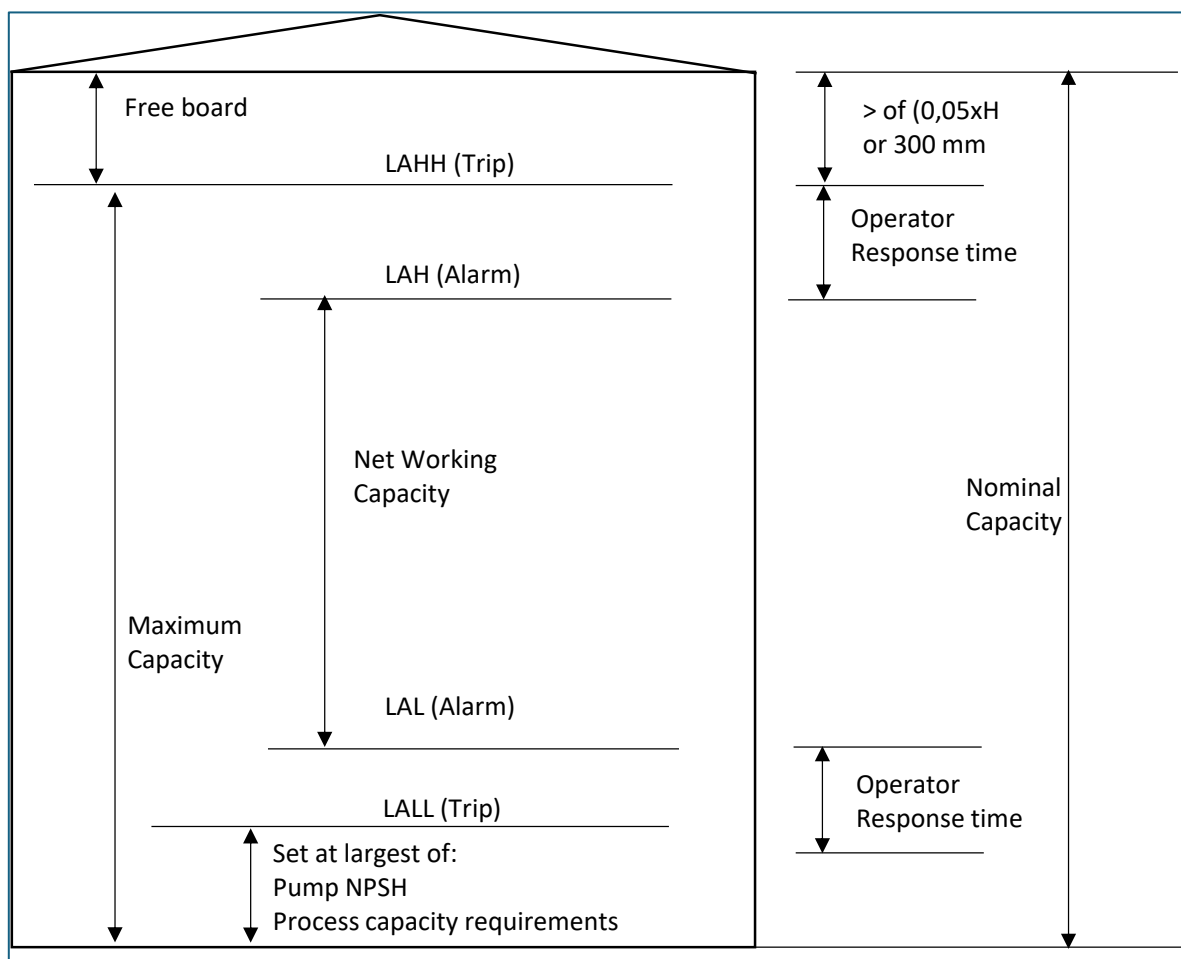


Figura 5: Esquema de Estanque Atmosférico Vertical de Fondo Plano

Normalmente se emplean estanques atmosféricos, de fondo plano, con techo metálico equipado con boquillas para entrada de producto, entrada de instrumentos de nivel, y algunas veces con sistemas apagallamas.

La definición de la NFPA para “Estanques de almacenamiento atmosféricos” es que estos son diseñados para operar a presiones entre atmosférica y 6,9 kPa medida en la parte superior del estanque. Los estanques diseñados para presiones entre 3,5 kPa y 103 kPa en la parte superior se denominan “Estanques de Almacenamiento de Baja Presión”.

Todos los estanques de almacenamiento de reactivos deben estar equipados con boquilla de rebose de tamaño adecuado para esta función. Debe haber un espacio sobre la boquilla de rebose. El diseño debe considerar la capacidad neta de trabajo. El nivel Bajo-Bajo es el nivel de disparo de un enclavamiento para detener el funcionamiento de la bomba de descarga.

Aunque los estanques cuyo costo es más barato tienen una razón altura a diámetro de 1,0; se pueden usar otros valores según consideraciones de transporte (en caso de estanques fabricados en maestranza) o según condiciones de layout.

Algunos ingenieros de proceso manifiestan cierta molestia cuando se usa la nomenclatura de niveles de alarma, por ejemplo, LAL (Level Alarm Low), y prefieren referirse al tema con la nomenclatura tipo LLL (Low Liquid Level). Sin embargo, el significado está relacionado con el mismo concepto: definir los niveles para que el sistema de control se pueda programar de manera que la operación sea segura y funcional.

La correcta determinación de los niveles de operación de los estanques de almacenamiento bajo las normas API 650 y API 2350 es fundamental para garantizar la seguridad, eficiencia operativa y prevención de riesgos.

Los niveles: LLLL (Low Low Liquid Level), LLL (Low Liquid Level), NOL (Normal operating Level), HLL (High Liquid Level), HHLL (High High Liquid Level), y CH (Critical High) están influenciados por parámetros como la elevación de boquillas, caudales de llenado y vaciado, y el tiempo de respuesta requerido para acciones de emergencia.

Cuando se trata de reactivos peligrosos es importante emplear instrumentación de nivel redundante, ya sea con sensor de nivel con entrega de señal continua de nivel, o con interruptores de nivel para asegurar el trip³ en caso de operación fuera de condiciones seguras.

Las dos condiciones inseguras son un nivel que produzca derrame de reactivo, o en el caso contrario un nivel que provoque cavitación de la bomba de impulsión desde el estanque.

³ El término “trip” traducido como disparo es común en la jerga de instrumentación y control automático. Estos ingenieros de control automático incluso usan el anglicismo “tripear” para referirse a una condición que genera una señal de parada de un motor eléctrico.

Algunos Reactivos en Cerro Verde

Cerro Verde es una concentradora de cobre y molibdeno ubicada en Perú cuya capacidad antes de su ampliación era de 108.000 t/d de mineral a proceso. Dado la elevada competencia del mineral la conminución incluyó chancadores secundarios de cono y terciarios tipo HPGR. La flotación produce un concentrado de cobre y un concentrado de molibdenita. Posteriormente se ha desarrollado una ampliación de capacidad de Cerro Verde y se menciona una capacidad total de más de 360.000 t/d. Para la capacidad de la primera fase (a la que se hace referencia en este documento), con una utilización efectiva de la concentradora de 93%, se tiene una capacidad nominal de 4.839 t/h.

Colectores en Flotación Colectiva

En la **Figura 6** se observa un esquema de los componentes del sistema de recepción, almacenamiento y distribución de colector primario, de la etapa original, en la concentradora Cerro Verde.

El esquema no está completo, pero permite formarse una idea de los equipos principales, las cañerías y la instrumentación.

El estanque de almacenamiento de colector primario, tipo tiocarbamato, suministrado en camiones de alrededor de 25 m³ de capacidad, tiene una capacidad total de alrededor de 50 m³, sin embargo, al descontar la altura no-útil el volumen neto es de aproximadamente 39 m³.

La **Figura 6** muestra un estanque con un circuito cerrado de distribución de colector primario. Las bombas centrífugas que alimentan este circuito impulsan reactivo tanto hacia los puntos de consumo, como de retorno al estanque de almacenamiento. En la línea de retorno se observa una válvula controladora de presión (PCV-0108) tipo mecánica, cuya función es mantener la línea de distribución presurizada. Notar que el estanque de almacenamiento de colector está equipado con una válvula apagallamas.

El esquema mostrado no incluye todos los puntos de distribución, sino que solamente se han incluido, para simplificar, la dosificación hacia cada uno de los cuatro molinos de bolas del proyecto antes de la ampliación. En cada una de esas líneas de distribución se aprecian paquetes vendor, que en forma simplificada muestran un FE y un FIC. Estos paquetes son inyectores que cumplen la misma función que las bombas dosificadoras, pero funcionan de otra manera.

En la **Figura 7** se muestra un esquema de un inyector Enraf Fluid Technology, utilizado en el proyecto Cerro Verde. Estos inyectores incluyen un panel con un flujómetro, una válvula solenoide y un controlador electrónico. El principio de control es modular en intervalo de tiempo o en frecuencia de pulsos la válvula solenoide, medir el flujo y el sistema de control mantiene el flujo según una consigna (set point) seleccionado por el operador. Estos inyectores ya se habían utilizado en el proyecto Batu Hijau. Sin embargo, aunque su principio de funcionamiento es correcto si el circuito de recirculación suministra un flujo con la presión adecuada y el equipo se instala en la vecindad del punto de dosificación, en Cerro Verde estos equipos presentaron un problema de comunicación con el sistema de control distribuido Honeywell (DCS). Esto no permitió la comunicación con sala de control y obligó a los operadores a tener que ingresar el set point en cada inyector (uno por cada punto de dosificación) en forma manual directamente en cada equipo. Finalmente, esto debería haberse solucionado ya que posteriormente Honeywell compró a Enraf.

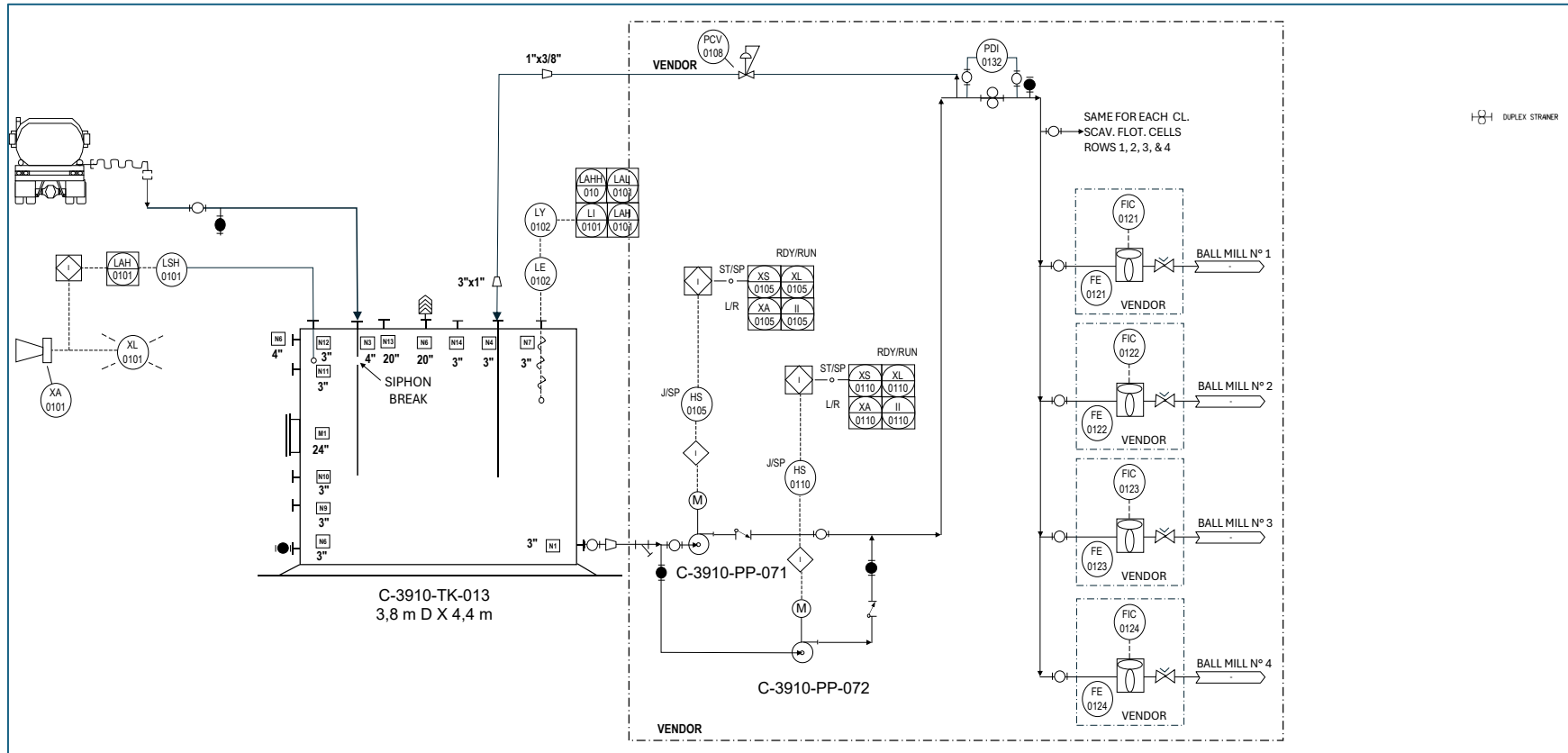


Figura 6: Estanque de Almacenamiento Colector Primario Cerro Verde

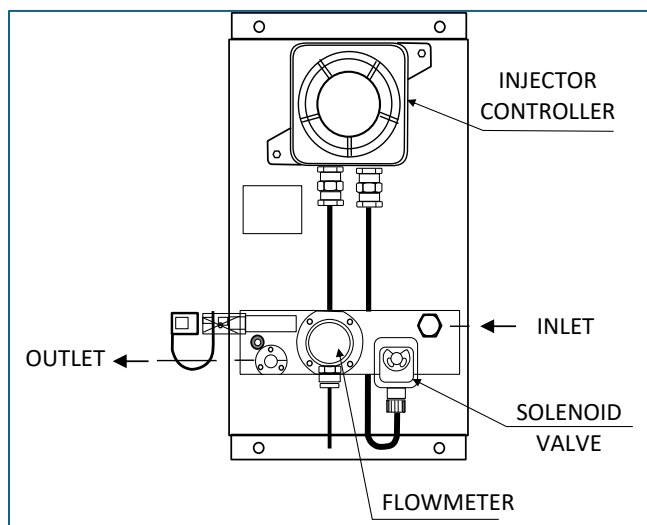


Figura 7: Inyector “Enraf” para Dosificación de Reactivo

Estos inyectores se instalan cerca de los puntos de inyección y son alimentados con el reactivo presurizado desde el circuito desde el estanque de almacenamiento y distribución. El reactivo debe estar limpio o tener un filtro en línea para prevenir partículas que tapen los inyectores.

Esta solución presenta la ventaja de eliminar los estanques diarios de reactivos que están equipados con múltiples bombas dosificadoras, conjunto que debe estar instalado cerca de los puntos de adición de reactivo.

En Chile, hasta donde se tiene información, es más común el empleo de estanques diarios con sus respectivas bombas dosificadoras, sistema que también presenta requerimientos especiales para control preciso de dosificación. Por ejemplo, si la línea de descarga de la bomba dosificadora desciende desde el nivel de la bomba hacia un nivel inferior donde se dosifica, entonces el efecto sifón del reactivo interfiere con el funcionamiento de la válvula de retención después del diafragma de la bomba. Esto provoca que la dosificación pierda precisión. Por esta razón es importante instalar una válvula de presión tipo “backpressure valve”, que asegura una presión constante en la línea de descarga de la bomba dosificadora.

La **Figura 8** presenta un esquema simplificado del conjunto de estanques de reactivos del proyecto Cerro verde.

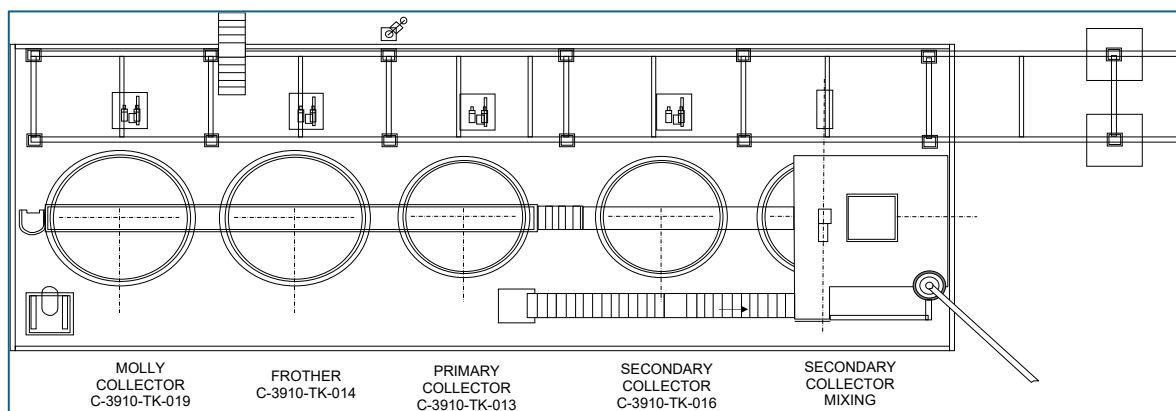


Figura 8: Esquema simplificado de Planta de Estanques de Reactivos Cerro Verde

El Process Design Criteria de la fase original del diseño de la primera concentradora de Cerro Verde del año 2006, indica el uso de un colector primario tipo Cytec AERO 5415. Este reactivo entiendo ha sido reemplazado en su denominación debido a un cambio de la empresa que lo producía en esa época. Sin embargo, se trata de un tionocarbamato, y la dosificación especificada en el criterio de diseño señalado era de 12,1 g/t lo que parece bastante bajo.

La Tabla 1 presenta los puntos de adición de colector primario de Cerro Verde.

Tabla 1: Puntos de Adición de Colector Primario

Main Points of Addition	%	Kg/h	L/min
Ball Mill line # 1 (cyclone U/F)	15,5%	9,08	0,14
Ball Mill line # 2 (cyclone U/F)	15,5%	9,08	0,14
Ball Mill line # 3 (cyclone U/F)	15,5%	9,08	0,14
Ball Mill line # 4 (cyclone U/F)	15,5%	9,08	0,14
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 1	6,7%	3,92	0,06
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 2	6,7%	3,92	0,06
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 3	6,7%	3,92	0,06
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 4	6,7%	3,92	0,06
Cu 1 st Cleaner Flotation Cell 1	5,6%	3,28	0,05
Cu Final Cleaner (Columns Feed Box)	5,6%	3,28	0,05

Como colector secundario el criterio de diseño indica un xantato tipo SIPX (Sodium Isopropil Xanthate), con el nombre, a la fecha de Cytec AERO 343. La dosificación establecida en dicho criterio, de nuevo muy baja a juicio del que escribe, de 4,4 g/t de mineral. Esto significa aproximadamente, un consumo anual de 173 toneladas de SIPX. La distribución de xantato se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Puntos de Adición de Colector Secundario

Main Points of Addition	%	Kg/h	L/min
Ball Mill line # 1 (cyclone U/F)	15,50%	3,30	0,53
Ball Mill line # 2 (cyclone U/F)	15,50%	3,30	0,53
Ball Mill line # 3 (cyclone U/F)	15,50%	3,30	0,53
Ball Mill line # 4 (cyclone U/F)	15,50%	3,30	0,53
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 1	6,70%	1,43	0,23
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 2	6,70%	1,43	0,23
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 3	6,70%	1,43	0,23
Cu Scavenger Flot. Cell 1 – Row# 4	6,70%	1,43	0,23
Cu 1 st Cleaner Flotation Cell 1	5,60%	1,19	0,19
Cu Final Cleaner (Columns Feed Box)	5,60%	1,19	0,19

La **Figura 9** muestra un esquema simplificado del diagrama P&ID del sistema de preparación y distribución de SIPX en Cerro verde. El esquema mostrado no está completo, pero en la Tabla 2 se presenta la distribución a todos los puntos de este colector.

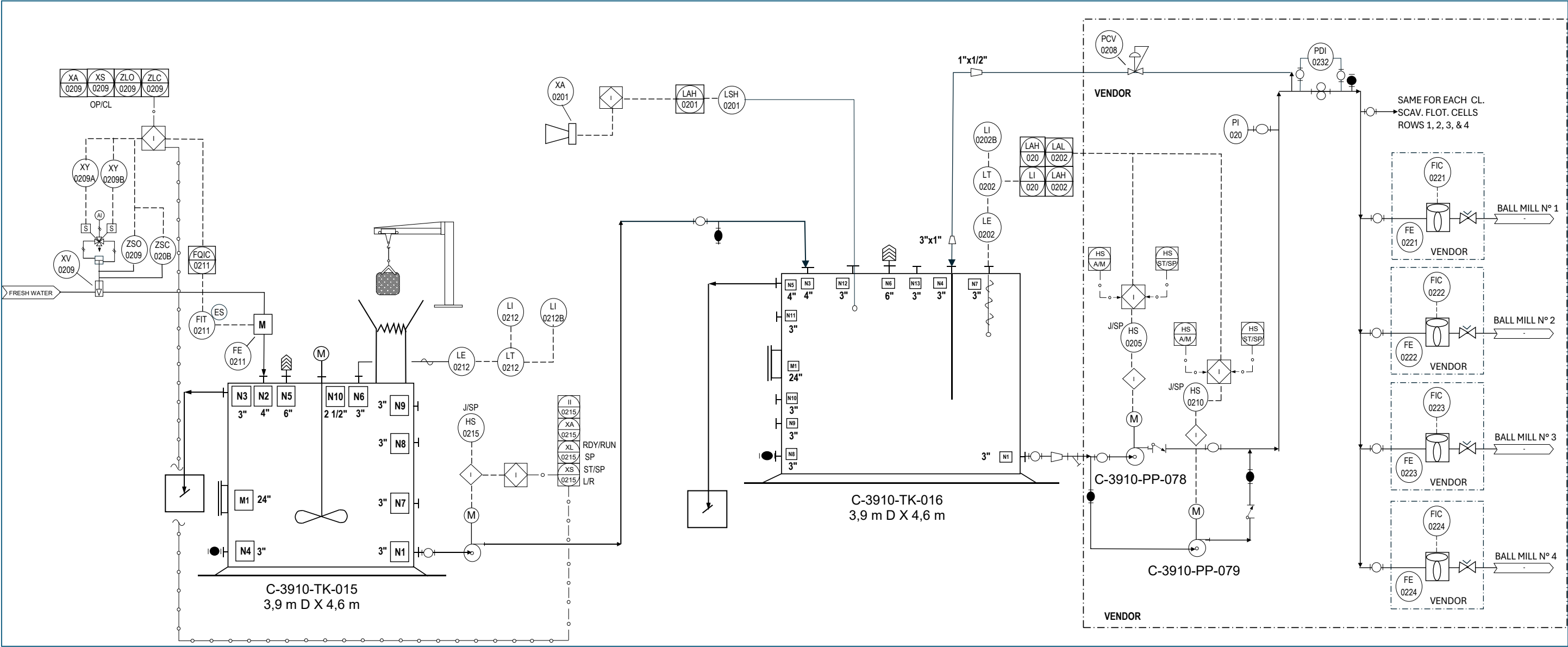


Figura 9: Estanques de Disolución y de Almacenamiento Colector Secundario Cerro Verde

Sodium Hydrosulfide en Flotación Selectiva

En Cerro Verde se usa el sulfhidrato de sodio como depresante de cobre en la flotación selectiva.

La Tabla 3 presenta los consumos unitarios de NaHS en la concentradora (etapa 1) Cerro Verde.

Tabla 3: Consumos Unitarios y Totales de NaHS

Consumption	Units	Value
Mo Conditioning Tank	g/t	4.700
Mo 1st Cleaner Cond. Tank	g/t	2.400
Final Cleaner Flotation	g/t	800
Total Addition	g/t	7.900

La cifra de 7,9 kg/t de concentrado colectivo es bastante típica, más bien realista, ya que el consumo que se declara en condiciones óptimas, en muchos proyectos, es de alrededor de 5 kg/t. El sulfhidrato de sodio es suministrado en solución al 40% en peso de concentración. A esa concentración las soluciones de NaHS empiezan a cristalizar a alrededor de 14°C, por lo que se debe tener el estanque de recepción y almacenamiento con un sistema de calefacción para mantenerlo por sobre los 20°C.

La documentación del proyecto (Process Design Criteria) indica que el estanque de almacenamiento (C-3540-TK-609) tiene un volumen de 260 m³. En cambio, el P&ID indica un diámetro de 7 m por un alto de pared de 7 m, y se declara una “Capacity” de 245 m³. La **Figura 11** muestra un esquema tomado de un plano del proyecto en que se observa una distancia desde el fondo del estanque hasta el centro de la boquilla de succión de la bomba de descarga, de 300 mm. Si estimamos en forma aproximada una sumergencia de 400 mm (distancia entre el eje de la bomba y el nivel mínimo del líquido), solamente quedan 250 mm para la revancha (freeboard), lo que parece poco. Con estos datos el que escribe estima un volumen neto de 233 m³ un poco alejados de los 245 m³ que se declaran en el P&ID. Por supuesto no es un error importante, pero se debe considerar que tanto la sumergencia asumida de 0,4 m, como la revancha de 0,25 m declarada, parecen cifras poco conservadoras.

Algo similar ocurre con el estanque de distribución (C-3540-TK-610), el cual, con 4,7 m de diámetro y 4,7 m de altura de pared, aparece con un volumen designado como “Capacity” en el P&ID de 73 m³. Sin embargo, al recalcular descontando los niveles bajos y sobre niveles se obtiene un volumen neto de aproximadamente 65 m³.

En la **Figura 10** se presenta un esquema simplificado del P&ID del sistema de almacenamiento y distribución de NaHS. Se observa que el traspaso desde el estanque de almacenamiento (C-3540-TK-609) hacia el estanque de distribución (C-3540-TK-610), se dispone un mezclador estático para dilución con agua fresca del NaHS a 40% hasta 20% para evitar problemas de cristalización. A 20 % de concentración en peso el NaHS cristaliza a una temperatura de –45°C. Mientras que a 42% el “Freezing point⁴” es de aproximadamente +10°C.

⁴ Freezing Point del NaHS se define como la temperatura a la cual la solución cristaliza a una condición de “papilla” (mush en inglés).

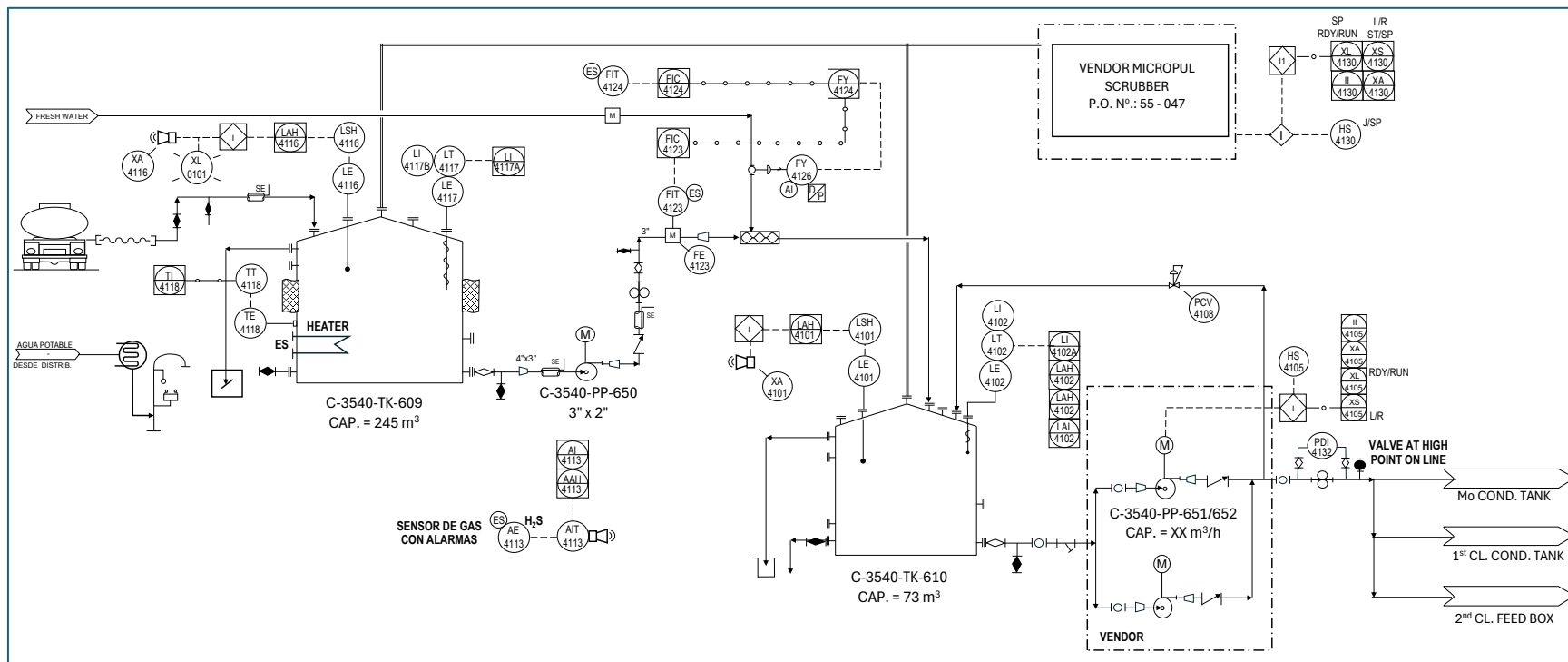


Figura 10: Planta de Molibdeno Almacenamiento y Distribución de NaHS Cerro Verde

En la **Figura 10** se observa que se debe disponer de un lavador de gases conectado a los estanques de almacenamiento y de distribución. Esto se debe a que con temperaturas elevadas aumenta la producción de vapores de gas sulfhídrico (H₂S), gas venenoso más pesado que el aire, que se acumula en la parte superior de los estanques. Además, con la dilución con agua fresca el pH baja y esto también aumenta la producción de H₂S, pero en menor medida que con el aumento de temperatura.

Ambos estanques están equipados con sensores de nivel y alarmas de nivel bajo y de nivel alto. Se aprecia que los sistemas de detección y despliegue de niveles en ambos estanques se encuentran duplicados. Se disponen de sistemas de detección y alarma sonora para la presencia de gas sulfhídrico (AE-4113). La cantidad de sensores no está explicitada en el P&ID. Se muestra solamente uno.

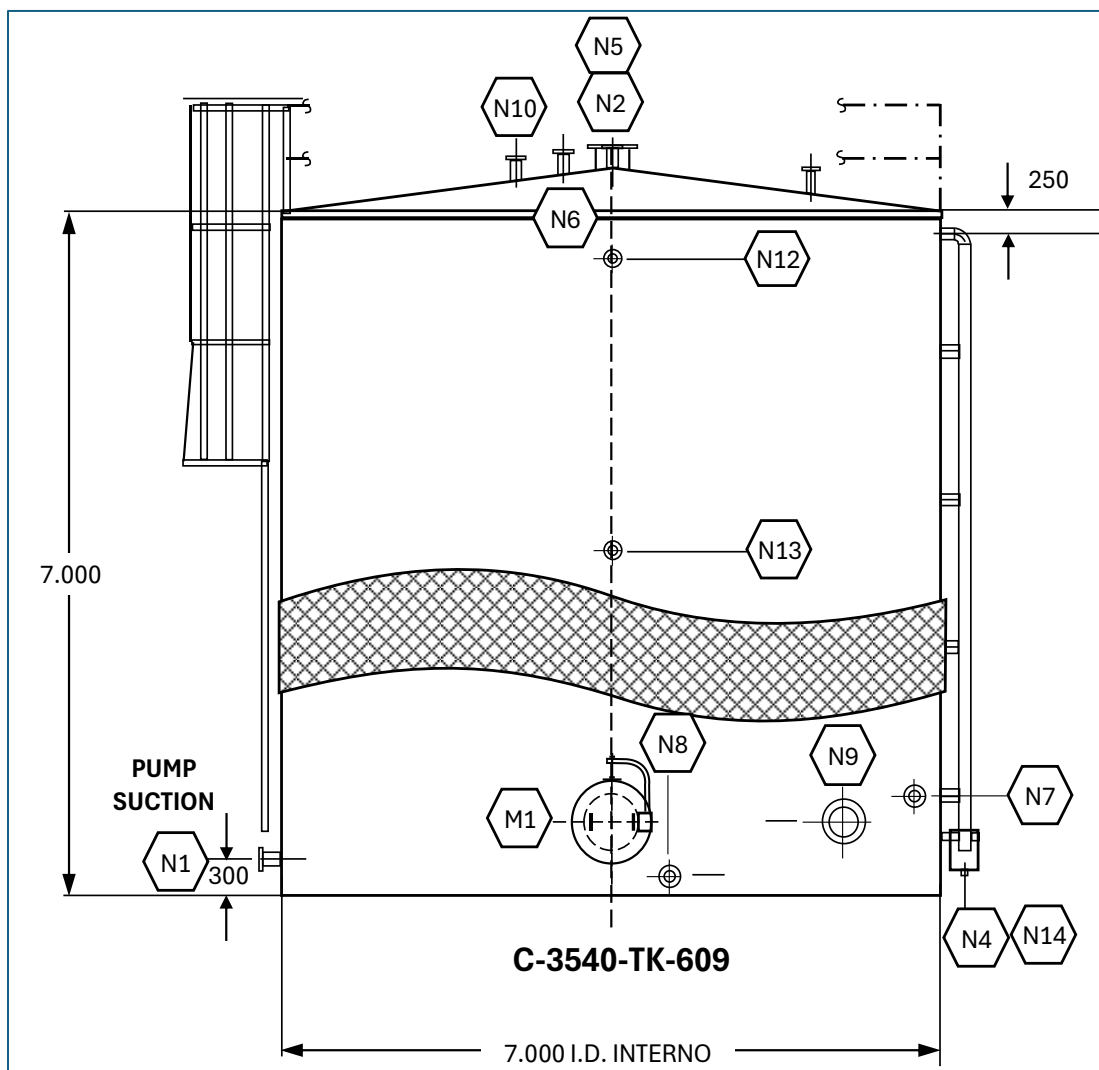


Figura 11: Estanque de Almacenamiento Sulfhidrato de Sodio (Plano PSP108-C-3500-55N-401 Rev. 0)

La **Figura 11** es un esquema simplificado del estanque de almacenamiento de sulfhidrato de sodio concentrado. Se observa que la distancia muerta desde el centro de la boquilla de succión de la bomba es de 300 mm, y la distancia del “freeboard” de solamente 250 mm.

Se comprende que parece majadería insistir en la definición más detallada de la geometría y las disposiciones de boquillas en los estanques de reactivos. Se supone que, en el área minera, en operaciones, se trabaja con una filosofía de “química de balde”. Pero al que escribe le resulta un poco extraño que algunos ingenieros de proceso pongan un celo enorme en los balances, al punto que, en algunos casos, presentan sus resultados con uno o más decimales. En cambio, para definir los volúmenes totales, nominales y netos, así como los niveles respectivos, pareciera que no se encuentra tanto rigor.

Se recomienda, una vez más, que los cálculos de balances, tiempos de residencia, volúmenes, y otras capacidades tengan como finalidad alimentar a las especialidades de hidráulica, cañerías, mecánica e instrumentación y control automático; además, por cierto, de la funcionalidad del diseño.

Algunos Reactivos en Laguna Seca

Minera Escondida desarrolló una expansión posterior a su concentradora Los Colorados y dicha expansión se denominó Fase IV. Esta expansión consideró un aumento de 110.000 tpd de capacidad de procesamiento, alcanzando así un total de 230.000 tpd de mineral procesado.

La Fase IV contempló las siguientes grandes obras:

Un nuevo chancador en el rajo abierto y un sistema de correas transportadoras hacia la nueva planta concentradora.

- La construcción de una nueva planta concentradora en Laguna Seca, ubicada a 7 km de la planta concentradora Los Colorados.
- Un mineroducto desde la nueva concentradora Laguna Seca hasta la planta concentradora ya existente y el reacondicionamiento de un anterior mineroducto al Puerto Coloso.
- El aumento de la capacidad de la planta de filtros y del almacenamiento de concentrados en el Puerto Coloso.
- Un aumento de los equipos de mina y de la infraestructura requerida para desarrollar las actividades de explotación destinadas a alimentar con mineral la nueva planta Laguna Seca.
- Modificaciones a las instalaciones del Puerto Coloso, destinadas a embarcar un mayor volumen de concentrado.

La planta incluye en su circuito de molienda un molino SAG de 38 pies (11,6 m) de diámetro y 20 pies (6 m) de EGL⁵ con un GMD de 19,4 MW de potencia. Tres molinos de bolas de 25 pies de diámetro cada uno equipado con accionamiento “Gearless Mill Drive (GMD), también denominado motor tipo anillo, de 13,4 MW de potencia. La distribución del bajo tamaño del del molino SAG es conducido hacia los molinos de bolas desde un cajón de bombeo equipado con dos bombas centrífugas de 1,1 MW de potencia cada una. Cada bomba alimenta un distribuidor en presión, el cual recibe la pulpa y la distribuye hacia los tres molinos de bolas desde cañerías dedicadas, vía cajones de traspaso y canaletas también dedicadas. El sistema contempla redundancia en distribuidores en presión y su bomba dedicada, lo mismo que los cajones de traspaso y las canaletas.

La flotación rougher se realiza en seis filas de celdas de 160 m³ cada una. Tanto los concentrados de la flotación Rougher como los de la flotación Scavenger son enviados al circuito de remolienda. El producto de la remolienda alimenta la flotación de primera limpieza que incluye 20 celdas de 160 m³ cada una. La flotación Scavenger se realiza en 16 celdas de 160 m³.

La flotación de segunda limpieza se realiza en seis celdas columna de 4,5 m de diámetro y 13,4 m de altura.

La concentradora Laguna Seca definió en su criterio de diseño del año 2.000 el uso de dos espumantes y dos colectores para la flotación de cobre. Los espumantes fueron definidos como “Frother” N°1: “ethylhexano/methyl isobutil carbinol” y “Frother” N°2: aceite de pino. El colector primario como un “isopropyl ethyl thionocarbamate” de nombre comercial SF-758. El colector secundario un “Sodium isobutyl xanthate” de nombre comercial SF-114. Dado el año del desarrollo del proyecto, es posible que los nombres comerciales de los espumantes y

⁵ EGL significa: “Effective Grinding Length”. Esto corresponde a la cámara efectiva de molienda al interior del molino.

colectores ya no se encuentren en el mercado dado las fusiones y compras, a veces forzadas que ocurren en algunas grandes empresas desde hace varios años.

Espumantes en Flotación Colectiva Laguna Seca

Laguna Seca descarga los espumantes desde los camiones de suministro en forma gravitacional. El proyecto contempló el uso de aceite de pino y SF-575 para uso mezclado o individual. El consumo se definió como 2,4 m³/d de aceite de pino y 1,4 m³/d de F-575, o una mezcla de ambos.

Ambos espumantes son recibidos en camiones cisterna de 25 m³ y son descargados en estanques de almacenamiento dedicados. La capacidad declarada de cada estanque de almacenamiento es de 150 m³. Sin embargo, si observamos la **Figura 14**, se puede calcular que, aunque el volumen total es de 166 m³, dada la distancia entre el piso del estanque y el centro de la boquilla de succión (boquilla N-15 salida producto de 426 mm), prácticamente no existe distancia de revancha para alcanzar la capacidad de 150 m³.

En el área de molienda y flotación se encuentran los estanques diarios 0360-TK-069/070, con sus respectivos cuadros de control de dosificación de espumantes. Los estanques diarios 0360-TK-069/070 son de 5 m³ de capacidad cada uno. En la **Figura 16** se muestra el esquema de control de espumantes. Este esquema se repite para colectores. Se mide flujo con un flujómetro tipo Coriolis y un lazo PID maneja mediante control realimentado una válvula modulante. No se observan bombas dosificadoras en los P&IDs, de manera que los estanques diarios deben estar ubicados en altura, probablemente en la vecindad de las baterías de hidrociclones para alimentación por gravedad a los cuadros de control.

En la **Figura 12** se presenta un esquema simplificado del layout en planta del área de estanques de recepción y almacenamiento de reactivos.

El proyecto Laguna Seca privilegió el uso de la gravedad para el traspaso de reactivos, tanto desde los camiones cisterna de suministro hacia los estanques de almacenamiento, como desde los estanques diarios de reactivos hacia los puntos de consumo.

Es usual la disposición de una o más filas de estanques en un área con muretes de contención y un área de aparcamiento de los camiones de suministro. Normalmente, cuando no se dispone de topografía adecuada, el traspaso desde camiones hacia los estanques se realiza mediante bombas centrífugas. Laguna Seca usa gravedad para dicha descarga.

Siempre se dispone de duchas y lavaojos de emergencia en dichas áreas (no mostradas en la **Figura 12**). Si la temperatura del lugar es muy baja es usual emplear la norma ANSI Z-358.1-2009 que indica los flujos para duchas, para lavaojos y una temperatura del agua moderadamente tibia (entre 20 a 25°C).

No deben estar cerca estanques de reactivos que, en caso de derrames, si llegan a mezclarse pueden producir una condición de gran riesgo. Por ejemplo, estanque de ácidos no deben estar cerca de estanque con soluciones de cianuro ni de sulfhidrato de sodio, ya que su mezcla produce gases venenosos y mortales.

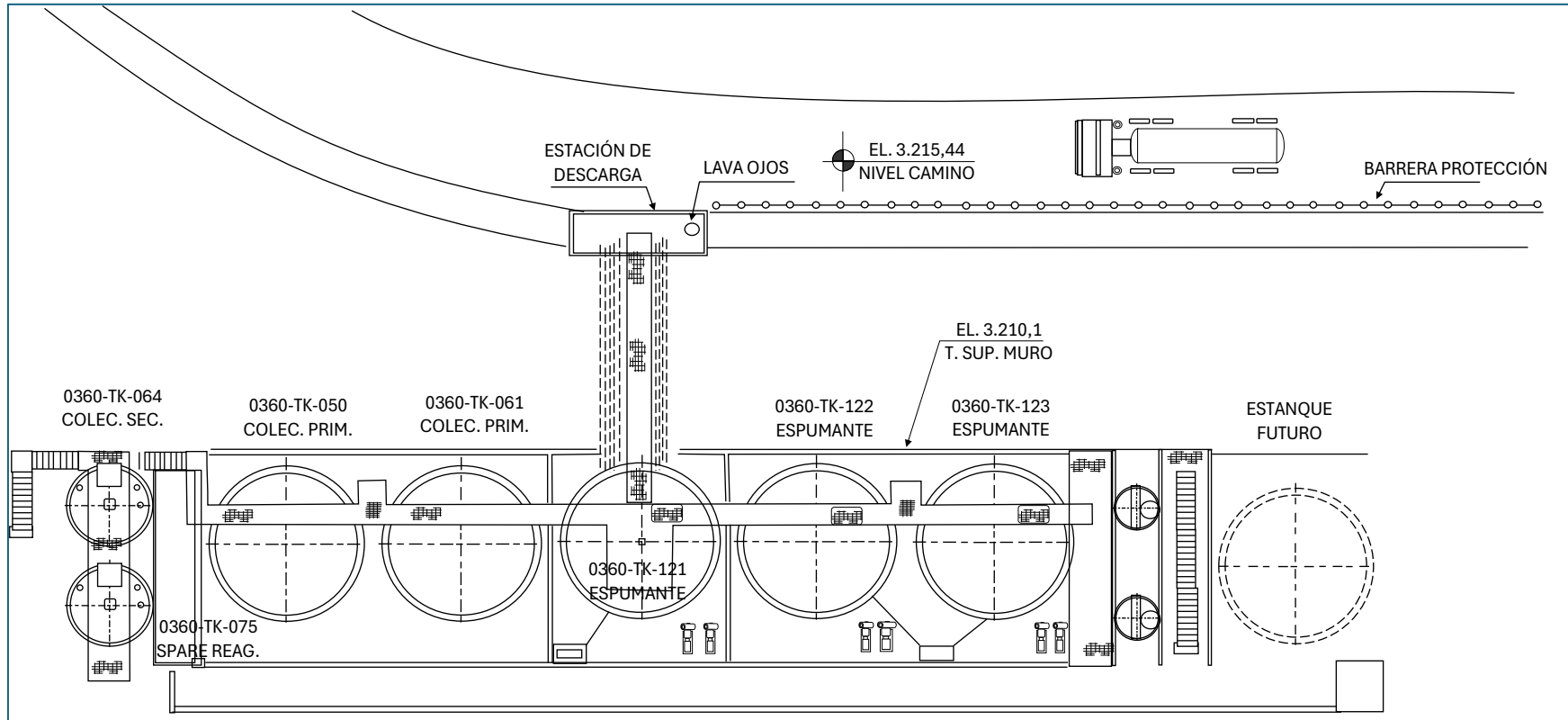


Figura 12: Esquema Simplificado Disposición General Estanques de Reactivos Laguna Seca



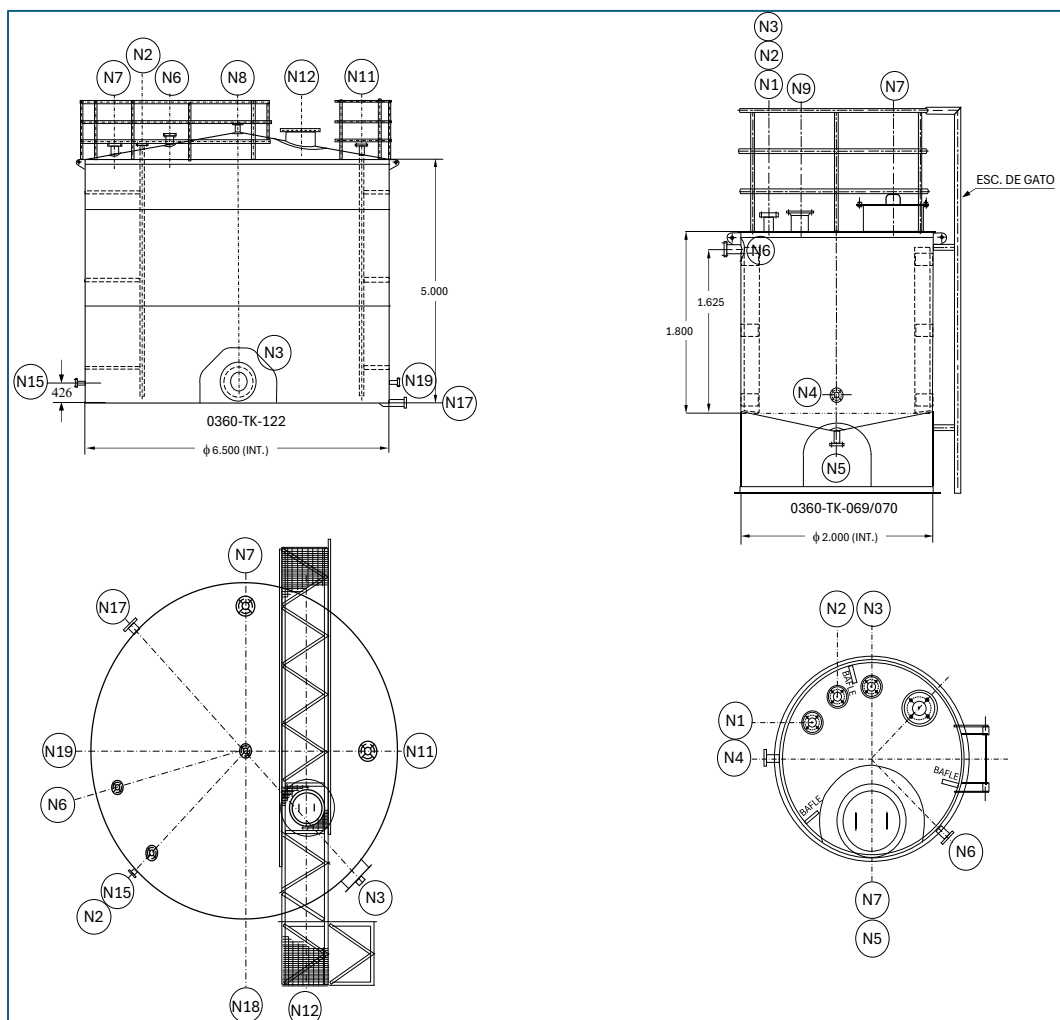


Figura 14: Estanque de Almacenamiento Espumante y Estanque Diario Espumante

Es curioso, para el que escribe, no encontrar boquillas de rebose en los planos que muestran a los estanques de almacenamiento de espumante (0360-TK-122/123). Esto se repite tanto en el P&ID respectivo, como en plano de diseño del estanque (0360-TK-122), el cual se muestra en la **Figura 14**. En la **Figura 15** se presenta una imagen tomada desde el plano de diseño del estanque (0360-TK-122).

CUADRO DE BOQUILLAS						
MARCA	DIAMETRO	CLASE	NORMA	ELEV. DESDE TOPE INT. FONDO TK	LONG. BOQUILLA	SERVICIO
N2	4"	150 FF	ANSI	3215.149	170	RECIRCULACION
N3	24"	150 FF	ANSI	3210.350	300	ESCOTILLA DE MANTO
N6	4"	150 FF	ANSI	3215.149	170	REPUESTO
N7	6"	150 FF	ANSI	3215.171	190	CONEXION INSTRUMENTO
N8	4"	150 FF	ANSI	3215.649	176	VENTEO
N11	6"	150 FF	ANSI	3215.190	175	ENTRADA PRODUCTO
N12	24"	150 FF	ANSI	3215.530	356	ESCOTILLA DE TECHO
N15	3"	150 FF	ANSI	3210.326	175	SALIDA PRODUCTO
N17	6"	150 FF	ANSI	3209.900	275	DRENAJE
N19	3"	150 FF	ANSI	3210.050	175	REPUESTO

Figura 15: Cuadro de Boquillas del plano que muestra el estanque (0360-TK-122)

En el cuadro de boquillas de la **Figura 15** no se observa ninguna que corresponda a una salida de rebose del estanque.

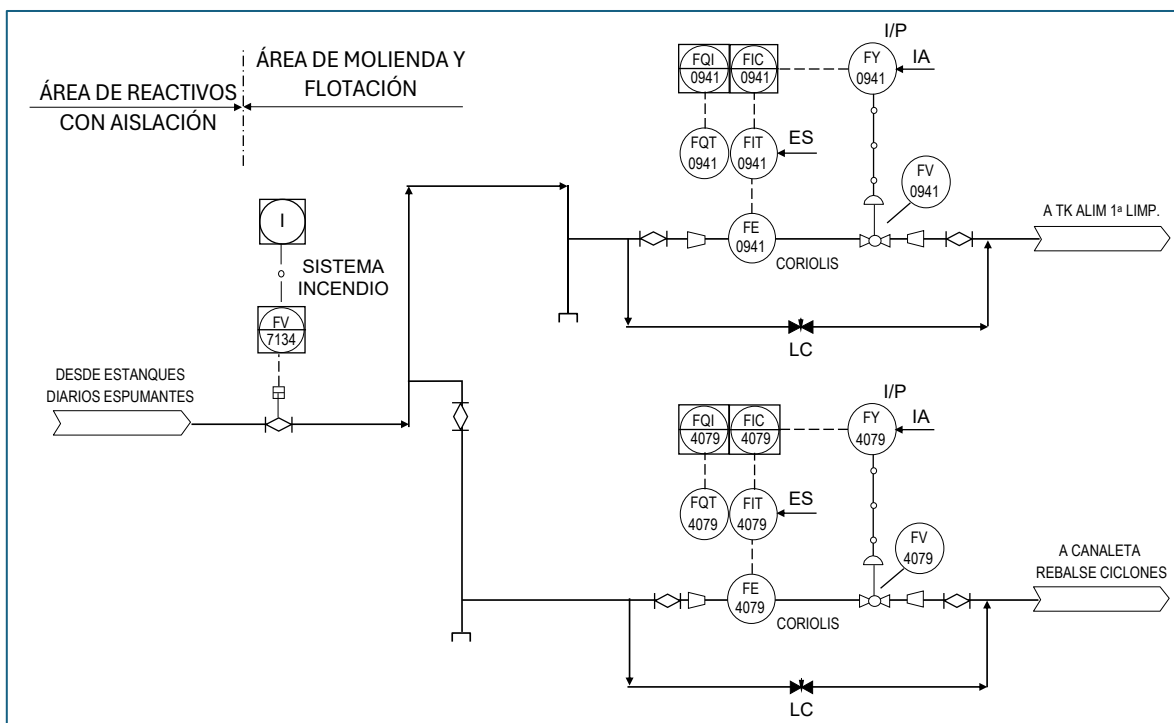


Figura 16: Esquema de Control de Dosificación de Espumantes a Flotación

La **Figura 16** muestra un esquema de cuadro de control de dosificación de espumantes en el proyecto Laguna Seca. Desde estanques diarios de dosificación de espumantes se descuelgan líneas gravitacionales que alimentan los cuadros de control, los cuales incluyen flujómetro Coriolis, y válvula de globo modulante con control PID desde el Sistema de Control representado por el símbolo FIC-0941 y FIC-4079. Como no dispongo de toda la información, debo suponer, lo cual es típico, que los estanques diarios se encuentran situados en la vecindad de las baterías de hidrociclones situadas en altura por encima tanto de los molinos, como de las celdas de flotación.

Colectores en Flotación Colectiva Laguna Seca

Laguna Seca especificó como colector primario, en el Criterio de Diseño de Procesos, un Isopropil Etil Tionocarbamato, de nombre comercial, a la fecha del proyecto, SF-758.

El consumo del criterio es de 32 g/t de mineral. Esto significa, para la capacidad nominal de 110 kt/d, un consumo de aproximadamente 3.520 kg/d. Este colector de formato líquido, suministrado en camiones de 25 t de capacidad neta, es recibido en dos estanques cuyas capacidades se nombran como de 150 m³ cada uno.

La **Figura 17** muestra un esquema simplificado del P&ID de los sistemas de recepción, almacenamiento y distribución del colector primario.

La **Figura 18** presenta un esquema simplificado del P&ID de preparación de xantato. Este reactivo como se sabe es suministrado en forma de pellets sólidos los cuales deben disolverse en agua. En esta figura se encuentra la instrumentación que permite dosificar el agua mediante un flujómetro Coriolis y válvula de corte actuada remotamente.

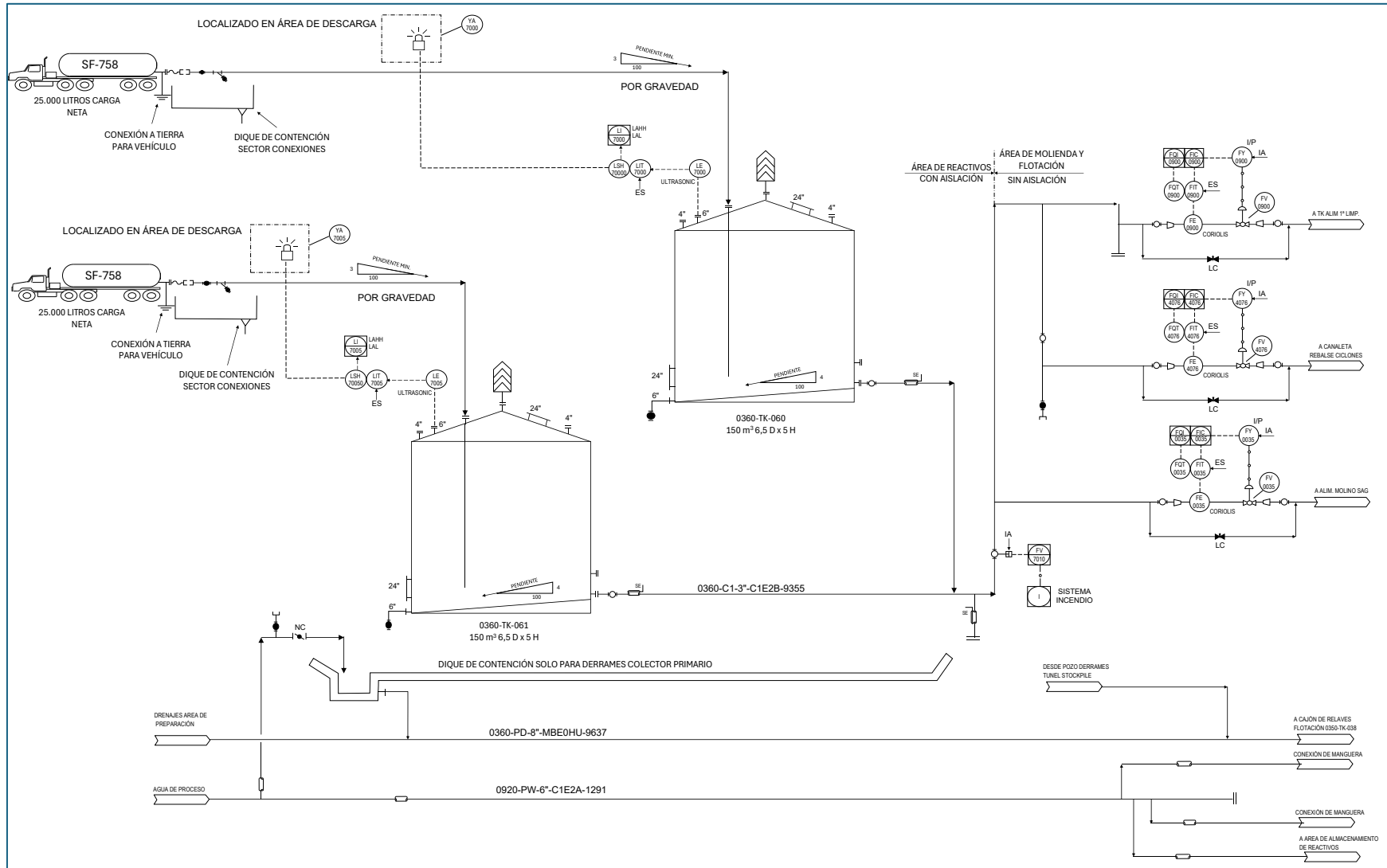


Figura 17: Esquema Simplificado P&ID Colector Primario Laguna Seca

Laguna Seca especificó en el Criterio de Diseño de Procesos un colector secundario tipo Iso Butil Xantato de Sodio, con nombre comercial, a esa fecha, de SF-114.

El xantato es suministrado en maxi sacos de una tonelada en forma de pellets sólidos y almacenado en un edificio aislado. Este reactivo debe disolverse en agua fresca en un estanque de mezcla, a una concentración de 10% en peso. El estanque de mezcla tiene una capacidad de 15 m³. La dosificación establecida en el Criterio de Diseño de Procesos es de 8 g/t de mineral.

El consumo diario de xantato es de 880 kg, lo que se traduce en alrededor de 8,7 m³ a la concentración de 10% en peso. El manual de operaciones del proyecto indica un consumo de 11,3 m³/d. Esta cifra debe considerar un factor de diseño.

El estanque de almacenamiento tiene una capacidad de 30 m³ y el agitador tiene un motor de 1,1 kW. El nivel del estanque de almacenamiento es controlado por el Sistema de Control de Procesos. Cuando se alcanza un nivel bajo en el estanque de almacenamiento se procede a transferir un batch que ya ha sido preparado con anticipación. Debido a la degradación del xantato en solución, no es recomendable preparar para varios días de consumo, sino que ir preparando según el consumo y el nivel del estanque de almacenamiento.

El colector secundario es distribuido desde el estanque de almacenamiento hacia los siguientes puntos:

- Canaleta de rebose de hidrociclones de los molinos de bolas.
- Celdas de flotación rougher.
- Estanque de alimentación a primera limpieza.
- Celdas de limpieza Scavenger.

El estanque de preparación de xantato tiene un ducto que conecta con un lavador de gases.

El lavador de gases (scrubber en inglés) es del tipo Venturi, es decir dispone de un arreglo en que la sección de entrada de gases tiene una garganta o sección de menor área para aumentar la velocidad de los gases que ingresan. El agua es introducida en la zona de restricción donde la velocidad es elevada lo que provoca un rompimiento en gotas finas que ingresan junto con los gases del lavador.

La concentración de una solución preparada con xantato (y en general cualquier solución) está directamente relacionada con su densidad. Cuando un nuevo batch de reactivo se ha preparado en el estanque de mezcla, el operador debe verificar la densidad para asegurarse que está en, o cerca de, la densidad deseada antes de la transferencia del lote preparado. Para determinar la densidad de la solución preparada se usa un hidrómetro.

La **Figura 19** muestra un esquema del estanque de mezcla de colector secundario (0360-TK-063). Según la geometría mostrada la capacidad neta es un poco inferior a 14 m³. En el P&ID y en el manual de operaciones se declara un volumen de 15 m³.

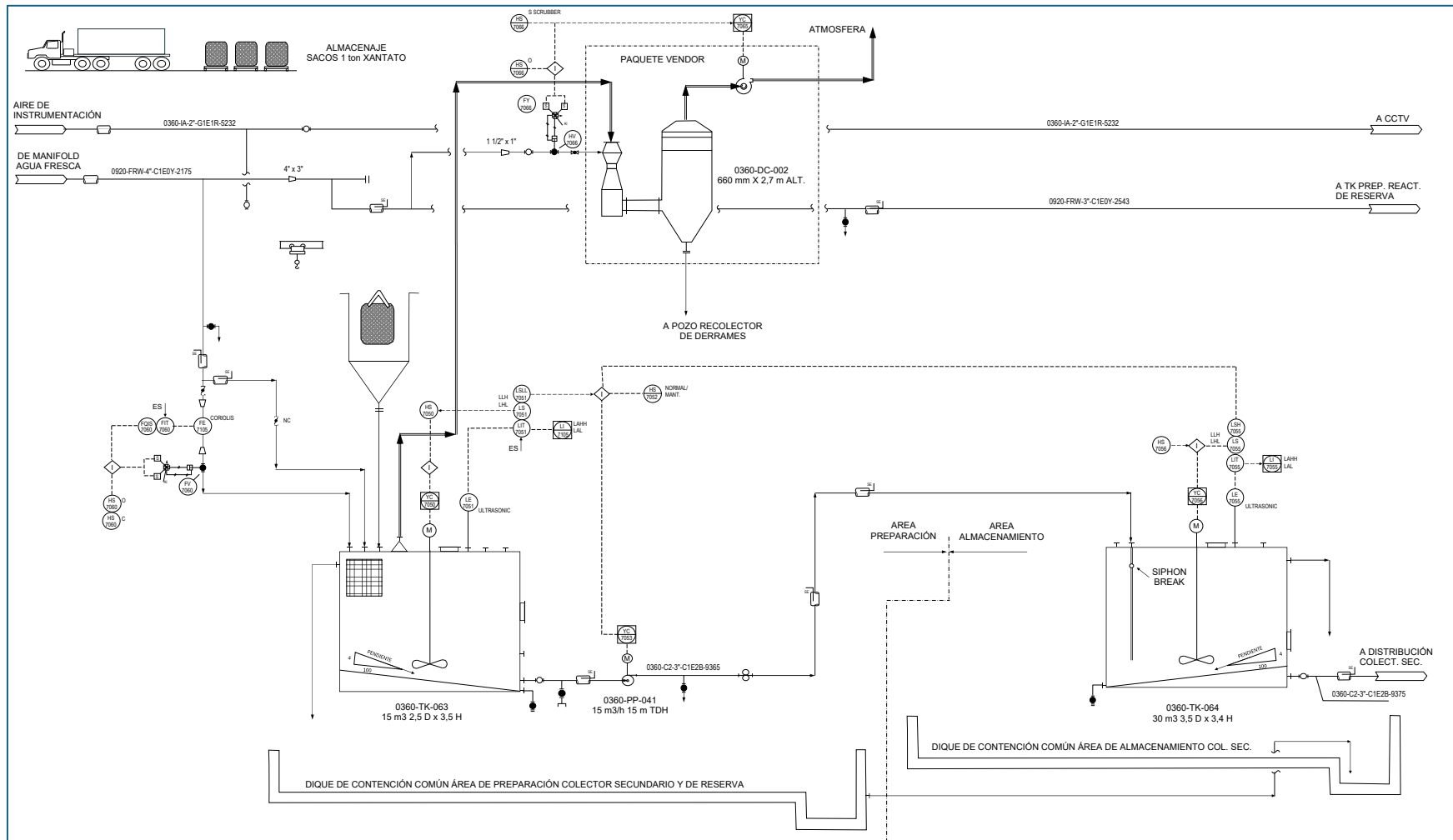


Figura 18: Esquema Simplificado P&ID Colector Secundario Laguna Seca

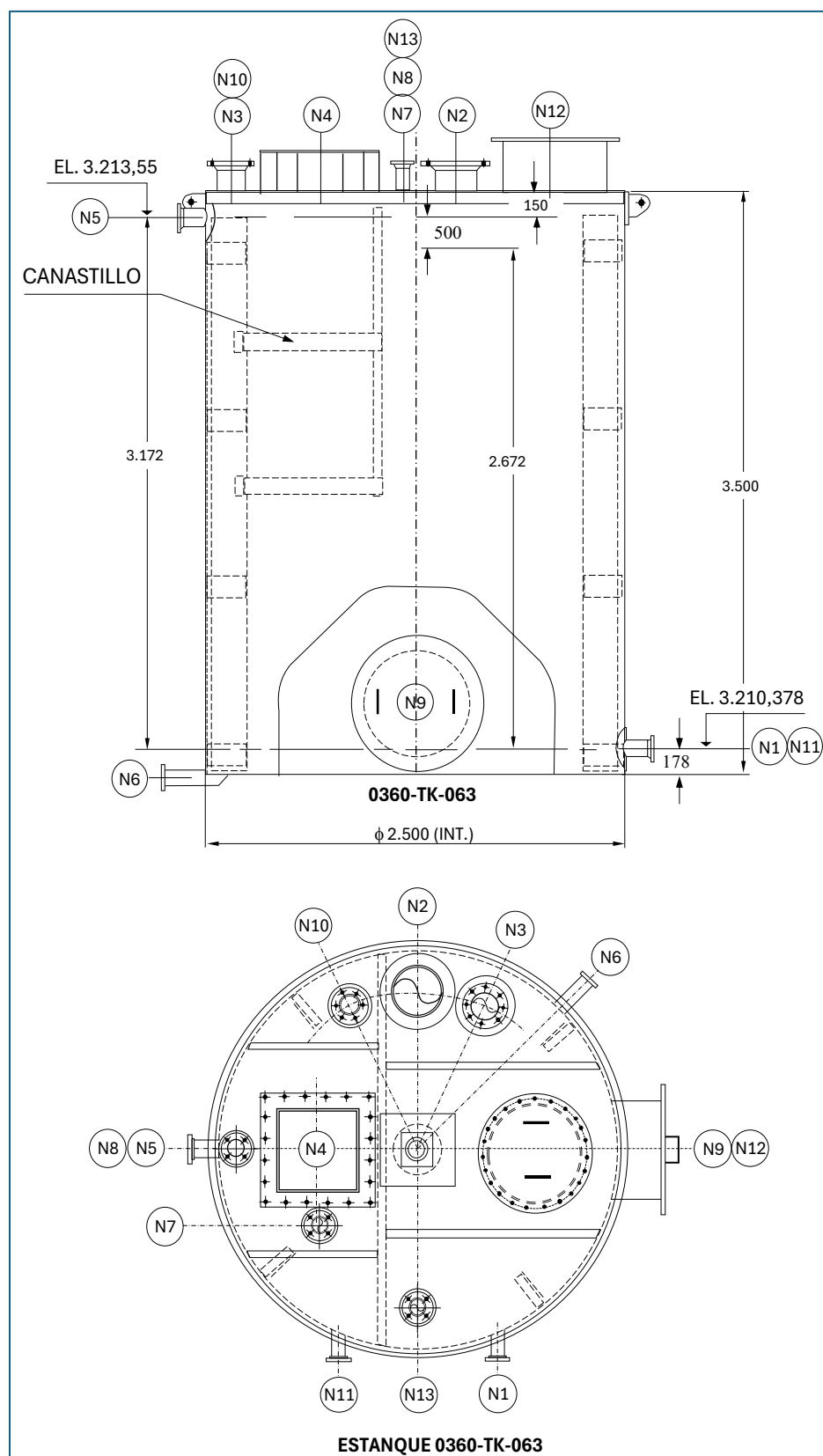


Figura 19: Estanque 0360-TK-063 Mezcla Colector Secundario

En la **Figura 19** se muestra un esquema del plano del estanque de preparación de xantato (0360-TK-063) de Laguna Seca. El plano no indica el volumen del estanque, pero el P&ID indica 15 m³ de capacidad, sin especificar que volumen sea éste. Con las dimensiones del plano de la figura recién indicada, se obtiene un volumen neto de trabajo de 13 m³, volumen calculado desde una distancia de 500 mm desde el eje de la boquilla de rebose y el eje de la boquilla de descarga. En este caso no se consideró una altura no-útil sobre el eje de la boquilla de descarga dado que la descarga es gravitacional. Sin embargo, para producir el flujo de descarga se requiere una cierta cabeza mínima que no fue considerada. La idea es relevar la importancia de definir con mayor detalle el volumen neto de trabajo de un estanque de proceso, especialmente cuando se trata de un estanque agitado para preparación de soluciones a cierta concentración. La distancia de 500 mm desde el eje de la boquilla de rebose es el mínimo recomendado para estanques con agitación.

El tema de la falta de consistencia y prolijidad en la definición de los volúmenes totales, nominales y netos de trabajo es un asunto que he observado a lo largo de los años, en distintas empresas de ingeniería.

Otro tema que he observado es la exagerada precisión que los ingenieros de instrumentación y control automático exigen a los ingenieros de procesos a cargo de los borradores de los planos P&ID. Se supone que se usa la norma ANSI ISA 5.1, pero en diferentes proyectos he asistido a instrucciones precisas para seguir ciertas directrices de dibujo de instrumentos en los planos P&ID, por parte de los ingenieros de instrumentación.

Por ejemplo, en un proyecto se me exigió que la línea desde el globo con el tag de una válvula o de un instrumento no debía tocar la válvula o el instrumento sino llegar muy cerca de éstos sin tocarlos, porque, se argumentaba, dicha línea no forma parte del instrumento o válvula.

En otro proyecto, se nos exigió a los ingenieros de proceso a cargo de revisar los P&IDs, que no usáramos los símbolos que representan los transmisores, por ejemplo, LT o LIT, en caso de nivel. En ese proyecto desarrollado por una oficina en Toronto, Canadá, desde el elemento primario, por ejemplo, un LE, se salía con una señal directamente hacia un símbolo que representa el despliegue de dicha señal en sala de control.

Mas adelante se verán algunos ejemplos de planos P&ID que siguen distintas formas de representar los instrumentos, válvulas actuadas, válvulas de control y las señales correspondientes.

Acidificación en Planta AVR Cerro Vanguardia

El proyecto Cerro Vanguardia fue desarrollado para una planta de oro y plata, en Argentina, y el que escribe participó en la ingeniería de detalles, el precomisionamiento en terreno, el comisionamiento, la puesta en marcha y un período de operaciones para transferir conocimiento a los operadores argentinos, que en 1997 no se interesaban en la minería y no contaban con personal capacitado.

El proyecto con etapas de conminución con chancado primario, secundario y terciario seguido de molienda en un molino de bolas incluyó lixiviación por agitación, Merrill Crowe, y además carbón en pulpa y un circuito de elusión con tecnología AARL. Esta mezcla de circuitos Merrill Crowe y además carbón activado, se debió a la ley de plata que era suficientemente alta para justificar ambos procesos que normalmente son excluyentes para disminuir costos de capital.

Este proyecto incluyó tecnología “Acidification Volatilization, Regeneration” (AVR), pero se tercerizó este proceso con una empresa denominada UNIFIELD, la cual denominaba al proceso AVR con el nombre CYANISORB.

Para recuperar el cianuro desde los ripios de la lixiviación y del CIP, se diseñó y construyó una planta que incluía contactar la pulpa con ácido sulfúrico, volatilizar en cianuro a su forma gaseosa de ácido cianhídrico en columnas, y posteriormente recuperar el cianuro mediante contacto del gas HCN con soluciones de soda cáustica en una torre tipo lavador de gases.

La planta Cerro vanguardia trataba durante la puesta en marcha aproximadamente 230 m³/h de soluciones con contenidos de alrededor de 350 mg/L de cianuro WAD⁶, con una recuperación de cianuro de alrededor de 90%. En la Tabla 4 se muestra un resumen del desempeño representativo de datos durante la PEM de la Planta de Recuperación de Cianuro de Cerro Vanguardia.

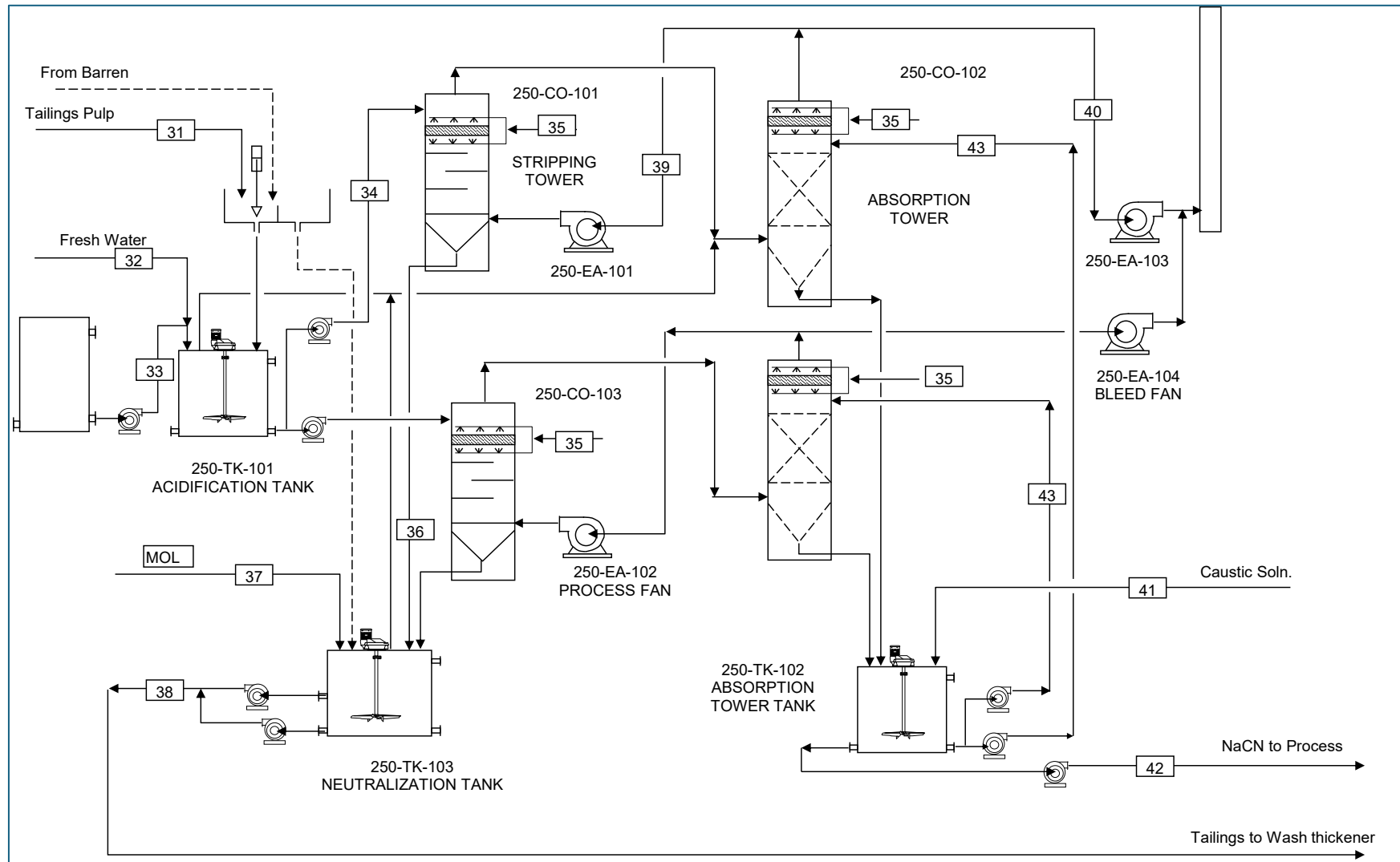
Tabla 4: Performance Summary for the CVSA Cyanide Recovery Plant

Description	Value
Feed Solution pH	11,0
Acidification pH	4,0
Solution Flow Rate (total), m ³ /h	230
Stripping Tower Air Flow Rate (each), m ³ /h	60.000
Feed Solution Cyanide Concentration, mg/L	350
Feed Solution Zinc Concentration, mg/L	200
Effluent Solution Cyanide Concentration, mg/L	35
Cyanide Recovery Efficiency, %	90%
H ₂ SO ₄ Consumption, kg/tonne solution	2,0
CaO Consumption, kg/tonne solution	0,0
NaOH Consumption, kg/kg recovered NaCN	1,0

El informe de UNIFIELD durante la PEM indicó que la planta puede recuperar aproximadamente 1.200 toneladas por año de NaCN, el cual es retornado al circuito de lixiviación. La

⁶ El cianuro WAD (Weak Acid Dissociable) se refiere a las especies de cianuro que se liberan fácilmente en condiciones de pH moderado (como pH 4,5 o más bajo), incluyendo el gas cianhídrico (HCN), cianuro libre (CN⁻) y complejos metálicos de cianuro con metales como cobre, zinc, cadmio y níquel.

recuperación global de cianuro da cuenta, agrega el informe, de alrededor de dos tercios del total de NaCN agregado al circuito de cianuración.



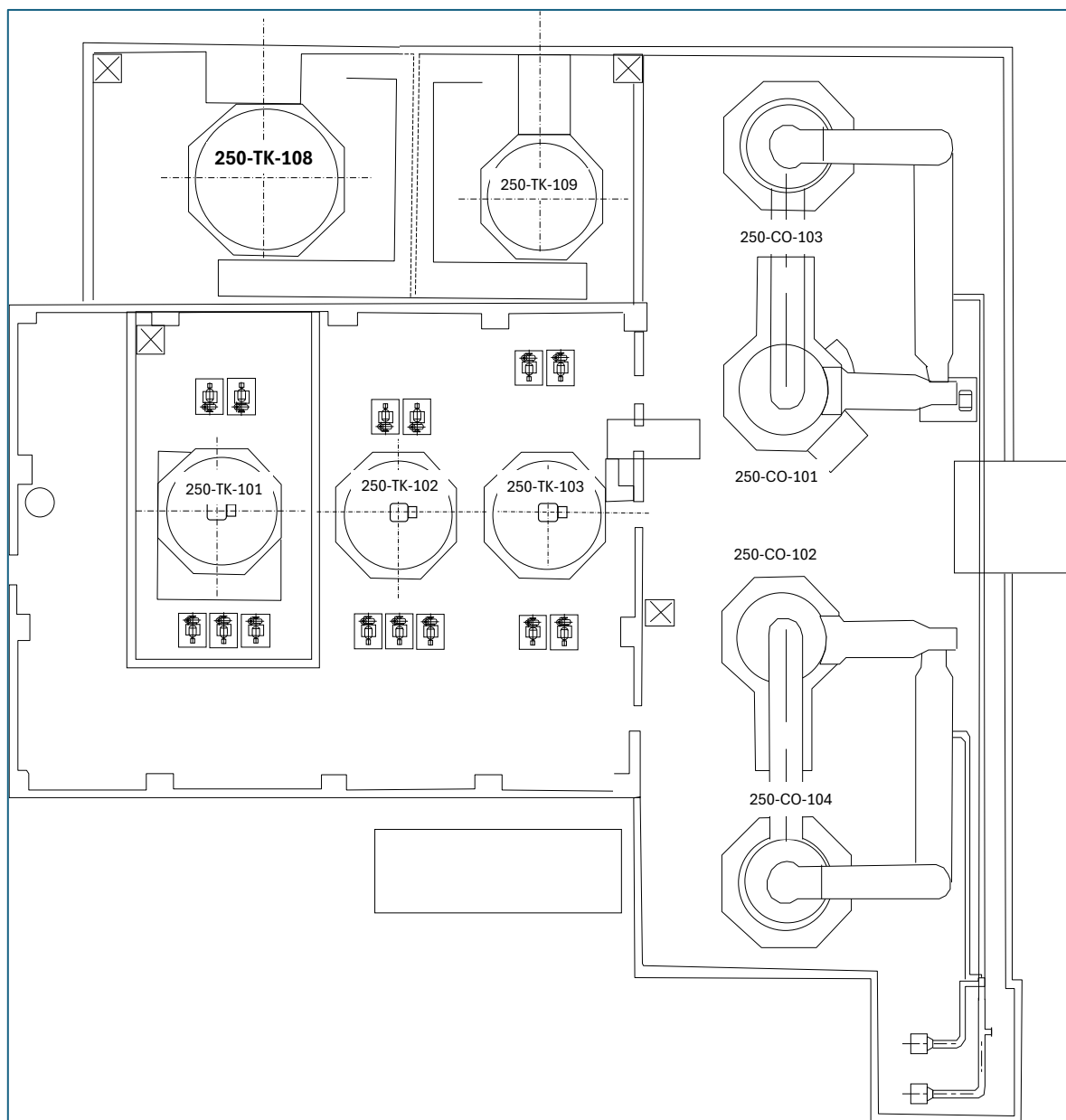


Figura 21: Esquema Layout Planta AVR Cerro Vanguardia

El estanque de acidificación (250-TK-101) recibe pulpa de relaves y ácido sulfúrico desde el estanque de almacenamiento de ácido sulfúrico (250-TK-108). Este estanque de almacenamiento de ácido sulfúrico aparece en diferentes documentos y planos de proceso con un volumen (sin especificación del tipo de volumen) de 62 m³. Sin embargo, al revisar el plano de diseño de UNIFIELD del estanque (250-TK-108) se observa que el volumen neto estimado, por el que escribe, es de aproximadamente 113 m³.

Como puede observarse, se repite la falta de consistencia entre los datos de geometría de un estanque de reactivo y el volumen neto de operación que puede estimarse a partir de las dimensiones del estanque.

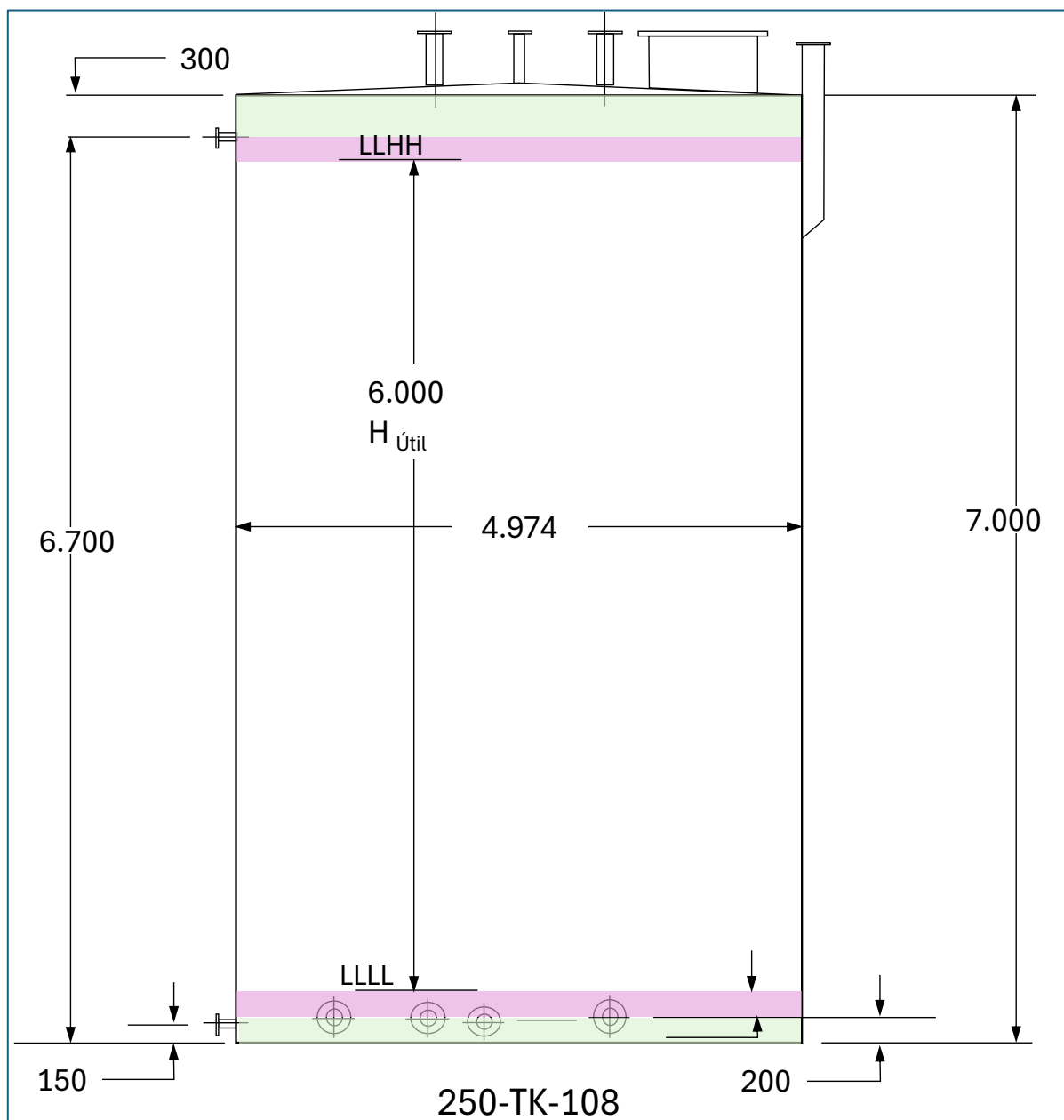


Figura 22: Esquema Estanque Almacenamiento Ácido Sulfúrico

La **Figura 23** muestra un diagrama P&ID desarrollado por el contratista UNIFIELD que diseñó la Planta de Recuperación de Cianuro del proyecto Cerro Vanguardia.

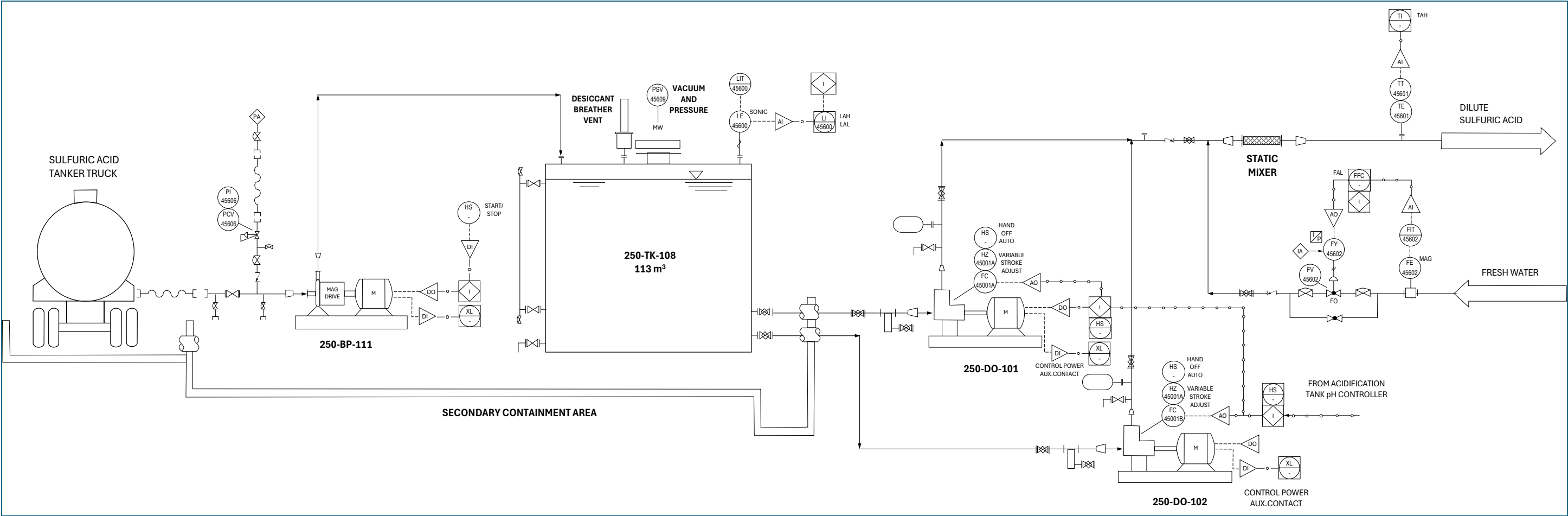


Figura 23: Esquema P&ID desarrollado por UNIFIELD

NH₃ Buffer Tank Proyecto PACMAN

El proyecto PACMAN desarrollado en Ontario, Canadá, tenía como objetivo producir materiales precursores para cátodos de ion litio para baterías de litio.

El proceso para la producción de materiales precursores de cátodos basado en metales tales como Níquel, Cobalto, y Manganeso, es uno de los posibles caminos para la fabricación de baterías basadas en el ion litio.

Dicho proceso incluye la coprecipitación de hidróxidos de Ni, Co, y Mn bajo estricto control de pH, atmósfera inerte, agitación controlada de gran potencia, y materiales base de gran pureza.

Aparte de la velocidad del agitador y la concentración de amoníaco, el pH es una variable crítica del proceso que determina la morfología y el tamaño de las partículas. Los reactores deben ser purgados con nitrógeno para eliminar el oxígeno.

Como la planta se ubicaría en la vecindad del lago Ontario y el retorno de aguas de proceso debería tener calidad bajo estrictas normas ambientales, era necesario, entre otras medidas, abatir casi completamente el amoníaco contenido en dichas aguas.

La recuperación del amoníaco se realizaría en columnas de “Stripping” con tecnología de calor suministrado con vapor para volatilizar el amoníaco, y posterior enfriamiento para su recuperación.

En la **Figura 24** se presenta un esquema simplificado del manejo de soluciones antes de la alimentación a las columnas de Stripping.

En esta sección no se pretende desarrollar una síntesis de todo el proceso de fabricación de materiales precursores de cátodos de baterías de litio. El objetivo de esta sección es destacar la forma de desarrollo de los planos P&ID de una empresa de Finlandia, que sirvieron de base para el proyecto PACMAN.

La **Figura 25** muestra un diagrama P&ID desarrollado en base a los P&ID's de Finlandia. Se observa que no se representan los transmisores y que, las señales de los elementos primarios, aparecen directamente como si ya hubieran llegado al Sistema de Control de Procesos y se estuvieran desplegando en las interfaces hombre máquina en sala de control.

Esta forma de desarrollar los diagramas P&ID's no sigue la norma ANSI/ISA 5.1 y no parece que durante el proyecto la disciplina de instrumentación y control hubiera hecho cuestión de este asunto. Por el contrario, defendieron este formato.

En otros proyectos desarrollados en Chile, en mi experiencia, los ingenieros de instrumentación y control automático son extremadamente rigurosos hasta la majadería. Por ejemplo, en un proyecto, se cuestionó en forma bastante exagerada que en el símbolo que representa un instrumento (globo con la nomenclatura ISA) la línea desde el globo con la indicación del tipo de instrumento, su tag y su formato de elemento en terreno, debería llegar cerca del elemento primario, pero sin tocarlo, porque se argumentaba que dicha línea no forma parte del circuito del instrumento y sus señales.

Un aspecto interesante de la forma de desarrollo de P&ID's de PACMAN, basados en la ingeniería Finlandesa, es que en los símbolos (globos enmarcados en un cuadrado), en la parte inferior bajo la raya del globo se hace referencia al equipo principal en la que el instrumento este asociado. Por ejemplo: TT001/TK01.

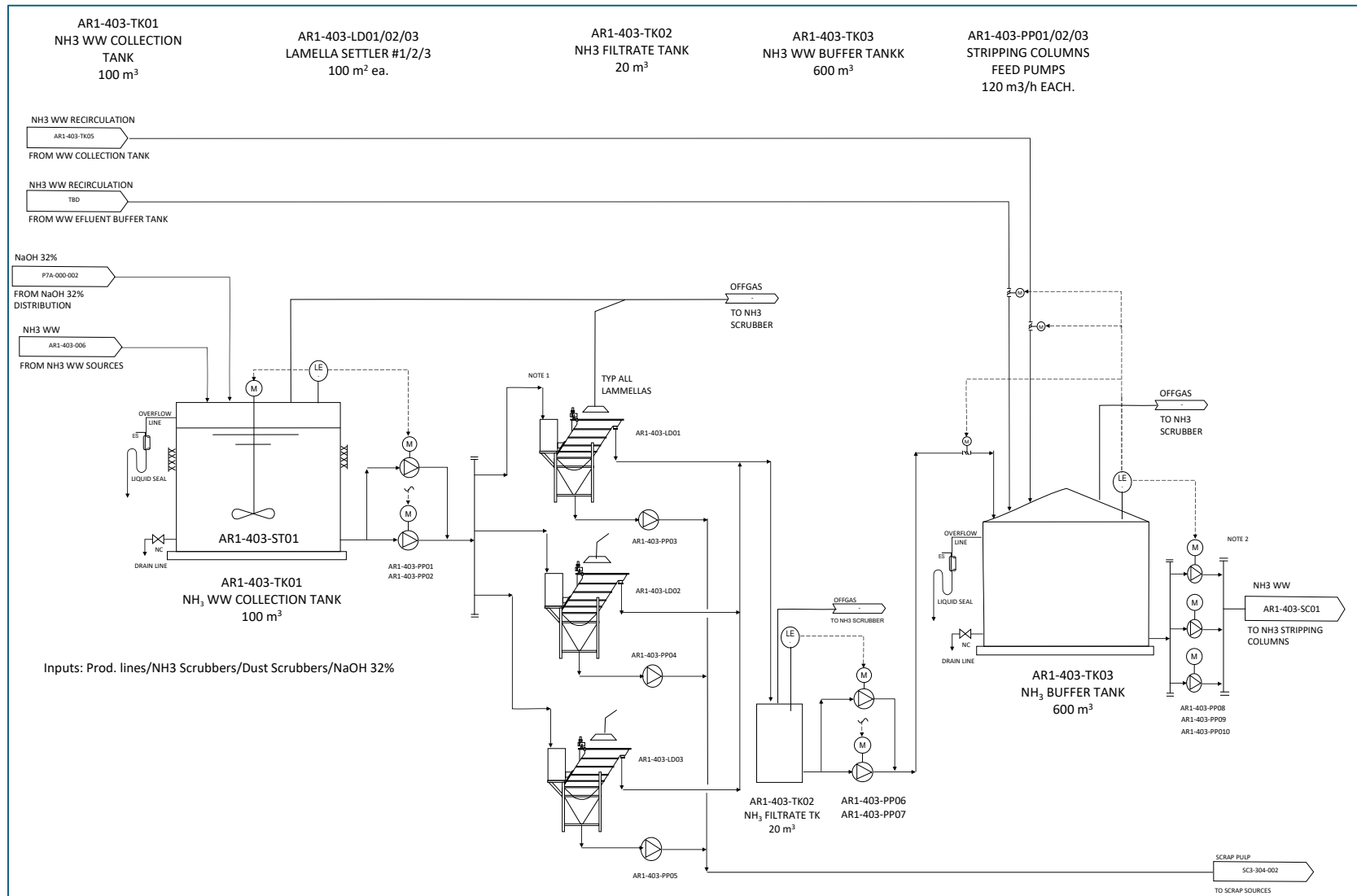


Figura 24: Esquema Circuito Preparación Soluciones antes de Torres de Stripping

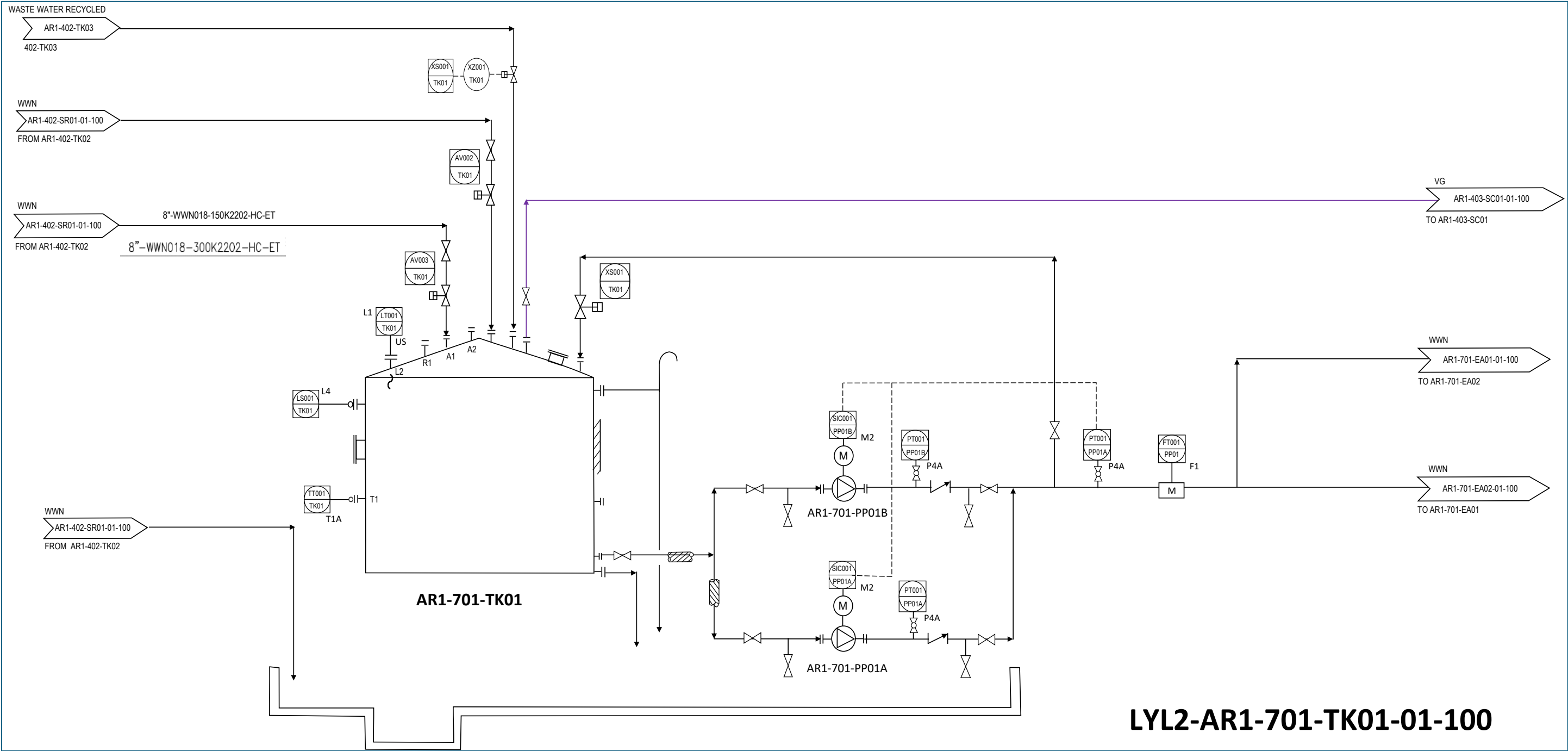


Figura 25: Esquema Simplificado P&ID Estanque AR1-701-TK01

Algunos Reactivos en Esperanza

El proyecto Esperanza consiste en una Planta Concentradora para procesar minerales sulfurados de cobre-oro, provenientes de la mina Esperanza, la cual se explota a tajo abierto.

El tratamiento de minerales sulfurados se realiza mediante molienda SAG y concentración por flotación, con tasas de tratamiento del orden de 95.000 t/d.

A continuación, se verá un caso de reactivo en que los datos del estanque de colector primario no son consistentes entre los documentos que lo definen.

Colector Primario Flotación Colectiva

El colector primario de Esperanza, tal como fue definido en la ingeniería de detalles, es Isopropil Etil Tionocarbamato, cuya densidad se estima en $0,92 \text{ g/cm}^3$. Como se sabe su suministro es en forma líquida en camiones cisterna, y el consumo definido en el criterio de diseño de procesos es de 11 g/t de mineral. El tiempo de almacenamiento definido de 30 días entrega un volumen de almacenamiento de $34,1 \text{ m}^3$.

En el P&ID del colector primario se menciona, sin aclarar el “apellido” un volumen de 55 m^3 , para el estanque de almacenamiento (332-TK-001). Suponemos, por tendencia en ingeniería, que se refiere a volumen neto de trabajo, o como se llama en términos usuales volumen vivo. En el mismo P&ID se señalan las dimensiones con un diámetro de 4,3 m y una altura de 4,3 m. Sin embargo, la memoria de cálculo estructural indica lo siguiente: Ver **Figura 27**.

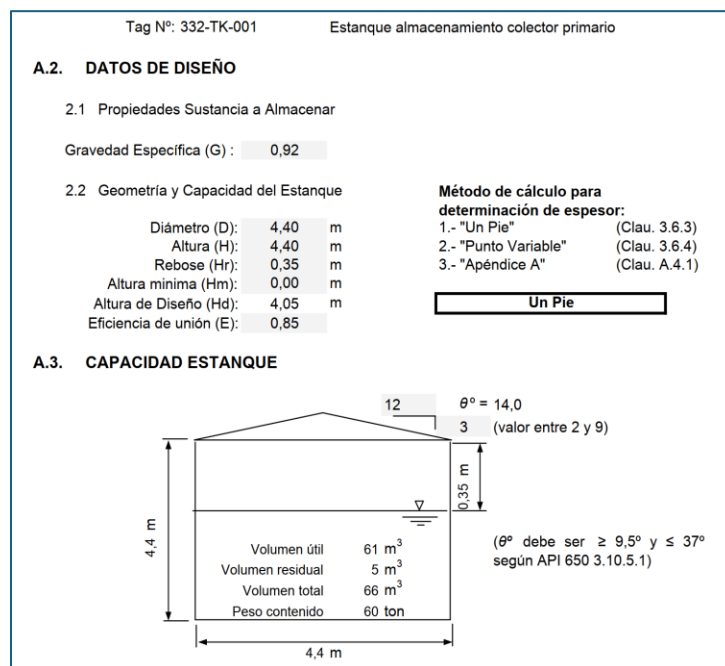


Figura 26: Esquema del Estanque 332-TK-001 en Memoria de Cálculo Estructural

El estanque 332-TK-001 se muestra en la **Figura 28**, donde se pueden observar las cotas. En estas condiciones se puede calcular que la altura no-útil es de apenas 0,5 m, para un volumen neto de 55 m^3 .

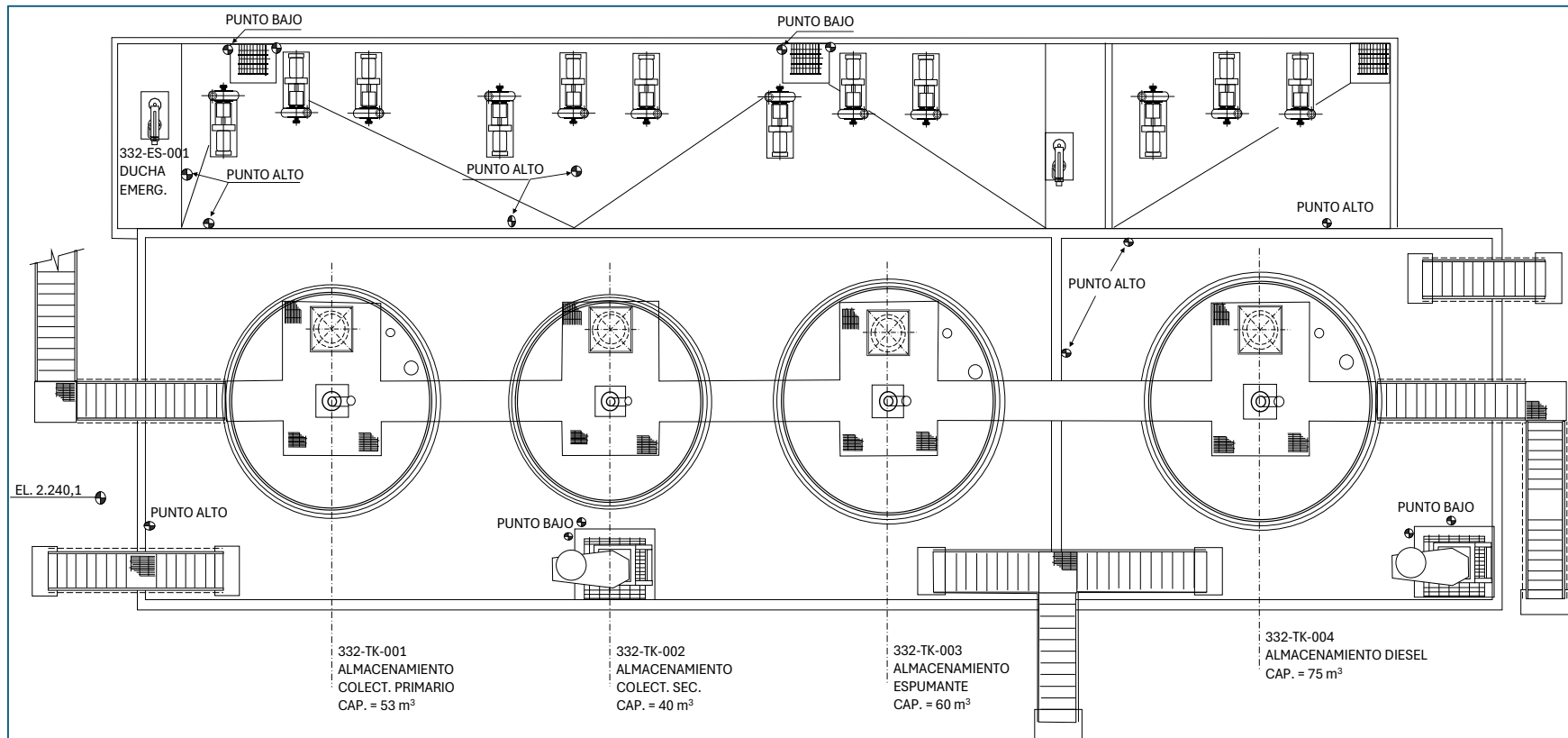


Figura 27: Esquema Estanques de Reactivos de Flotación Minera Esperanza

La **Figura 27** es un esquema simplificado, pero con datos reales del plano de Disposición General Planta Reactivos de Flotación (332-L-DW-003) Rev. 1, de la ingeniería de detalles con una revisión con la glosa “se levantan pendientes”. Se observa que el volumen mostrado para el estanque (332-TK-001) es de 53m³. Con este último volumen definido en el plano GA señalado, la altura no-útil aumenta de 0,5 a 0,7 m, lo que parece más coherente con definiciones de alturas de boquillas, sumergencia y revancha.

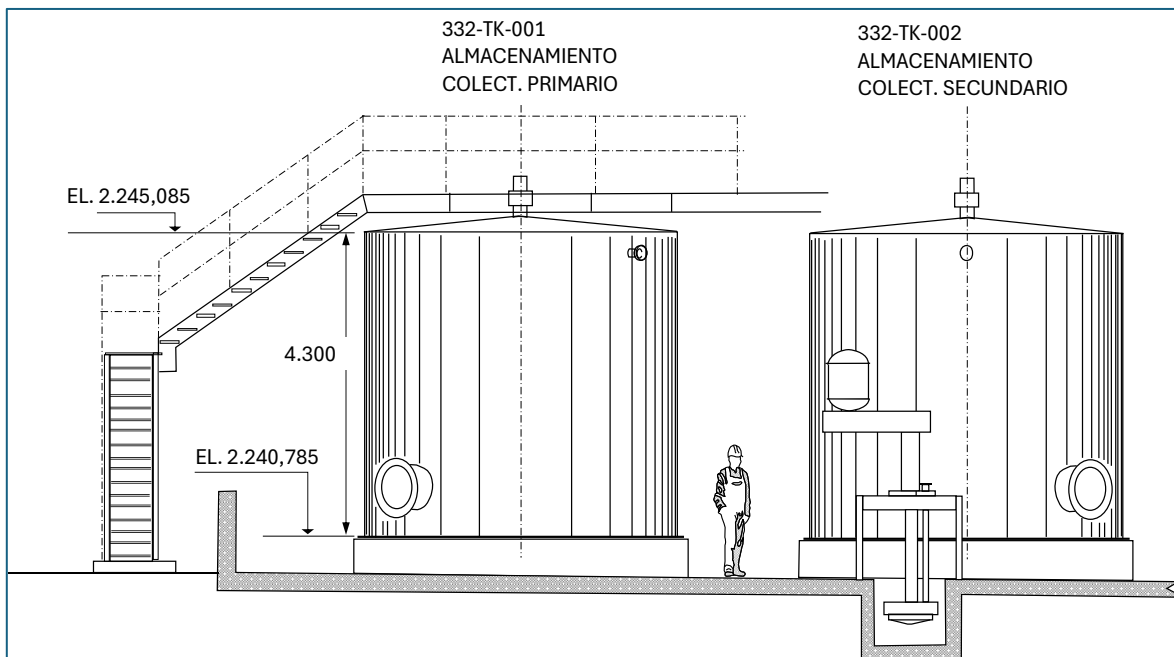


Figura 28: Esquema Disposición General Estanques de Colectores Esperanza

Las consideraciones de geometría mostrada en planos, dimensiones señaladas en distintos documentos, parecen mostrar inconsistencia que pueden no afectar la funcionalidad del estanque desde el punto de vista de procesos. Después de todo, se recuerda que ya se ha expresado que en minería se aplica “la química de balde”. Esto puede sonar una herejía para los ingenieros puristas, pero en la experiencia del que escribe, es un hecho de la causa.

Cada vez que la tecnología avanza, la ingeniería de diseño de plantas sufre un impacto considerable que requiere varios meses e incluso años para adaptarse a esa nueva tecnología. Actualmente con la metodología BIM se pretende lograr consistencia entre los documentos de ingeniería.

En los últimos proyectos en que el que escribe trabajó, no se observaba una mejoría en la calidad de los entregables, a pesar del esfuerzo para implementar la metodología BIM. Una posible causa de retrasos e inconsistencias en el desarrollo de una ingeniería se puede pensar en la falta de interés o capacidad de las gerencias de área, gerencia de ingeniería, e incluso gerencia de proyecto en, falta de “awareness” en la importancia de la emisión a tiempo y con la calidad adecuada de los planos P&ID’s. Si se me perdona la forma personalizada de la opinión siguiente, he estado involucrado en más de un proyecto en los últimos años, en que toda la atención gravita fuertemente alrededor del modelo y se invierten muchas horas en su revisión, incluso antes de tener totalmente definidos la especificación para “tageo” de equipos mecánicos, emisiones relativamente maduras de los PFD y la carencia de planos P&ID’s en un estado relativamente funcional, sobre todo para las etapas formales de verificación de avance del proyecto.

La tendencia de limitar el costo de la ingeniería en el desarrollo de los proyectos, como se observa en la insistencia de los clientes en solicitar plazos cada vez más cortos, para las etapas de ingeniería, se traduce no solamente en ingenierías de poca calidad, sino lo peor: en grandes gastos (overrun) en construcción, montaje, comisionamiento y puesta en marcha.

En los trabajos publicados en seminarios y otros encuentros profesionales, es impensable una presentación honesta al final de la ingeniería y construcción de un proyecto, porque se aplica la norma no escrita de ser “políticamente correcto”, también en el sentido técnico o de administración de proyectos.

Algunos Reactivos en Antamina

Antamina es una concentradora de cobre, zinc, molibdeno y bismuto. La planta trabaja por campañas y el bismuto lo separan con el mismo circuito para flotación diferencial de molibdenita (en campañas diferentes).

Una mezcla compleja de minerales sulfurados presenta un desafío para la separación por flotación. Por esta razón la cantidad de reactivos en esta concentradora es mayor que en otras concentradoras.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron treinta y siete campañas de planta piloto con un total de 340 toneladas de material. Para efectos de minería y metalurgia el depósito se agrupó en seis tipos de minerales:

- Solo Cobre bajo Bismuto.
- Sólo Cobre alto Bismuto.
- Cobre-Zinc bajo Bismuto.
- Cobre-Zinc alto Bismuto.
- Bornita bajo Zinc.
- Bornita alto Zinc.

Para la tarea de molienda se definió un P_{80} de 150 micrones para todos los minerales que producen solo concentrado de cobre.

Para minerales que producen concentrados separados de cobre y de zinc la tarea de molienda se definió para un P_{80} de 100 micrones.

El proyecto original fue desarrollado por Bechtel en el año 1999. En octubre de 2001 el proyecto alcanzó producción comercial con alrededor de 80% de las 70 kt/d de diseño. Aunque la capacidad nominal fue definida para 70 kt/d de mineral, en realidad esta capacidad alcanzaba hasta 100 kt/d para minerales disgregados de baja competencia. La planta de molienda incluyó, antes de la ampliación, un molino SAG de 38 pies de diámetro por 19 pies EGL, con accionamiento GMD de 20,1 MW, cuyo bajo tamaño del trommel alimentaba a tres molinos de bolas de 24 pies de diámetro por 33,5 pies EGL con accionamiento GMD de 11,2 MW de potencia cada uno. Al inicio no se contempló chancado de pebbles y se implementó el cañón de agua que empuja los pebbles de vuelta hacia el interior del molino SAG.

Posteriormente la empresa Aker Solutions desarrolló una ampliación a 130 kt/d agregando un segundo molino SAG y un cuarto molino de bolas. Otras modificaciones fueron incorporadas en la ampliación, incluyendo nuevas celdas de flotación de molibdenita y de flotación de cobre. El circuito de molienda incorporó un molino SAG de iguales características que el molino SAG original, y con un accionamiento de 20,1 MW, pero este motor de anillo fue adquirido a Siemens en vez de ABB empresa que proporcionó los accionamientos de la primera fase. El molino de bolas agregado en la expansión también del mismo tamaño que los originales, con accionamiento de igual potencia, pero el GMD de Siemens en vez de ABB.

No se dispone de toda la información, pero el cambio de accionamientos “Gearless” desde ABB a Siemens pudo deberse a tres fallas del estator del SAG en cuatro meses. Un empleado de ABB en Chile comentó que posteriormente se mejoró el sistema de último disparo de los tiristores durante un descenso de voltaje de la línea de Antamina. Un disparo de los tiristores habría provocado fuerzas laterales (acontecimiento en Escondida). El argumento fue que la

línea de 300 km y muy frágil, al bajar la tensión, la corriente aumentaba, lo que llevó a un cambio de diseño para desconectar el accionamiento al 85% del voltaje.

La **Figura 29** presenta un esquema simplificado que permite apreciar la expansión de la planta de molienda de Antamina.

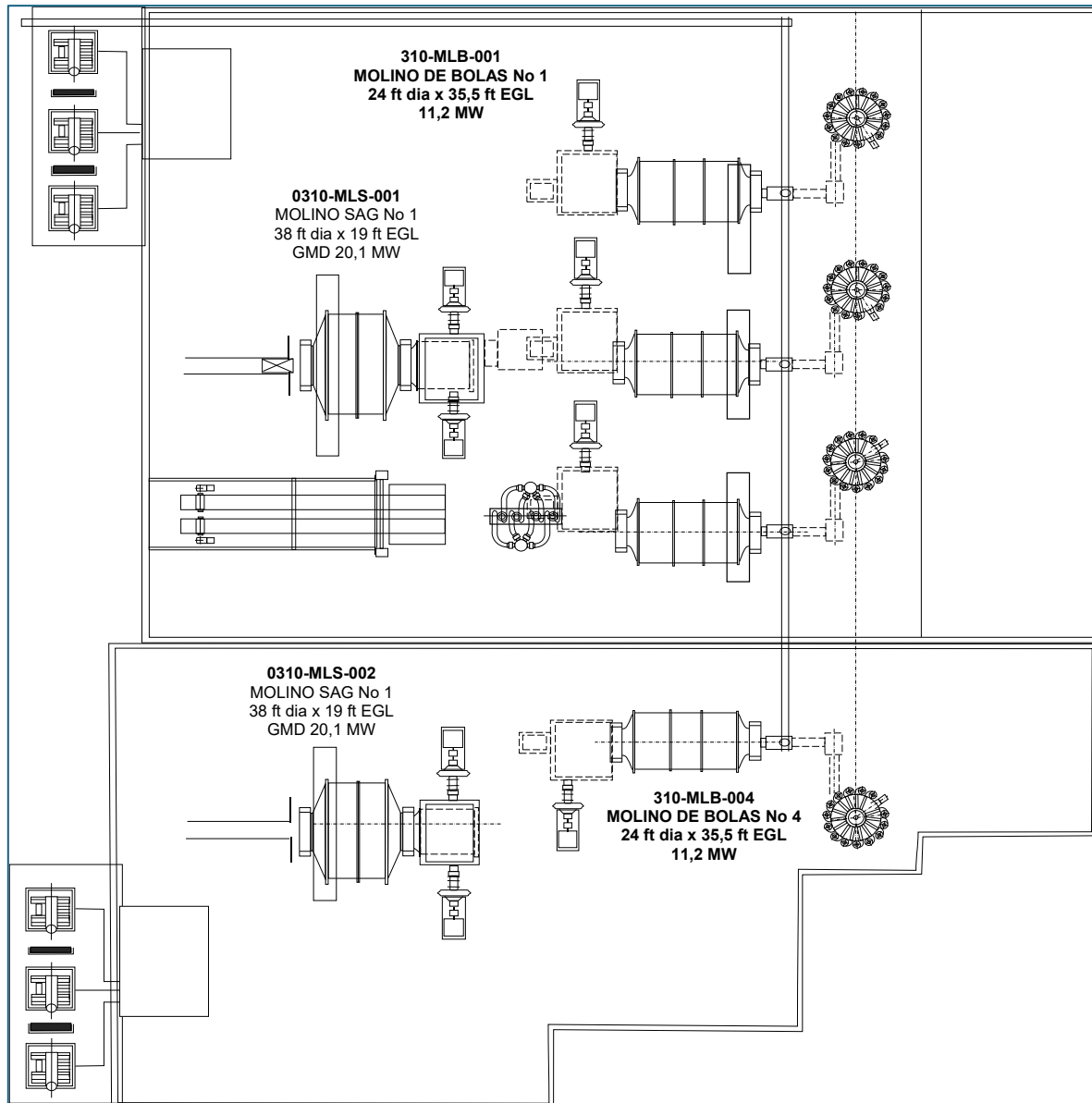


Figura 29: Esquema Circuito ampliado de Molienda Antamina

El sistema de distribución de pulpa desde los molinos SAG hacia los molinos de bolas se rediseñó completamente. El diseño Bechtel contemplaba distribución de pulpa desde el bajo tamaño del trommel del SAG hacia los cajones de descarga de los molinos de bolas mediante canaletas.

Problemas de embancamiento de las canaletas influyó en cierto modo para un diseño diferente. El nuevo diseño utiliza estanques presurizados trabajando con alimentación

mediante bombas centrífugas y cajones atmosféricos que reciben desde los estanques presurizados.

La **Figura 31** muestra los estanques presurizados de distribución de pulpa desde los molinos SAG hacia los molinos de bolas.

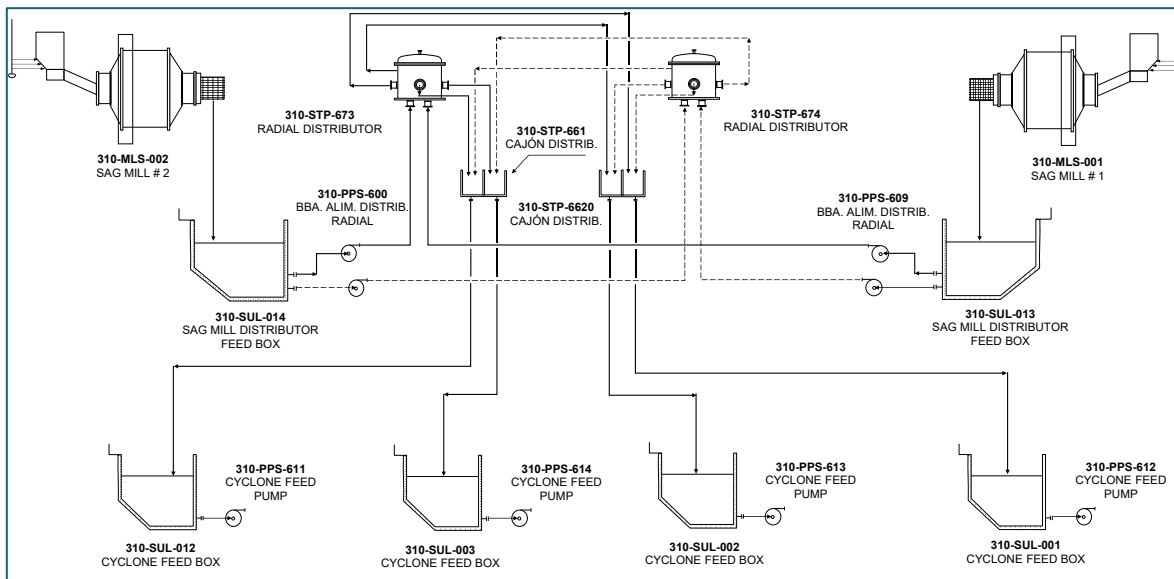


Figura 30: Esquema Circuito Estanques Presurizados

Como se adelantó, en forma muy somera, en el inicio de esta sección, dada la complejidad de los minerales que trata Antamina, se requieren un número superior de reactivos que en una concentradora típica que utiliza flotación para minerales de cobre.

En este apartado no se agotará, ni mucho menos, todo el tema de los reactivos utilizados en la concentradora Antamina. Más bien será un viaje turístico destacando solamente algunos aspectos que a juicio del autor merecen algún comentario.

Muchos de los reactivos usados en la concentradora Antamina no serán mencionados ya que resultaría un aumento muy considerable del alcance de este trabajo. En general, algunos reactivos son suministrados en formato líquido en camiones cisterna, otros en formato de pellets sólidos que deben ser disueltos en agua, por ejemplo, cianuro de sodio (NaCN), xantatos (SIPX) y (PAX), floculantes, un colector 3418A es entregado en forma líquida en contenedores, y la cal (CaO) cómo sólido granular despachado en camiones del tipo de los que transportan cemento a granel.

En la **Figura 31** se observa un esquema en planta que muestra los estanques de almacenamiento de algunos reactivos suministrados en forma líquida. De izquierda a derecha se observan los estanques de recepción y almacenamiento de: Fuel Oil (0390-TKF-068) colector de moly, MIBC (0390-TKF-185) espumante tipo Metil Isobutil Carbinol, Dowfroth (0390-TKF-111) espumante, 3418A (0390-TKF-114) colector, y un estanque de mezcla (dilución con agua) de sulfhidrato de sodio (0390-TKF-064) y estanque de recepción y almacenamiento de sulfhidrato de sodio concentrado a 42% en peso (0390-TKF-081).

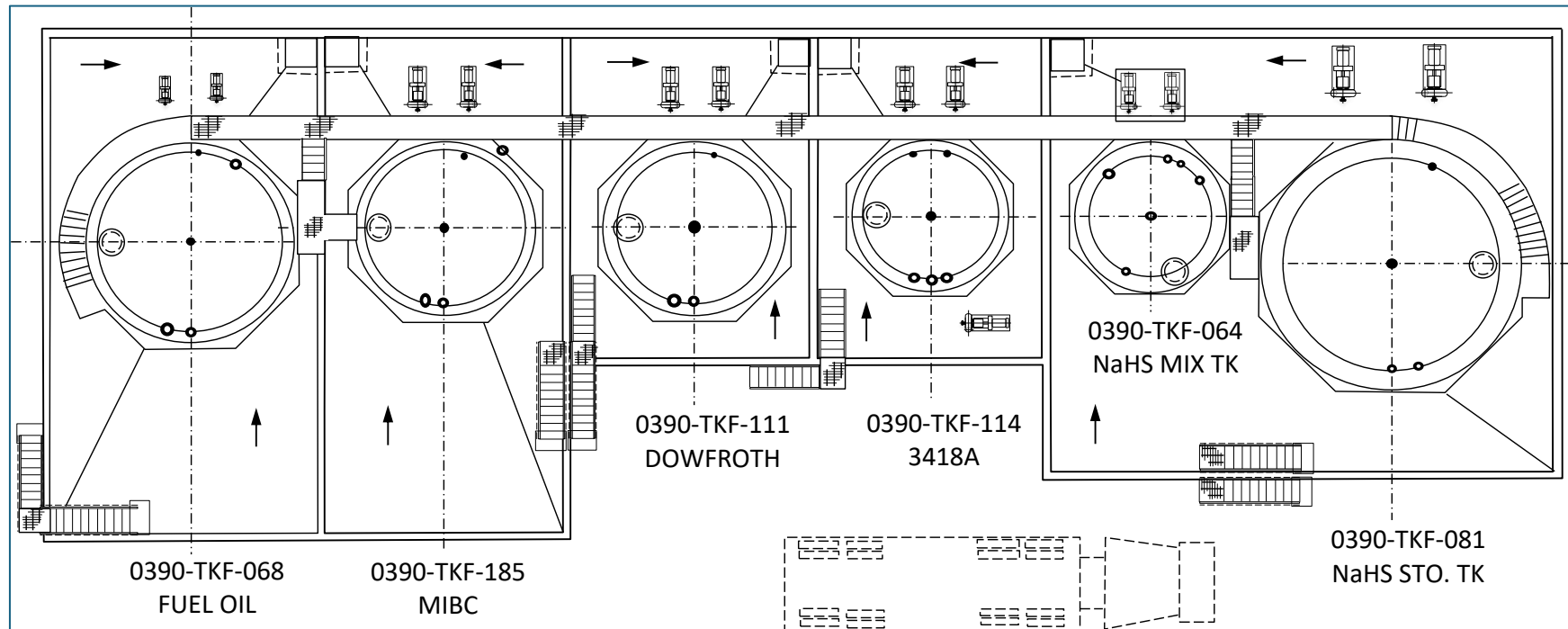


Figura 31: Esquema Estanques de Reactivos Antamina

La **Figura 32** muestra una foto de los estanques representados en la **Figura 31**. En este caso, todos los estanques mencionados en el párrafo anterior, tienen muretes de aislación o contención individuales en caso de derrames, salvo el caso del sulfhidrato de sodio en que ambos estanques comparten un área con muretes perimetrales comunes.



Figura 32: Fotografía Estanques de Reactivos Antamina

Fuel Oil Flotación Selectiva

Aunque el Fuel Oil se usa como colector para la molibdenita, es común agregar este reactivo en la flotación colectiva, es decir antes de la flotación selectiva de la moly.

En Antamina, datos de 2006, indican que el Fuel Oil se dosificaba en los siguientes puntos: Chute molino SAG (dos puntos), Cajón distribuidor descarga del SAG, underflow hidrociclones molinos de bolas, Alimentación Scavenger Cu, Colas Scavenger Cu, 2ª limpieza de Cu, estanque de acondicionamiento flotación Bi/Mo.

La recepción del Fuel Oil se realiza en descarga desde camión cisterna en el estanque de almacenamiento (0390-TKF-068) de 166 m³ de capacidad neta según el P&ID. En la **Figura 33** se presenta un esquema simplificado del estanque de almacenamiento de Fuel Oil. El consumo nominal declarado en documento de 2006 indica 35 g/t de mineral.

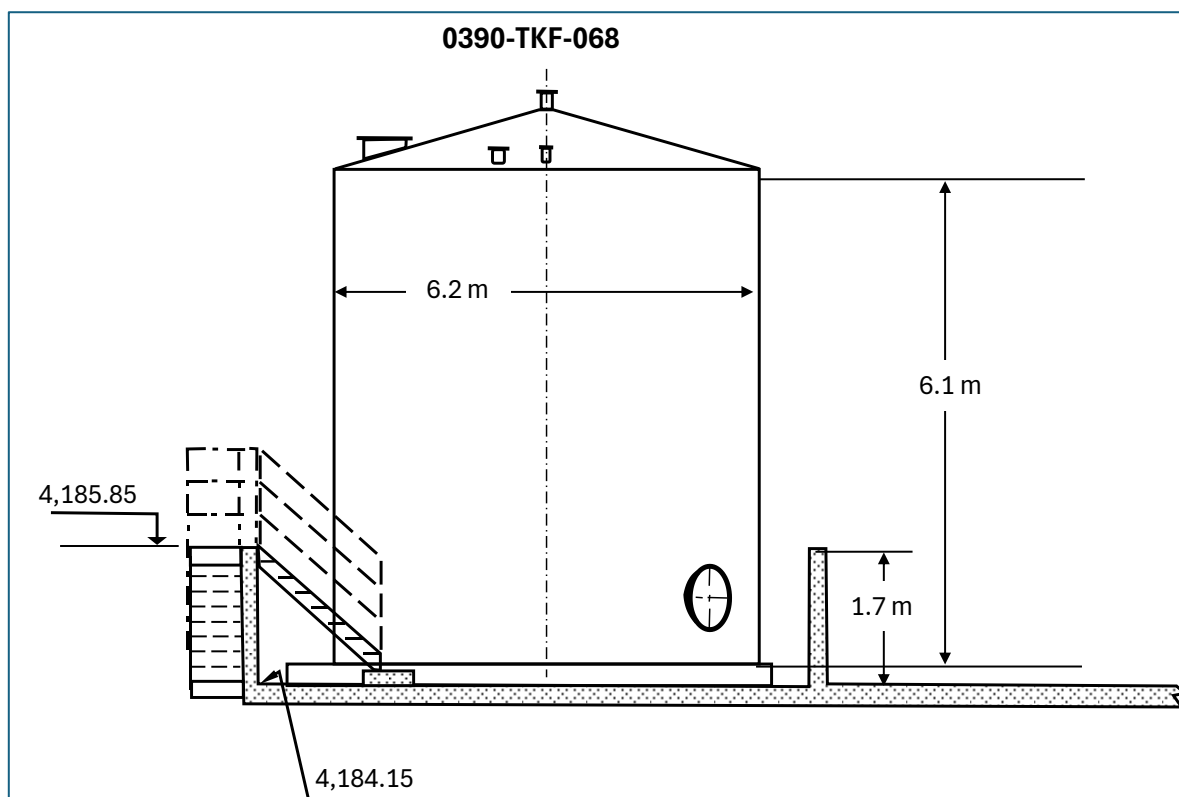


Figura 33: Esquema Estanque Almacenamiento de Fuel Oil

Estanques de Dosificación de Reactivos

Dado que el diseño de la concentradora Antamina es de la década de alrededor de 2001, el sistema de dosificación es bastante singular. En la **Figura 34** se presenta un esquema con estanque de fondo cónico que permiten observar el flujo de reactivos, así como tomar muestras.

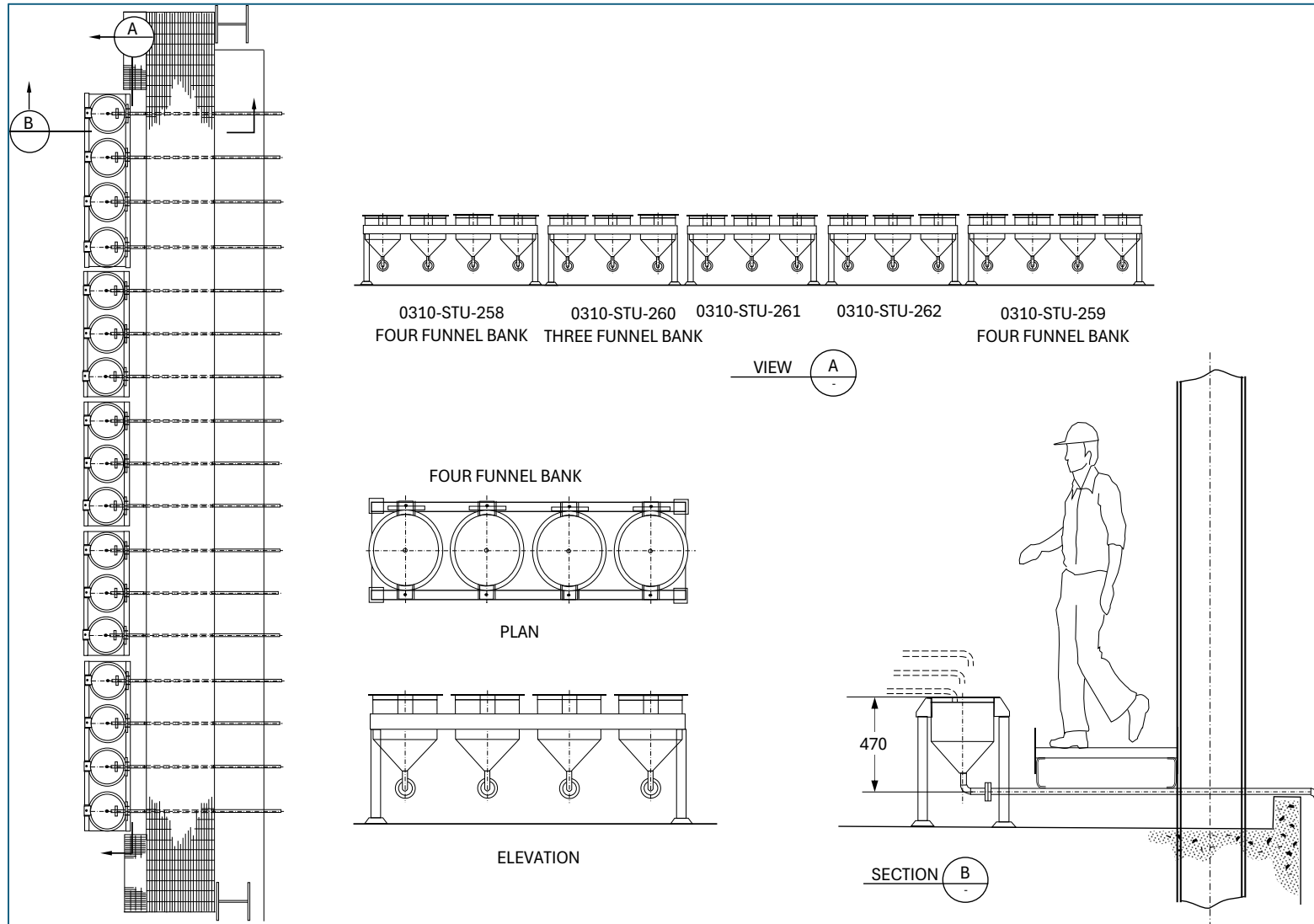


Figura 34: Esquema Estanque de Fondo Cónico Dosificación de Reactivos

Cianuro en Flotación de Cobre-Zinc en Antamina

El circuito de flotación presenta primero las celdas rougher de flotación de cobre, y desde las colas de este circuito, se pasa al circuito rougher de flotación de zinc.

En la flotación de cobre-zinc, el Cianuro de Sodio (NaCN) se usa como un depresor selectivo, para deprimir la pirita y otros sulfuros de hierro en la etapa de flotación de cobre, permitiendo que los sulfuros de cobre floten preferentemente. En la flotación de cobre también se usa sulfato de zinc (ZnSO_4) junto con el cianuro de sodio como un sistema depresor combinado.

El sulfato de zinc actúa como depresor al saturar la superficie de la esfalerita (ZnS) con iones de zinc. Esto ayuda a prevenir la activación no deseada del mineral de zinc por iones de cobre disueltos en el agua de proceso, lo que de otro modo haría que la esfalerita flotara prematuramente con los minerales de cobre.

El cianuro complementa esta acción al formar complejos solubles estables con los iones de zinc presentes en la superficie del mineral ($\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{CN})_4]$), lo que ayuda a mantenerlos pasivados e impide su interacción con los colectores de flotación. También ayuda a deprimir la pirita (FeS_2).

El consumo nominal de NaCN es de 200 g/t de mineral. Este reactivo es suministrado en maxisacos de 1.000 kg en forma de briquetas duras casi sin polvo. Las briquetas deben disolverse en agua a pH alcalino para evitar la formación de gas cianhídrico (HCN), el cual es venenoso y mortal en concentraciones sobre 100 ppm (fatal en 0,5 – 1 hora). Sobre 300 ppm es rápidamente fatal. La conversión de NaCN en solución acuosa presenta un equilibrio con el gas HCN en función del pH de la solución. A un valor de pH de 9, el 50% del cianuro está en la forma de gas cianhídrico. Se debe trabajar este reactivo en soluciones de pH sobre 10,5.

En la **Figura 35** se presenta un esquema simplificado de un P&ID de preparación de soluciones de cianuro del proyecto Antamina. Se observan sensores y un texto cercano al símbolo AE-8134, donde la letra “A” representa, como se sabe, en primera posición, un analizador o detector, y es un elemento primario comunicado por señales tanto con sirenas como despliegue en sala de control en caso de falla. El texto es el siguiente: “3 HCN detectors located inside the building above Tanks and pumps”, es decir se cuenta con tres detectores dentro del edificio de preparación de soluciones de NaCN .

Las soluciones se preparan a una concentración en peso de 20%, en el estanque de mezcla de NaCN (0390-TKF-057). Este estanque con un diámetro de 3,9 metros y una altura de cilindro de 4,9 metros tiene una capacidad total de 59 m^3 y una capacidad neta de 50 m^3 . El estanque de almacenamiento de soluciones de cianuro (0390-TKF-059) tiene un volumen neto de 73 m^3 .

En un documento de Antamina del año 2006 se declara que el NaCN se dosifica en los siguientes puntos: Chute Molino SAG (dos puntos), primera celda Scavenger Cu, 3ª celda Scavenger Cu, cajón alimentación molinos remolienda Cu, 1ª celda rougher Bi/Mo, 2ª celda rougher Bi/Mo, 5ª celda rougher Bi/Mo, 6ª rougher Bi/Mo, 9ª celda rougher Bi/Mo.

En el circuito de flotación diferencial de Bi/Mo se utiliza, ya sea para el bismuto o para el molibdeno, dependiendo del mineral de la campaña de flotación que se usa.

Tanto el estanque de mezcla de NaCN como el de almacenamiento están en un edificio separado y dedicado.

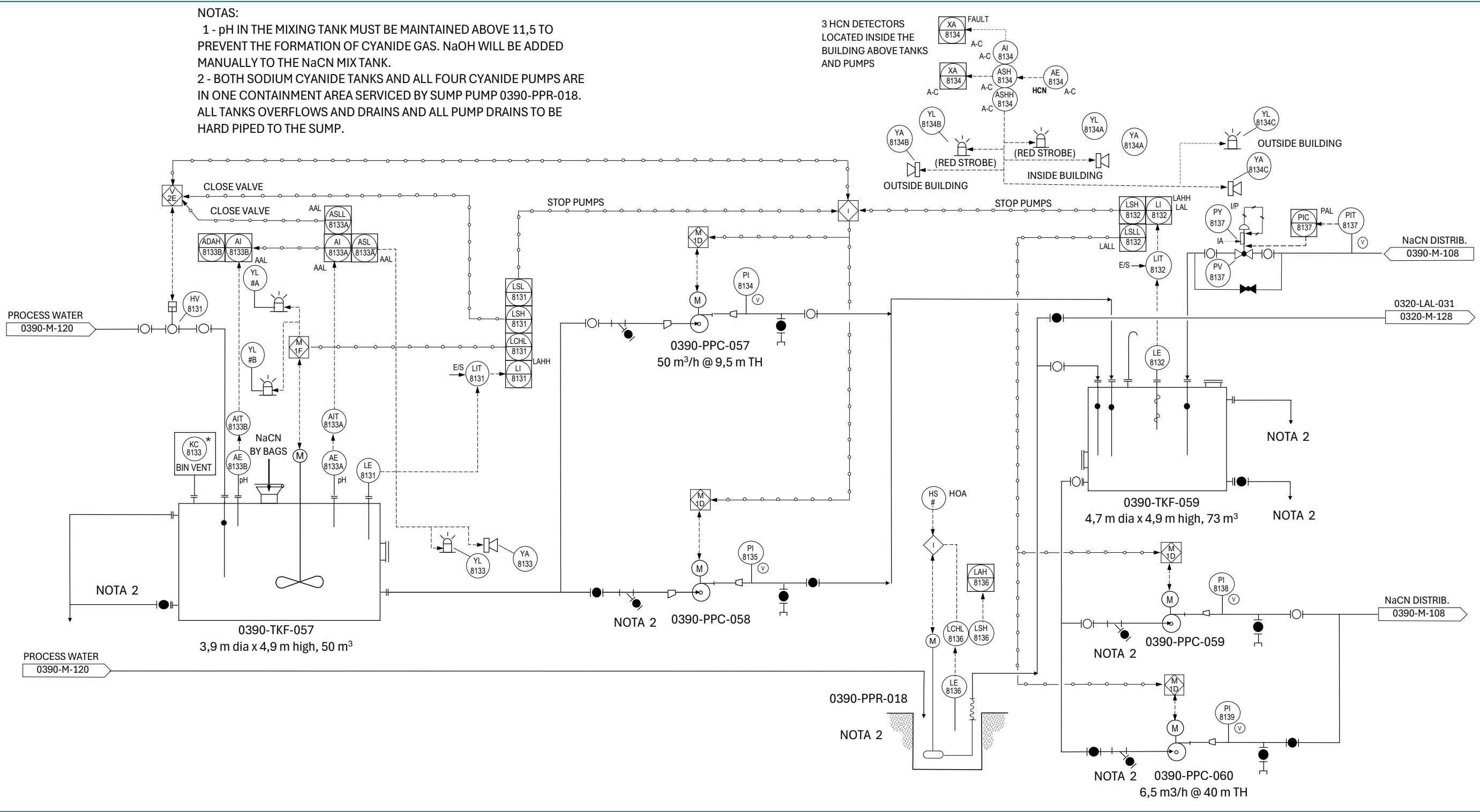
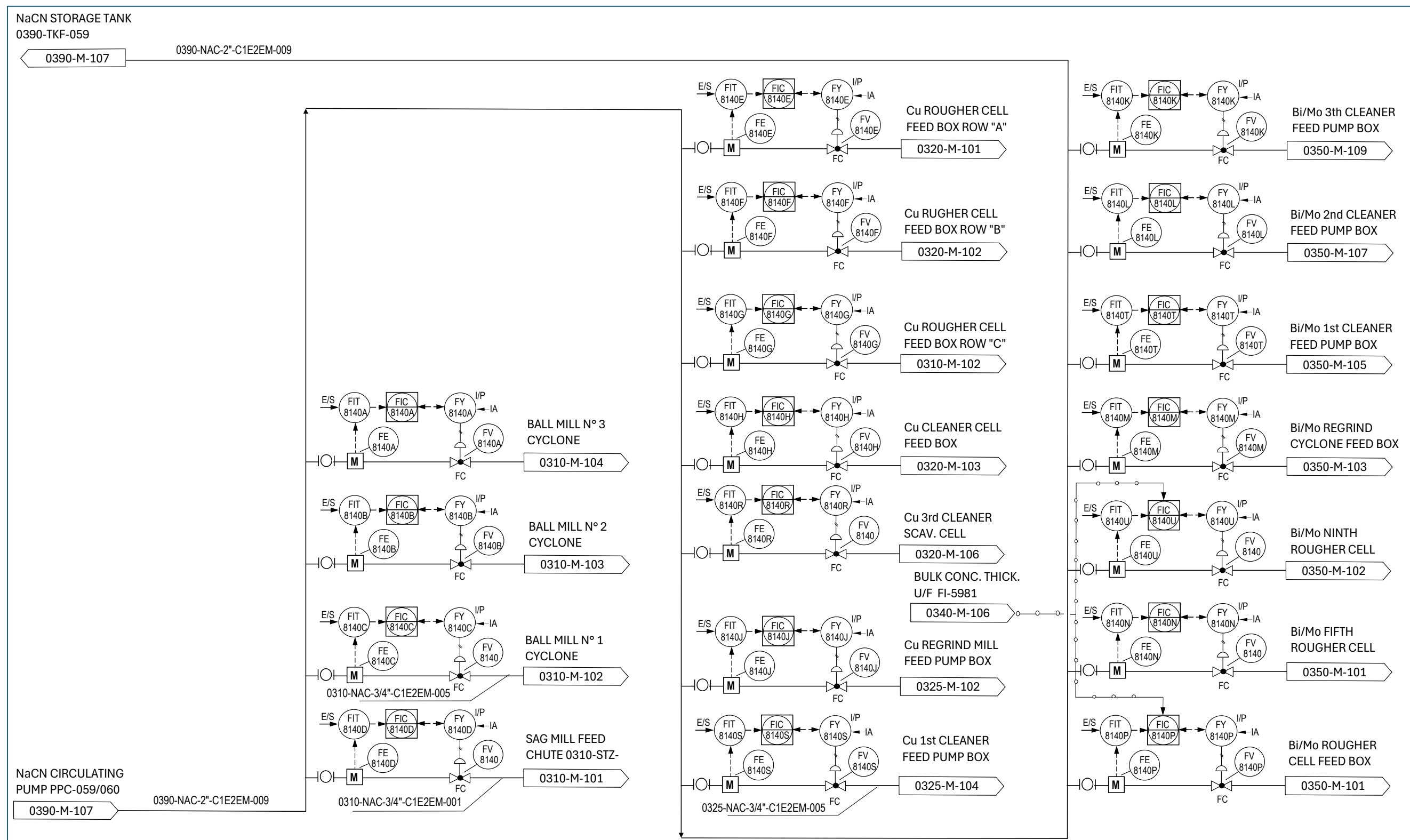


Figura 35: Diagrama P&ID Preparación de Cianuro Antamina



Control de pH con Dosificación de MOL⁷ en Antamina

Como en todas las concentradoras el control de pH, necesario para la flotación en ambiente alcalino y para deprimir la pirita, se realiza mediante la adición de cal en la forma de una pulpa de cristales de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Como el hidróxido de calcio tiene una muy baja solubilidad en agua, la cal hidratada con agua formando una pulpa de cristales sólidos y núcleos no reaccionados (grit)⁸, se disuelve al ser dosificada en un volumen mayor de agua de la pulpa que se quiere regular en pH. Esta pulpa se denomina “Milk of Lime” (MOL) en jerga de ingeniería y normalmente se traduce como lechada de cal.

Esta lechada de cal presenta un pH de al menos 12, lo que la convierte en una solución saturada altamente incrustante. Esto se maneja mediante varias estrategias:

- Circuitos duplicados en lazo cerrado de cañerías que recorren la planta en los lugares cercanos a los puntos de adición.
- Estos lazos deben tener un punto alto para el retorno por gravedad de la lechada de cal hacia los estanques de almacenamiento, para evitar que las cañerías queden llenas de lechada de cal.
- Como se trata de una pulpa normalmente se especifica una tasa de recirculación por el lazo activo de alrededor de 300 a 500%. Esto para asegurar una velocidad de por lo menos 4 m/s de manera de utilizar los sólidos de la pulpa de lechada como elemento abrasivo que mantenga las cañerías sin incrustaciones de carbonato de calcio.
- Al detener un lazo, se lava con agua y se pone en servicio el lazo duplicado.
- En algunos diseños se sacan los arranques finales en los puntos de dosificación desde la parte superior de la matriz del lazo para que el arranque sea auto drenante.

La cal viva se suministra normalmente a granel, en camiones silo, tipo aquellos que transportan cemento. La descarga del camión se realiza neumáticamente, por lo general en régimen de fase diluida, es decir, con baja presión y alto flujo. Es raro, pero existe la alternativa de descarga y transporte de cal sólida desde el camión hacia el silo, en régimen de fase densa, es decir alta presión y bajo flujo.

Por lo general todo el sistema de recepción, almacenamiento, y apagado de cal se adquiere como un paquete a un proveedor capaz de dicho suministro. El silo de almacenamiento de cal sólida es el componente más caro y el apagador de cal puede ser un molino de torre o un “paste slaker” que es un equipo que produce desecho sólido después del apagado. Esta es una clara ventaja del molino para apagado, ya que evita el manejo de los sólidos que se producen con apagadores de otro tipo.

La **Figura 37** presenta un esquema del sistema de apagado de cal de Antamina. Notar que en el diseño se considera un murete de baja altura para contención de derrames de lechada de cal.

⁷ En jerga de algunos proyectos (casi todos en los que he participado), se denomina a la pulpa-solución de cal viva apagada con agua, como “Milk of Lime” (MOL), denominación que irritaba a un gringo que fue mi jefe en un proyecto de oro. Este gringo de nacimiento británico había trabajado en muchos países del mundo y hacía mofa de este nombre para la lechada de cal.

⁸ En jerga en inglés se denomina “grit” a los núcleos no reaccionados del óxido de calcio (CaO) que durante la calcinación del carbonato de calcio (CaCO_3), no alcanzaron su completa conversión, dejando un núcleo de carbonato de calcio que no reacciona con el agua de manera similar al CaO .

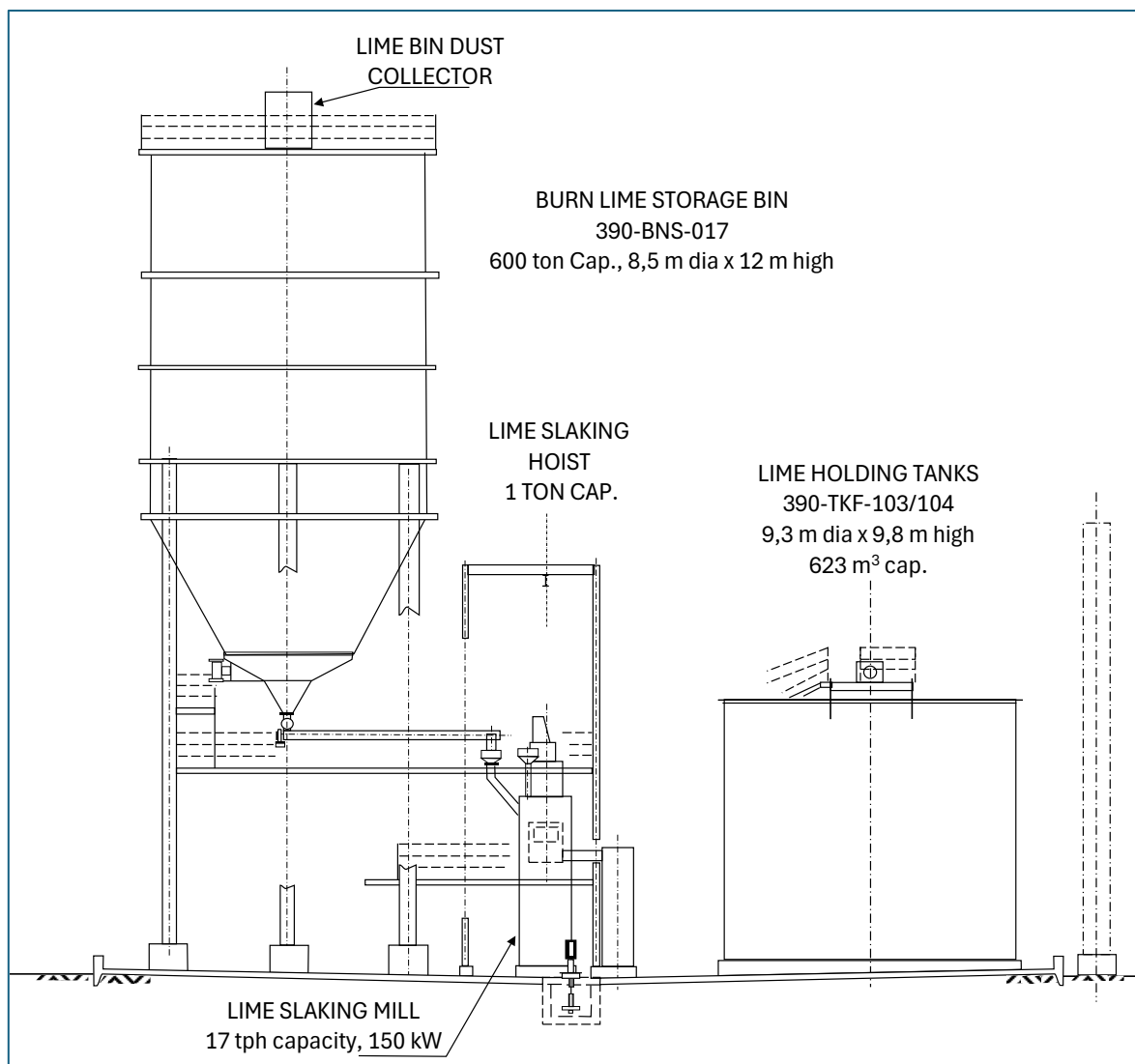


Figura 37: Silo, Molino de Torre y Estanques de Almacenamiento de MOL Antamina

La **Figura 38** muestra dos esquemas simplificados de instrumentación y control de la recirculación de lechada de cal y de la dosificación de lechada al molino SAG.

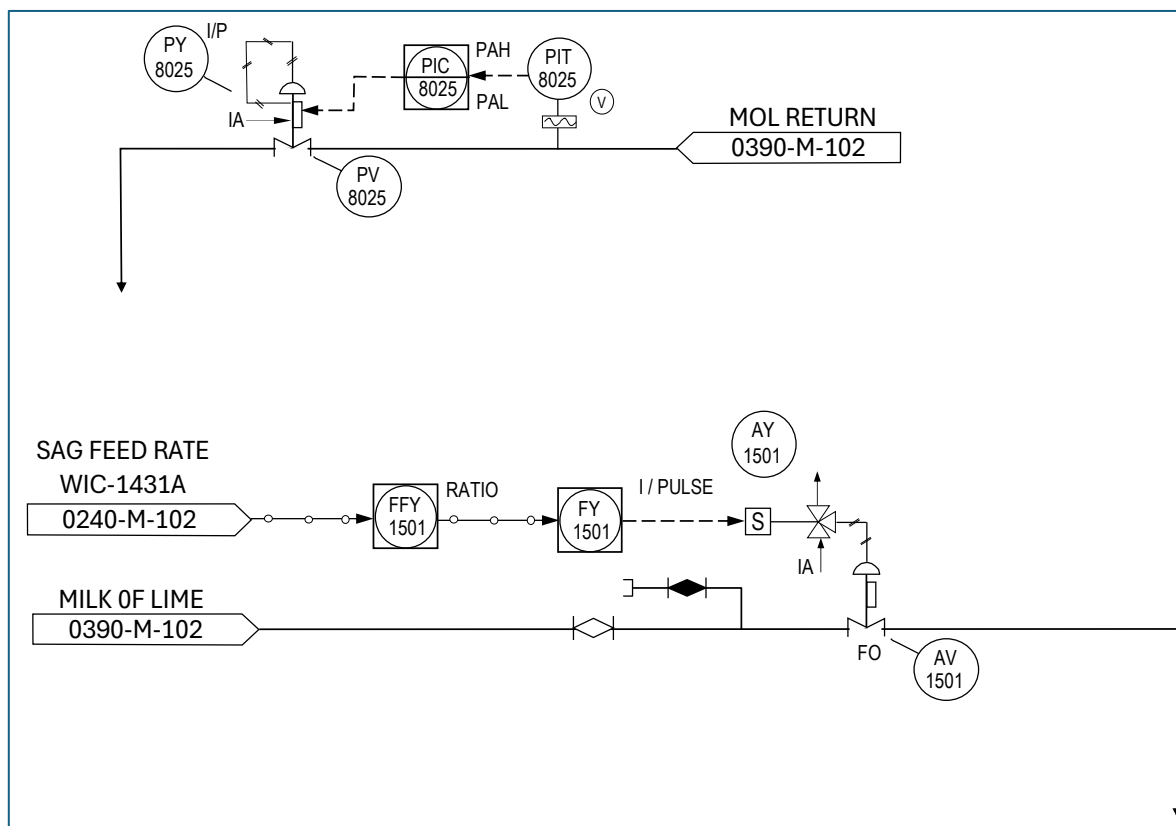


Figura 38: Esquemas de Instrumentación y Control Circuito de MOL

En el esquema superior de la **Figura 38** se representa el retorno de una de las cañerías que recorre la planta y regresa al estanque de almacenamiento de lechada de cal. Se observa que un PIT (Pressure Indicator Transmitter) entrega una señal de presión de la línea de retorno y un PIC, el cual controla la presión en el retorno mediante válvula de control modulante.

En el esquema inferior de la **Figura 38** se representa una línea de alimentación de MOL al chute del molino SAG. Se trata de un control de razón mediante la señal del pesómetro de mineral que ingresa, y la cantidad de lechada que se debe agregar según el estudio metalúrgico del consumo estimado de cal. Esto se ajusta con el set point de la razón que ingresa el operador de sala de control en el Sistema de Control de Procesos de la planta. La modulación de la válvula tipo pinch se realiza en frecuencia de pulso o en longitud⁹ de pulso.

La **Figura 39** muestra un esquema de arranque de una cañería desde la matriz que recorre la planta hacia un punto de dosificación de MOL. Se observa que dicho arranque sale por la parte superior de la matriz.

⁹ La modulación en longitud de pulso se puede programar, por ejemplo, para que durante 20 segundos la válvula pinch permanezca cerrada por 10 segundos y abierta por los siguientes 10 segundos. Esto debe calibrarse para lograr una dosificación que sea funcional al objetivo de control de pH.

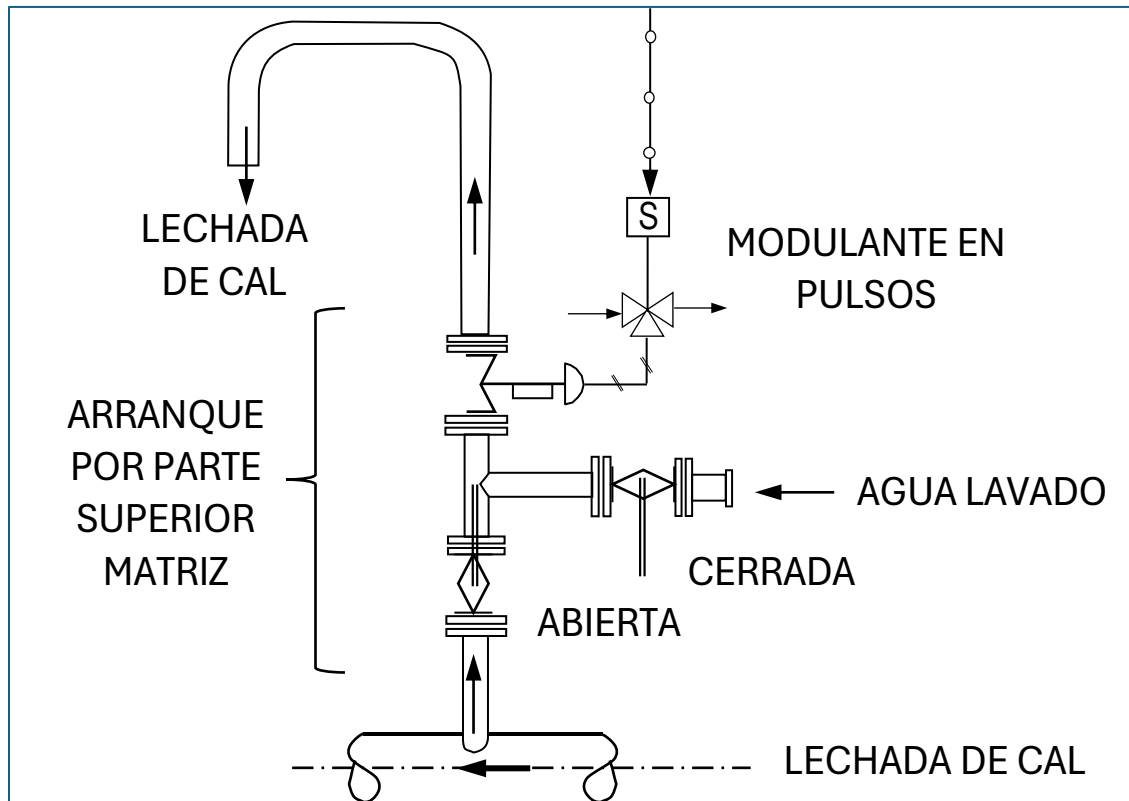


Figura 39: Esquema Arranque de MOL en un Punto de Dosificación

El esquema general de dosificación de reactivos en Antamina tal como fue diseñada la concentradora por Bechtel, incluye lazos de cañerías que parten en el estanque de almacenamiento respectivo, recorren circuitos de la planta de molienda y/o de flotación y vuelven al estanque desde donde partieron. Se trata de un lazo presurizado, controlado con un esquema realimentado desde un PIT con válvula de control de presión que responde a un set point dado en el PIC desde la sala de control.

Consideraciones Finales

Los reactivos utilizados en plantas concentradoras o en plantas hidrometalúrgicas son un tema prácticamente inagotable. En la experiencia del que escribe, muchas veces no se cuenta con una experiencia sólida en cuestiones no-metalúrgicas, por ejemplo, de layout, de hidráulica o simplemente de criterios para definir los volúmenes de los estanques.

En proyectos antiguos no se respetaba la norma de instalar estanques de reactivos peligrosos dentro de un área con muretes capaces de contener el 110% del volumen del estanque. En la **Figura 40** se presenta una fotografía de un estanque de almacenamiento de lechada de cal en una planta en Chile. Se observa que el murete no es capaz de contener el volumen del estanque ya que su altura es mínima. Actualmente la Norma NCh 382 establece que el óxido de calcio o la cal tiene el número de referencia de Naciones unidas de 1910, la clase de riesgo y la división dentro de la clase es la N°8, “sustancias peligrosas”.



Figura 40: Estanque de Almacenamiento de Lechada de Cal de una Minera en Chile

La cal es un insumo esencial tanto para la minería metálica como para las operaciones de obtención de carbonato de litio a partir de salmueras. Estudios de Cochilco indican que la demanda en Chile de cal viva estará por encima de la oferta en un futuro próximo. Negociaciones para mejorar la importación y traslado de cal viva desde Argentina tienen la posibilidad de mejorar no solamente el suministro sino también la calidad de la cal. La cal de Argentina es de calidad superior a la Chilena.