



REMOLIENDA DE CONCENTRADOS

Aspectos de Diseño de Planta de Remolienda de Concentrados



19 DE AGOSTO DE 2025

ALFONSO VIDEGAIN
avidegain9@gmail.com

Contenido

1. El Porqué de La Remolienda de Concentrados	3
2. Molinos Verticales Agitados	5
3. La Serie de Molinos Vertimill®	5
4. Aplicaciones en Remolienda	7
5. Control de Circuitos de Remolienda	12
6. Circuito de Remolienda Collahuasi	14
7. Circuito de Remolienda Cerro Casale (FS)	18
8. Circuito de Remolienda Alumbraera	21
9. Remolienda Sossego	23
10. Remolienda en Planta N° 2 de Las Tórtolas	25
11. Remolienda Concentradora Antamina	28
12. Remolienda Concentradora Pelambres 85 kt/d	31
13. Remolienda Concentradoras Chuquicamata	34
14. Remolienda Laguna Seca Minera Escondida	36
15. Remolienda Los Colorados Minera Escondida	39
16. Remolienda OGP1 Minera Escondida	44
17. Consideraciones Finales	46
Figura 1: VERTIMILL® Grinding Mill assembly VTM-4500-C	6
Figura 2: Componentes Típicos de un Molino Vertimill®	7
Figura 3: Circuito de Remolienda con dos Estanques de Recirculación y Clasificación	8
Figura 4: Corte Molino Remolienda de Cobre Antamina	8
Figura 5: Circuito Alternativo Sin Cajón Recirculación	9
Figura 6: Eje Helicoidal con Revestimientos Molino	10
Figura 7: Sistema de lubricación Reductor Planetario	11
Figura 8: Esquema de Control de Agua Alimentación a Hidrociclones	13
Figura 9: Esquema Circuitos de Molienda Collahuasi Año 1998	14
Figura 10: Esquema de Celdas Rougher Collahuasi	15
Figura 11: Circuito Collahuasi Remolienda Concentradora para 60 ktpd	16
Figura 12: Corte de Circuito de Remolienda Collahuasi	17

Figura 13: Circuito Remolienda Concentrados Cerro casale (FS)	18
Figura 14: Esquema Circuito Remolienda Cerro casale.....	19
Figura 15: Foto Modelo 3D Remolienda Cerro Casale	20
Figura 16: Circuito Remolienda Alumbraera	21
Figura 17: Corte Molino Remolienda Alumbraera	21
Figura 18: Planta Molinos Remolienda Alumbraera.....	22
Figura 19: Arreglo General Planta de Flotación Sossego	23
Figura 20: Diagrama de Flujo Simplificado Remolienda Sossego	23
Figura 21: Circuitos de Flotación Sossego.....	24
Figura 22: Molino Vertical Sossego	24
Figura 23: Diagrama de Flujo Planta Remolienda Las Tórtolas 2	26
Figura 24: Esquema Simplificado Disposición General Flotación Rougher y Remolienda Planta 2 Las Tórtolas.....	27
Figura 25: Fotografía Concentradora Antamina	28
Figura 26: Esquema simplificado Planta Flotación y Remolienda de Concentrados de Cobre Antamina	29
Figura 27: Esquema Diagrama de Flujo Circuito Remolienda de Cobre Antamina	30
Figura 28: Esquema Diagrama de Flujo Circuitos de Molienda Diseño MLP 85 ktpd	32
Figura 29: Circuito Original Remolienda Minera los Pelambres (85 kt/d)	33
Figura 30: Esquema simplificado Diagrama de Flujo Circuito Remolienda Chuquicamata	35
Figura 31: Esquema de Planta Molinos Verticales Laguna Seca	36
Figura 32: Esquema del Diagrama de Flujo del Circuito de Remolienda de Laguna Seca	37
Figura 33: Esquema simplificado de la planta de molienda de Los Colorados	39
Figura 34: Molinos SAG y Molinos de Bolas en configuración “side by side” de Los Colorados.....	40
Figura 35: Estanque “Amelunxen” para disposición de relaves en Los Colorados	40
Figura 36: Esquema simplificado de disposición general de la planta de Flotación de Los Colorados.....	41
Figura 37: Esquema simplificado de un Molino de Remolienda de Los Colorados	42
Figura 38: Fotografía de los dos Molinos de Remolienda Fase original Los Colorados	43
Figura 39: Esquema simplificado planta de flotación Concentradora OGP1	44
Figura 40: Diagrama de Flujo simplificado del Circuito de Remolienda de OGP1.....	45

El Porqué de La Remolienda de Concentrados

Lo primero es delimitar el tema que se abordará en este resumen; se trata de remolienda de concentrados de cobre. Existen al menos dos razones para la remolienda de concentrados de cobre:

- Mejorar la liberación de mena que ya ha sido concentrada en una etapa gruesa de flotación denominada rougher.
- Obtener un concentrado final con una distribución de tamaños que pueda ser transportada hidráulicamente por un concentraducto hacia el puerto de embarque.

La segunda razón parece un tanto arbitraria y no siempre aplica, por ejemplo, cuando el transporte es mediante camiones o contenedores en ferrocarril.

Sin embargo, recuerdo una anécdota del proyecto Esperanza, en el cual se diseñó, como primera aproximación, un esquema de remolienda de concentrado en circuito abierto. Posteriormente, durante la ingeniería de detalles, se debió considerar el criterio de diseño de transporte hidráulico del concentraducto, el cual impone una restricción a la granulometría, la cual permite tener como máximo un 1% de partículas sobre 100 # (150 micrones). Esto concluyó con un diseño de la etapa de remolienda en circuito cerrado.

La flotación primaria o rougher tiene como objetivo maximizar la recuperación de cobre y molibdeno, ya que usualmente los minerales de menas de cobre tienen cantidades de molibdeno que pueden ser concentradas, en la forma de sulfuro, o molibdenita, MoS_2 , con valor comercial. Al maximizar la recuperación en flotación rougher, se produce una cierta concentración de especies parcialmente liberadas, las cuales deben pasar por la etapa de remolienda para mejorar la ley en etapas de flotación posteriores.

La distribución granulométrica de una pulpa de mineral que es producto del rebose u overflow (O/F) de hidrociclones, en el circuito de molienda secundaria¹, se caracteriza por un tamaño considerado para efectos metalúrgicos, como representativo, el cual es el denominado P_{80} . Este P_{80} , es un valor que representa una distribución granulométrica donde el 80% de las partículas son de menor tamaño que un valor dado, por ejemplo 160 micrones. De este modo se habla de una tarea de molienda que debe obtener un producto con un P_{80} , de cierto valor considerado como un equilibrio entre el costo de moler y la recuperación en la etapa de flotación primaria o rougher. El método de Bond utiliza el F_{80} y el P_{80} , además de un índice de dureza, para estimar la potencia necesaria para una tarea de molienda dada. La letra F es por la palabra “Feed” o alimentación, y la letra P es por la palabra “Product”. Digamos, grosso modo, que para una flotación típica de minerales de cobre el P_{80} está en el rango de 150 a 200 micrones, siendo dichas cifras arbitrarias, pero que pueden ser justificadas por criterios metalúrgicos.

La remolienda de concentrados de cobre típicamente aplica a los concentrados de las etapas rougher y Scavenger, justo antes de las etapas de limpieza para las cuales se requiere una mayor liberación de la mena para obtener en la espuma la especie valiosa y en las colas mayor cantidad de ganga. Algunos circuitos de remolienda solamente tratan concentrados rougher. La tarea de remolienda, en términos muy generales, se puede decir que consiste en llevar una

¹ Se denomina molienda secundaria a la operación unitaria de usar molinos de bolas, en un circuito que incluye una molienda primaria en molino SAG.

alimentación con un F_{80} en el rango 160 a 200 micrones (arbitrario, pero típico), a un producto con un P_{80} de alrededor de 45 micrones.

Mas adelante se describirán algunos de los molinos de remolienda más típicos y los circuitos utilizados para mejorar la liberación de la mena.

Los molinos de agitación consisten en una cámara de molienda estática cuyo eje puede orientarse vertical u horizontalmente (Napier-Munn et al, 1996). Suspendido en la carcasa hay un eje con un agitador, de ahí el nombre de estos molinos: molinos de agitación.

Los molinos de agitación pueden ser clasificados según el tipo de flujo producido en el molino. Hay dos categorías principales: fluidizado y gravitacionalmente inducido por la carga.

El molino Vertimill es un ejemplo de molino comercial inducido por gravedad. Estos cuentan con un agitador de tornillo helicoidal doble de baja velocidad. El tornillo eleva la carga de medios de molienda y el mineral hasta cerca de la superficie libre, desde donde la carga fluye hacia abajo por la periferia de la carcasa. Como el molino está siendo alimentado por una carga de mineral a la cámara de molienda, se produce un arrastre de partículas finas hacia la descarga del molino en la parte superior de la cámara de molienda. Estos son los principios básicos del movimiento de la carga y del mineral molido en el molino. Sin embargo, existen variaciones del punto de alimentación de mineral, y existe consenso en que el mejor punto de alimentación es por la parte inferior de la cámara de molienda.

Los molinos tipo fluidizados usan discos o brazos impulsores a velocidades bastante superiores a los molinos gravitacionales. Estas velocidades se requieren para fluidizar la carga y suspender casi homogéneamente el medio y las partículas de mineral. Ejemplos de este tipo de molinos son el Higmill, el VXPmill, el Maxxmill, el ISAmill, y el “Stirred Media Detritor” (SMD).

En esta presentación se desarrollará una breve incursión por los circuitos que utilizan molinos gravitacionales tipo Vertimill. El uso de molinos de bolas para remolienda es cada vez más raro, sin embargo, se presentan algunos ejemplos de proyectos antiguos que utilizan molinos de bolas “convencionales” para tareas de remolienda.

Molinos Verticales Agitados

El molino vertical o “Tower Mill” fue fabricado originalmente en Japón por Kubota. Fue el primer molino agitado de baja velocidad aplicado en la industria de minerales².

El molino Vertimill es básicamente el mismo diseño que el Kubota y fue fabricado por Svedala. Actualmente Metso lo comercializa y existen modelos grandes de hasta 4.500 HP. CITIC, una empresa china, ya ha suministrado tres molinos de su propio diseño y fabricación, tipo “Vertimill” a la División Chuquicamata de Codelco, para reemplazo de molinos de remolienda de tipo convencional, que era necesario reemplazar.

La Serie de Molinos Vertimill®

Tabela 2.9 - Tamanhos e potências dos Vertimills®

Modelo	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Potência do motor (cv)	Peso vazio (ton)	Carga de bolas (kg)	Capacidade de alimentação (m³/h)
VTM-15-WB	7.060	1.520	1.320	15	5,5	3.409	5
VTM-20-WB	7.180	1.520	1.320	20	5,9	4.545	7
VTM-40-WB	7.460	1.780	1.520	40	8,2	7260	14
VTM-60-WB	7.600	1.780	1.520	60	8,8	7260	20
VTM-75-WB	7.900	1.960	1.700	75	12,5	9797	25
VTM-125-WB	9.270	2.670	2.310	125	17,9	18144	42
VTM-150-WB	9.780	2.670	2.310	150	19,6	18144	51
VTM-200-WB	9.780	2.670	2.310	200	20,5	18144	68
VTM-250-WB	9.650	3.660	3.180	250	33,8	29.030	85
VTM-300-WB	9.650	2.660	3.180	300	35,7	29.030	102
VTM-400-WB	11.320	3.910	3.380	400	52,7	34.930	135
VTM-500-WB	12.070	3.860	3.780	500	66,1	44.450	169
VTM-650-WB	12.270	3.250	3.860	650	82,6	58.970	220
VTM-800-WB	13.460	3.560	4.060	800	100,4	78.018	271
VTM-1000-WB	13.460	3.660	4.270	1000	116,1	86.160	339
VTM-1250-WB	13.460	4.090	4.520	1250	125,4	90.720	423
VTM-1500-WB	14.655	4.547	5.385	1500	143,3	127.005	508
VTM-3000-WB	17.148	6.383	6.604	3000	342,7	277.599	1016
VTM-4500-C	18.590	6.383	6.604	4500	400,0	325.000	1500

Fonte: Metso (2012) e Metso (2012b)

La **Figura 1** presenta un esquema de un molino Vertimill de tamaño grande (el de mayor tamaño a la fecha de la información que tengo), en que se ha destacado con figuras de hombres en los distintos niveles en los cuales es necesario disponer de plataforma de acceso para alguna función de mantenimiento. Por otra parte, es interesante destacar que la base del molino debe tener una altura razonable para la descarga de bolas en el mantenimiento de la hélice del molino. En el caso de la figura es de 1,6 m de altura.

² A. Jankovic- Minerals Engineering '02, Perth, Australia, 2002.

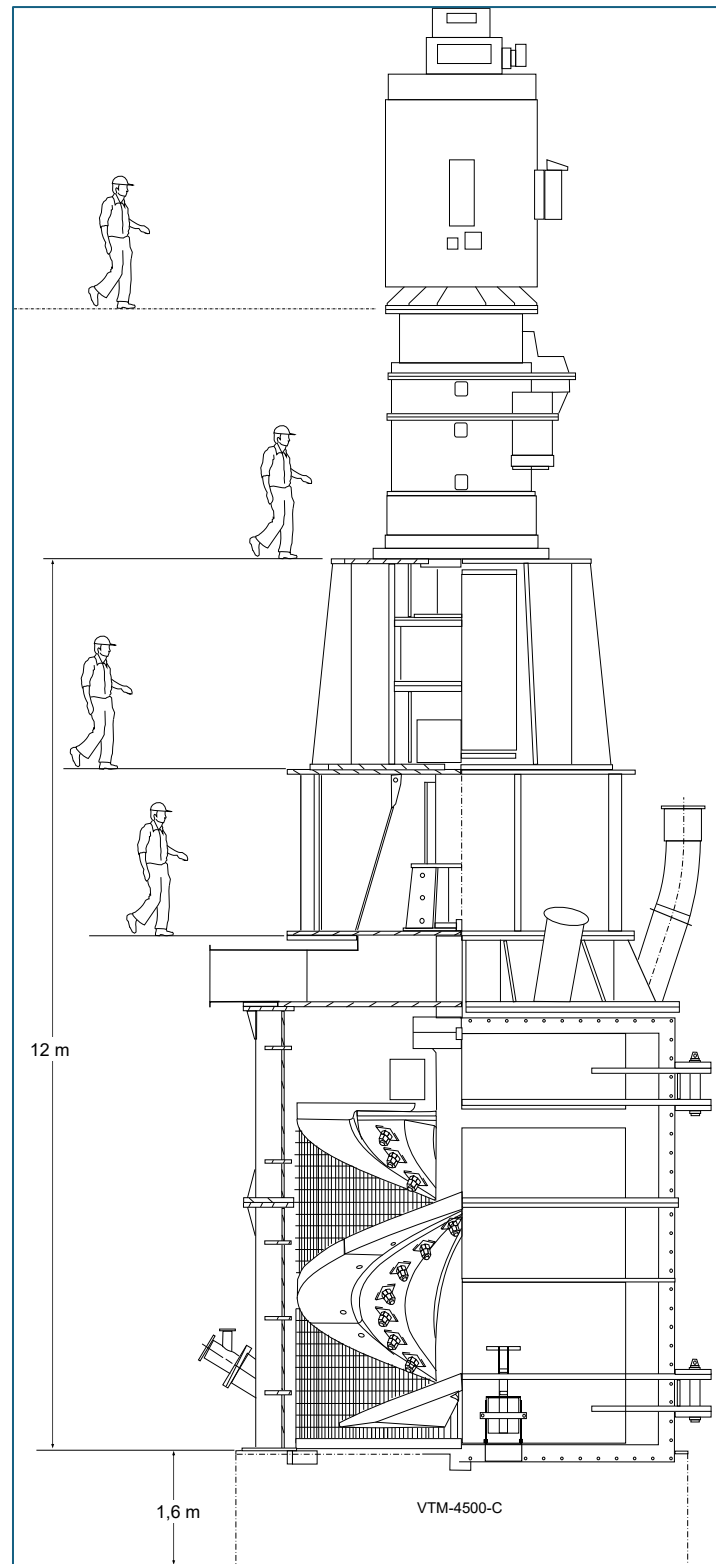


Figura 1: VERTIMILL® Grinding Mill assembly VTM-4500-C

Aplicaciones en Remolienda

En la **Figura 2** se observa un esquema de los componentes típicos de un molino Vertimill®. Después de años en que el estanque de separación pertenecía casi siempre a la configuración típica de un molino de este tipo, actualmente dicho estanque se está dejando como opcional, o incluso eliminándolo.

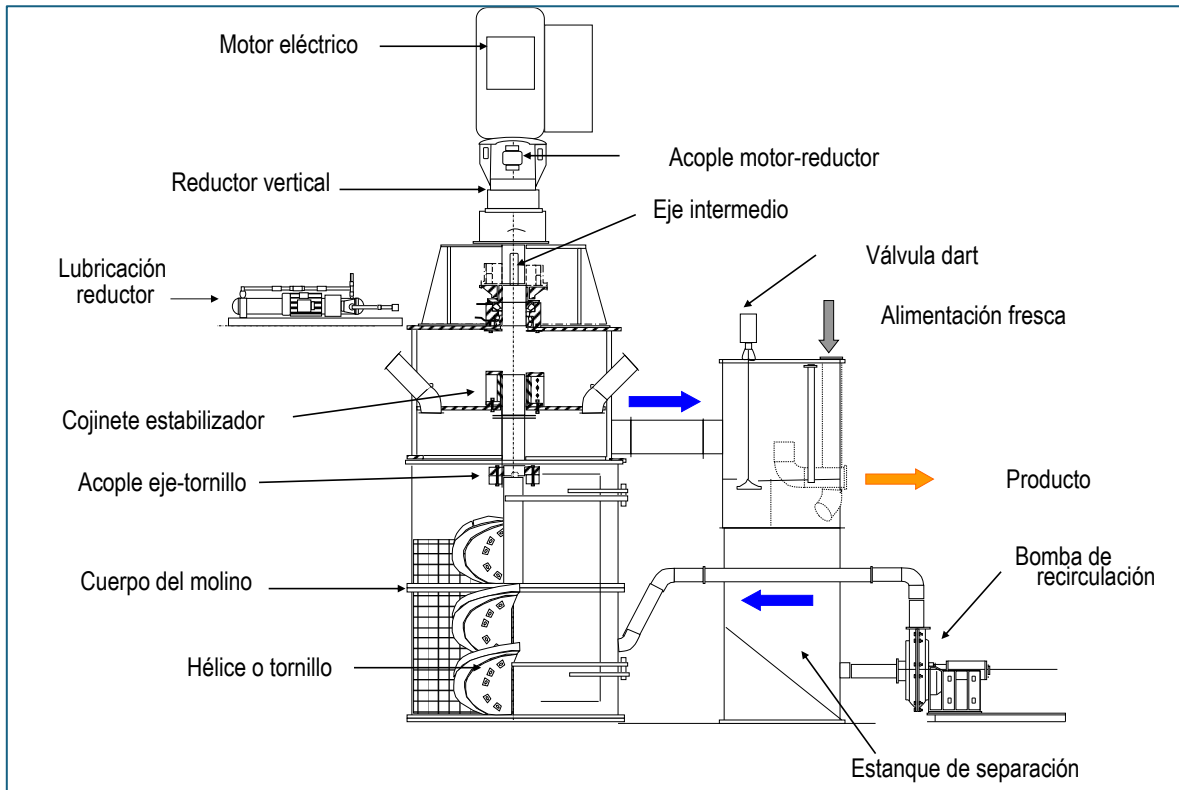


Figura 2: Componentes Típicos de un Molino Vertimill®

Para eliminar el estanque de separación, también denominado estanque de recirculación, existen alternativas ya que uno de los principios importantes de este molino es el flujo de pulpa que penetra desde abajo y sube arrastrando las partículas finas hacia la descarga superior, mientras las partículas gruesas son sometidas a esfuerzos de abrasión entre los medios de molienda y la hélice o tornillo.

Una solución es disponer de un estanque que reciba la descarga superior de pulpa y por medio de bombas la impulse hacia la batería de hidrociclones, los cuales retornan el underflow hacia la alimentación inferior del molino, para lo cual es necesario que los hidrociclones se encuentren a una altura que permita el flujo ascendente dentro del molino. Notar que se debe vencer la carga de la pulpa dentro del molino para que dicha pulpa pueda ingresar por la parte inferior del molino, ascender y recircular hacia un estanque de impulsión. Ver **Figura 2**.

La segunda solución, aunque parece abandonada en los diseños actuales, aparece mostrada en P&IDs de proyectos, y consiste en introducir la descarga del underflow de hidrociclones por la parte superior del molino mientras la recirculación se produce entre un pequeño estanque ubicado en la parte superior del molino y una bomba de recirculación que impulsa la pulpa desde la parte inferior del molino.

La **Figura 3** presenta un esquema simplificado del circuito original de remolienda de concentrado de cobre de Antamina. Más adelante se darán más detalles de este circuito.

En la **Figura 4** se observa el estanque de separación, el cual es pequeño y se ubica a una cota superior al estanque 0325-STP-023 de alimentación a los molinos verticales. En esta figura se puede apreciar la gran altura de la base del molino (4 m), lo que dificulta y hace peligrosa la operación del vaciado de bolas para recambio de hélice del molino.

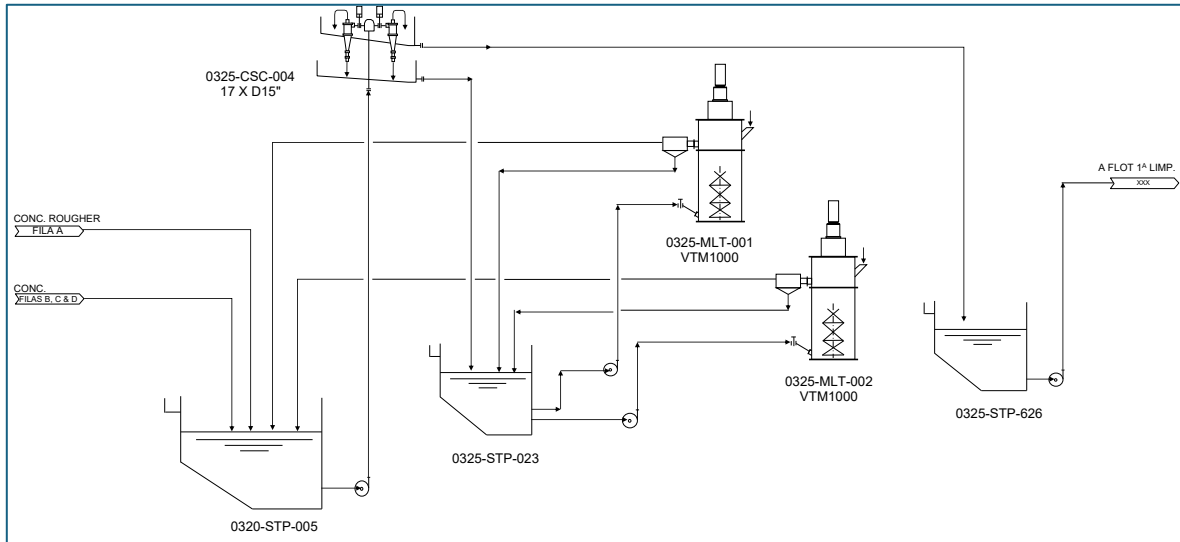


Figura 3: Circuito de Remolienda con dos Estanques de Recirculación y Clasificación

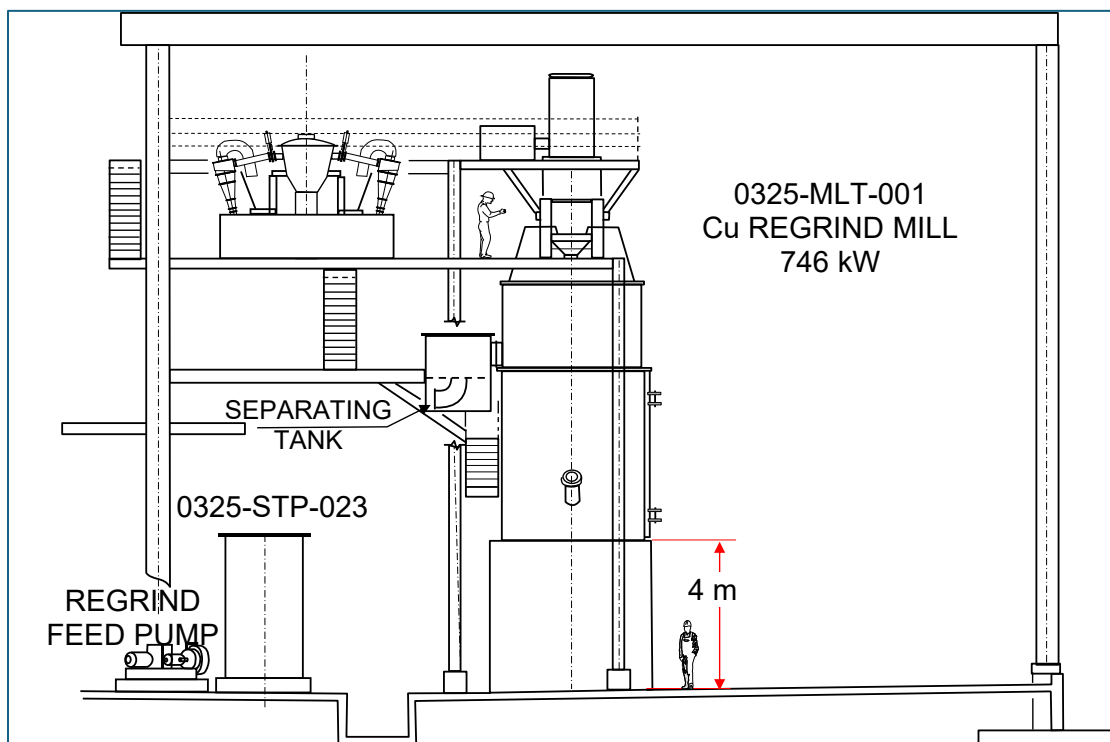


Figura 4: Corte Molino Remolienda de Cobre Antamina

En la **Figura 5** se presenta un circuito sin estanque de separación. Se observa que el proveedor de este modelo VTM 1500 señala una altura recomendada desde la descarga de hidrociclones hasta la entrada del molino de 57 ft (17,4 m).

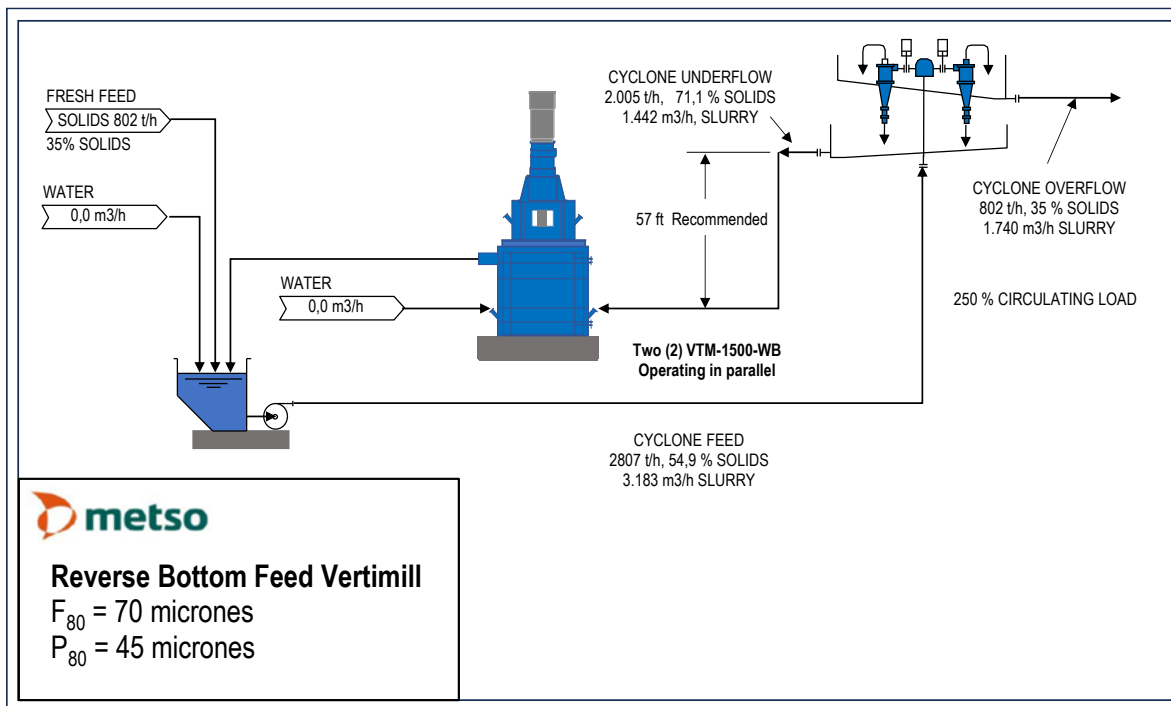


Figura 5: Circuito Alternativo Sin Cajón Recirculación

La **Figura 5** muestra un esquema de circuito de remolienda con alimentación reversa por el fondo del molino. Esta figura de Metso considera una carga circulante de 250%, lo que es muy elevada al compararla con los balances de los proyectos con circuitos de este tipo. Normalmente se utiliza una carga circulante de 150%. El esquema corresponde a una ingeniería del año 2013, para el proyecto RT Fase II con una capacidad de la concentradora de 100.000 t/d de mineral.

Más adelante se verá en forma somera las estimaciones de la cantidad y tamaño de los molinos para una carga de concentrado fresco dada. Como de costumbre, se trata de utilizar una cifra de energía específica, del orden de 4 a 8 kWh/t y multiplicar esta cifra por el tonelaje horario para obtener la potencia estimada. En el esquema presentado por Metso la potencia total de dos molinos de 1.500 HP no es suficiente para la carga fresca del circuito mostrado.

Es una falla muy común el subestimar la potencia necesaria para la remolienda con molinos Vertimill. En mi experiencia he observado energías específicas cercanas a 4 o 5 kWh/t, lo que se ha mostrado, es que esas cifras están subestimadas³.

En la **Tabla 1** se presenta una reproducción de datos tomados de la referencia al pie de página. Se observa que, para diferentes minerales y tareas de molienda, en general, todos los estimados de energía específica están por debajo de las mediciones en planta.

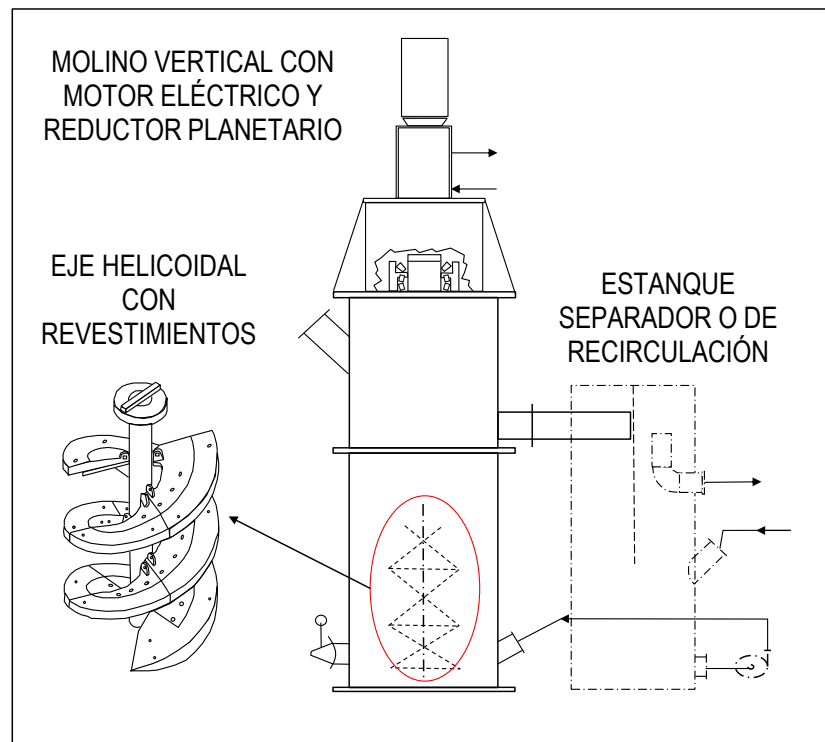
³ En "Regrind Mills: Challenges of Scaleup" de Michael Larson, Greg Anderson, et al, se desarrolla este tema entregando resultados de benchmarking.

Tabla 1- Tower Mill Design vs. Operating Data

Application	Energy requirements for a target P_{80}		Design/Actual
	Vendor Design	Actual ⁴	
Cu regrind	6 kWh/t for 45 μm	13 kWh/t for 45 μm	48%
Pb secondary grind	4,4 kWh/t for 63 μm	6,9 kWh/t for 63 μm	57%
Pb tertiary grind	7,1 kWh/t for 45 μm	12 kWh/t for 45 μm	63%
Zn regrind	5,7 kWh/t for 30 μm	9,4 kWh/t for 30 μm	61%
Zn regrind	19,4 kWh/t for 20 μm	25,5 kWh/t for 20 μm	76%
Pb regrind	16,7 kWh/t for 20 μm	31 kWh/t for 20 μm	54%
Ni regrind	11,7 kWh/t for 60 μm	13,5 kWh/t for 60 μm	84%
Fe regrind	9,4 kWh/t for 30 μm	13,8 kWh/t for 30 μm	68%

Regresando a las descripciones mecánicas de los molinos Vertimill, se presenta en la **Figura 6** un esquema con los componentes principales de este equipo. El motor eléctrico instalado en la parte superior y con disposición vertical entrega el torque a un reductor planetario, el cual está unido por acoplamiento al eje de la hélice. La hélice tiene revestimientos recambiables cuando llegan al final de su vida útil.

El reductor planetario tiene un sistema de enfriamiento del aceite, el cual debe montarse fuera del molino en una plataforma dedicada. Este sistema de enfriamiento incluye un intercambiador de calor. La **Figura 7** muestra en forma simplificada la instrumentación del sistema de enfriamiento del reductor.

**Figura 6: Eje Helicoidal con Revestimientos Molino**

⁴ Actual energy requirements were calculated using operating work index from plant surveys.

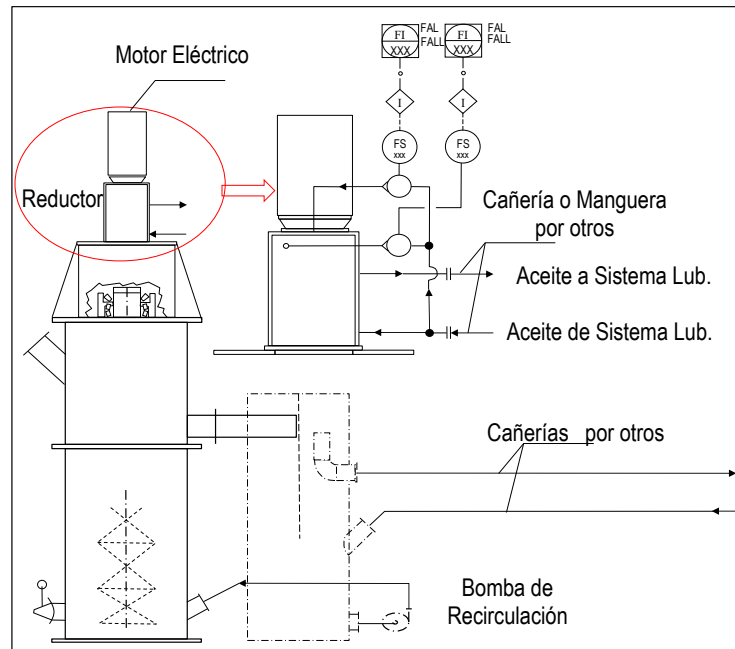


Figura 7: Sistema de lubricación Reductor Planetario

El reductor planetario requiere enfriamiento del aceite de lubricación, y este sistema de enfriamiento debe instalarse en una plataforma con acceso para mantenimiento, y a una altura que permita la recirculación del aceite.

En la **Figura 1** se pueden apreciar los distintos niveles en los cuales debe haber plataformas para mantenimiento del molino. La plataforma del sistema de enfriamiento debe estar a la altura del reductor planetario.

En la próxima sección se presenta una aproximación básica de la instrumentación que he observado en el circuito cerrado de remolienda. Se presentan esquemas de instrumentos y una explicación cuando dichos instrumentos solamente despliegan información en sala de control, o en otros casos, también existen lazos de control.

Control de Circuitos de Remolienda

La **Tabla 2** muestra algunos parámetros de varios circuitos de remolienda y también la instrumentación asociada al circuito de clasificación con hidrociclones.

Tabla 2 – Control Circuitos de Remolienda de Concentrados

Proyecto		Collahuasi	Cerro Verde	Esperanza	MEL-4	Pelambres	Boddington	Antamina	Sossego
Nominal		110.000	108.000	95.000	110.000	100.000		100.000	47.510
Mineral alim. Ciclonos	t/h	871	671	852	1311	1430	293	573,6	487,1
GE Sólidos		3,07	3,17	3,2	3,2	3,2	3,0	3,3	3,34
% Sólidos	%	36,0%	36,8%	36,9%	37,8%	31,0%	19,8%	30,6%	30,5%
Flujo Pulpa	m3/h	1.832	1.364	1.723	2.567	3.630	1.284	1.475	1.256
Diseño									
Mineral alim. Ciclonos	t/h	1569	810	1252	2097,6	2288	430	946,4	
% Sólidos	%	36%	36,8%	36,9%	37,8%	31,0%	19,8%	30,6%	30,5%
Flujo Pulpa	m3/h	3.300	1.647	2.532	4.107	5.808	1.885	2.433	
Factor		1,80	1,21	1,47	1,65	1,60	1,47	1,65	
O/F ciclonos	t/h	349	258	341	940	715	98	286,8	243,5
U/F Ciclonos	t/h	523	412	511	1412	715	195	286,8	243,5
Total	t/h	872	670	852	2352	1430	293	573,6	487,0
CC	%	150%	160%	150%	150%	100%	199%	100%	100%
Flujómetro		FIT	FIT	FIT	FIT	FIT	FIT	No tiene	FIT
Densímetro		DIC	DIT	DIC	DIT	DIT	DIC	No tiene	DIC
Acción o Indicación		Control	Sólo Indicación	Control	Sólo Indicación	Sólo Indicación		No tiene	Control

Esta tabla indica, por ejemplo, que la carga circulante utilizada en el diseño del circuito casi siempre está alrededor de 150%, salvo tres casos en que se usó 100%. Este parámetro no es fijo ya que depende de la granulometría del mineral de alimentación, de su dureza, el tonelaje de alimentación y la operación de los hidrociclones. En la práctica puede variar según las condiciones señaladas, pero para el diseño hidráulico del circuito de clasificación se debe utilizar un valor dado ex-ante.

En la **Tabla 2** se indica el tipo de instrumentación y si existe, en el diseño original, algún lazo de control con dicha instrumentación. Por ejemplo, el diseño de Collahuasi cuando el tonelaje era de 100 ktpd de mineral, se observa que la alimentación a hidrociclones estaba equipada con flujómetro, transmisor de flujo (FIT), densímetro y control de densidad (DIC). En cambio, el circuito Cerro Verde (en su diseño original antes de la ampliación), tiene igual instrumentación, pero sin lazo de control (sólo indicación de variables en sala de control). Aunque la **Tabla 2**, no lo señala, el P&ID de Boddington tiene lazo de control en que la señal (DIC) de un controlador de densidad está asociado al flujo de agua de dilución de la alimentación a hidrociclones y con un selector (LY) que permite un override⁵ según el nivel del cajón de las bombas de alimentación y su velocidad (bombas equipadas con VSD). Como puede observarse, en general, los porcentajes de sólidos de alimentación a hidrociclones son bastante bajos, lo que sumado a que la presión aplicada es generalmente superior a aquella de circuitos de clasificación en molienda secundaria, y, además, los hidrociclones de remolienda tienen menores diámetros, todo esto configura un circuito diseñado para lograr un corte alrededor de 45 micrones aproximadamente.

La **Tabla 2** no señala los tamaños F_{80} ni P_{80} , dado que normalmente dichos valores son consecuencia de la dureza del mineral y de las condiciones reales y por lo general fluctuantes

⁵ Una estrategia de control regulatorio denominada “override” o de anulación, aplica cuando un circuito posee dos lazos de control y en condiciones “normales” se utiliza solamente un lazo de control, mientras la variable controlada se mantenga en ciertos límites. Al sobrepasar cierto límite de la variable controlada se produce “override”, es decir, el segundo lazo toma el control, anulando el primero hasta que la variable controlada salga de la condición no deseada.

en la operación de cada planta. Por otra parte, los factores de diseño mostrados presentan importantes diferencias de un proyecto a otro.

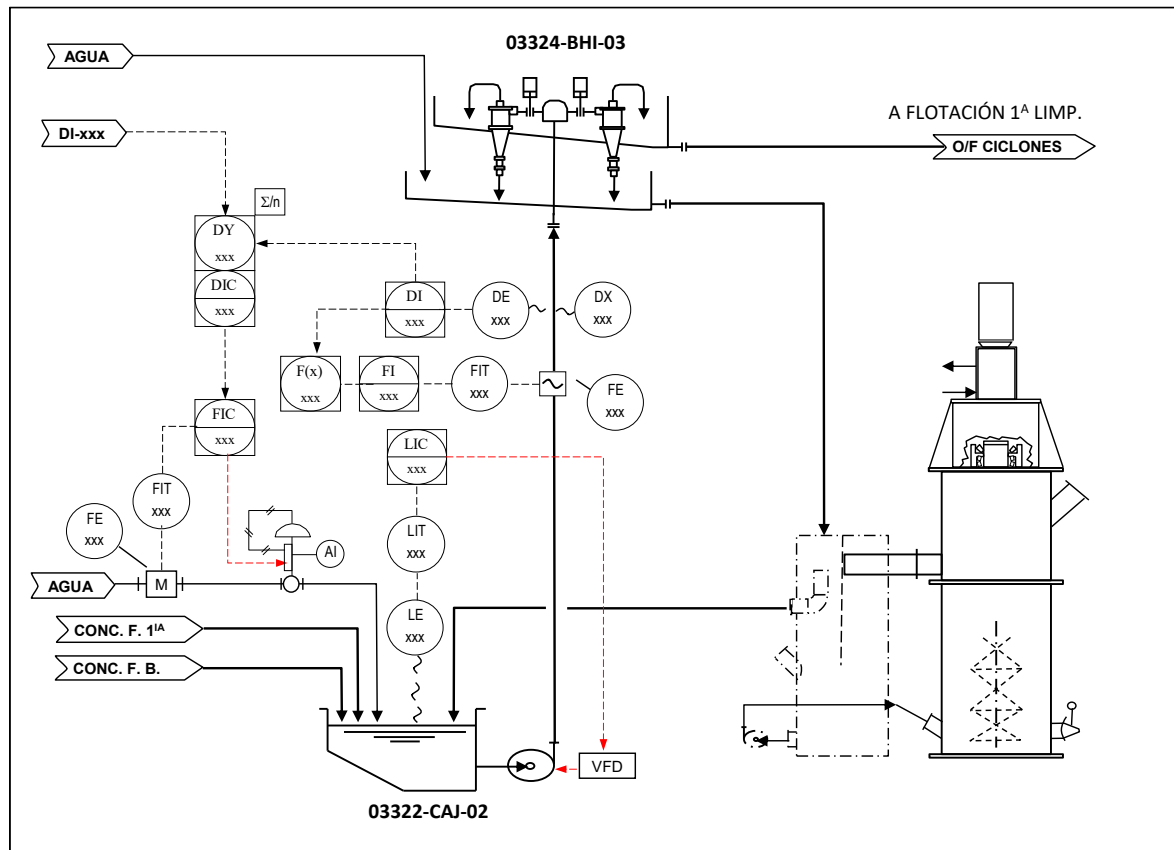


Figura 8: Esquema de Control de Agua Alimentación a Hidrociclones

La **Figura 8** muestra un esquema típico de instrumentación y control regulatorio de un circuito cerrado inverso de remolienda. Se observa que el nivel del cajón de alimentación a hidrociclones tiene un lazo de control para el nivel (LIC) que trabaja con el variador de frecuencia de la bomba de alimentación.

La instrumentación que incluye densímetro y flujómetro en la línea de alimentación a hidrociclones se muestra con lazos de control con override para evitar oscilaciones con el lazo de control de nivel. El autor de este trabajo observa que muchos circuitos no usan lazo de control para dilución de pulpa de alimentación a hidrociclones, porque dicho flujo generalmente es bastante bajo, alrededor de 30% de sólidos en peso. Eso es suficiente para un buen corte de los hidrociclones.

Circuito de Remolienda Collahuasi

Collahuasi en el año 1997 tenía un diseño para una capacidad de 60.000 t/d de mineral. El diseño de Bechtel-Davy consideró una concentradora de cobre convencional con molienda en molinos SAG y molinos de bolas. En el año 1998 el informe “Historical Report” señala que los depósitos Ujina, Rosario y Hunquintipa son suficientes para soportar operaciones a 60.000 t/d de sulfuros por 100 años.

Esta primera fase contempló un circuito de molienda con un molino SAG y un molino de bolas, en duplicado. La **Figura 9** presenta un esquema del circuito de molienda de Collahuasi para la primera fase. Se observa que cada molino SAG tiene asociado un molino de bolas y dos baterías de hidrociclones. El diseño de layout es “back to back” (molino SAG y molino de bolas descargando hacia el mismo lado).

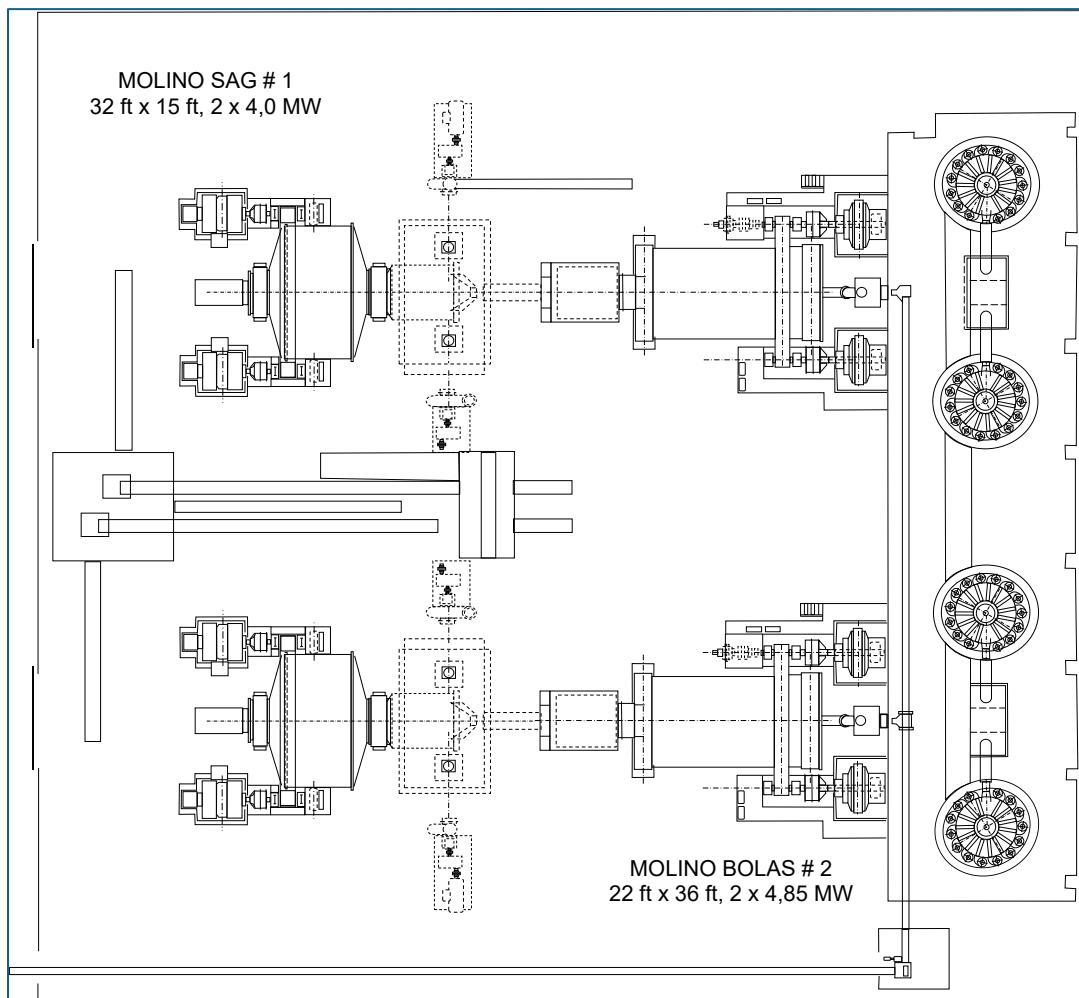


Figura 9: Esquema Circuitos de Molienda Collahuasi Año 1998

Cada molino SAG de 32 ft x 15 ft está equipado con accionamiento dual piñón corona con dos motores eléctricos de 4 MW cada uno. El sistema de accionamiento de un total de 8.000 kW posee velocidad variable de 0 a 200 rpm. Cada molino de bolas de 22 ft x 36 ft tiene un accionamiento dual piñón corona con una potencia total de 9.600 kW.

La **Figura 10** muestra un esquema simplificado del circuito original (dentro de la línea de demarcación) de la planta de flotación selectiva de Collahuasi. El circuito para 60 kt/d incluye 4 filas de celdas Wemco de 127 m³, y un circuito de primera limpieza con tres filas de celdas Wemco de 127 m³.

Las celdas rougher OK 160 pertenecen a una fase posterior (expansión en el 2004) de ampliación de la concentradora Collahuasi.

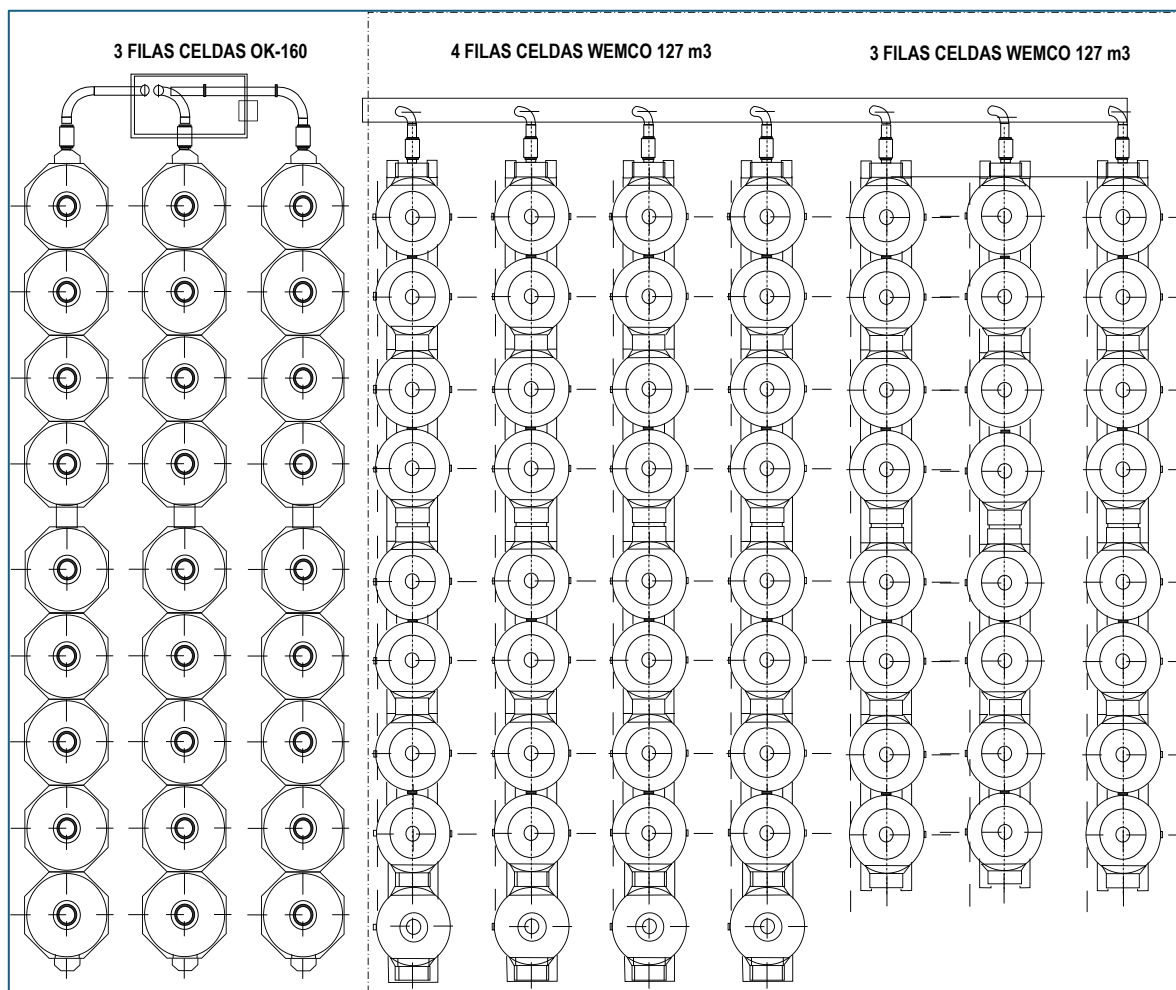


Figura 10: Esquema de Celdas Rougher Collahuasi

Este circuito para una capacidad de planta concentradora de 60 ktpd contaba de cinco molinos Vertimill de 1.250 HP cada uno, y estaba diseñado para una capacidad de remolienda de concentrado de 698 t/h.

La **Figura 11** muestra un esquema del circuito de remolienda, el cual tiene un molino central que puede trabajar con el underflow de cualquiera de las dos baterías de hidrociclones.

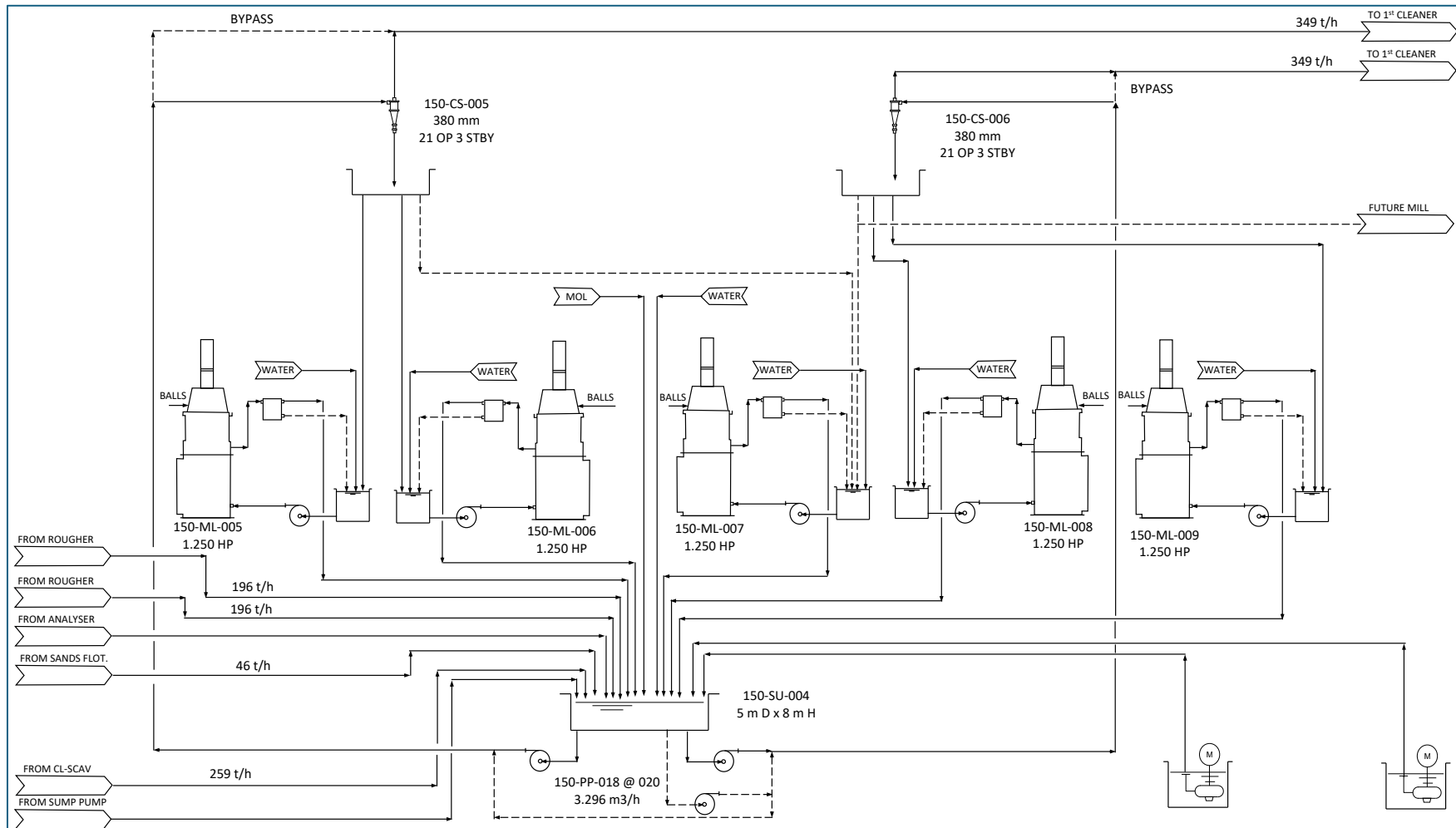


Figura 11: Circuito Collahuasi Remolienda Concentradora para 60 ktpd

Para 698 t/h de carga fresca hacia la remolienda y con 5 molinos de 1.250 HP cada uno, a 90% de toma de potencia se obtiene, por cálculo, un estimado de 6 kWh/t de energía específica.

La **Figura 12** muestra un corte de uno de los molinos Vertimill de Minera Collahuasi. Se observa el arreglo general en corte con equipos a distintos niveles. Esto se produce por el uso de un cajón colector de mineral que egresa del molino y debe llegar por gravedad hacia el cajón de alimentación de hidrociclones.

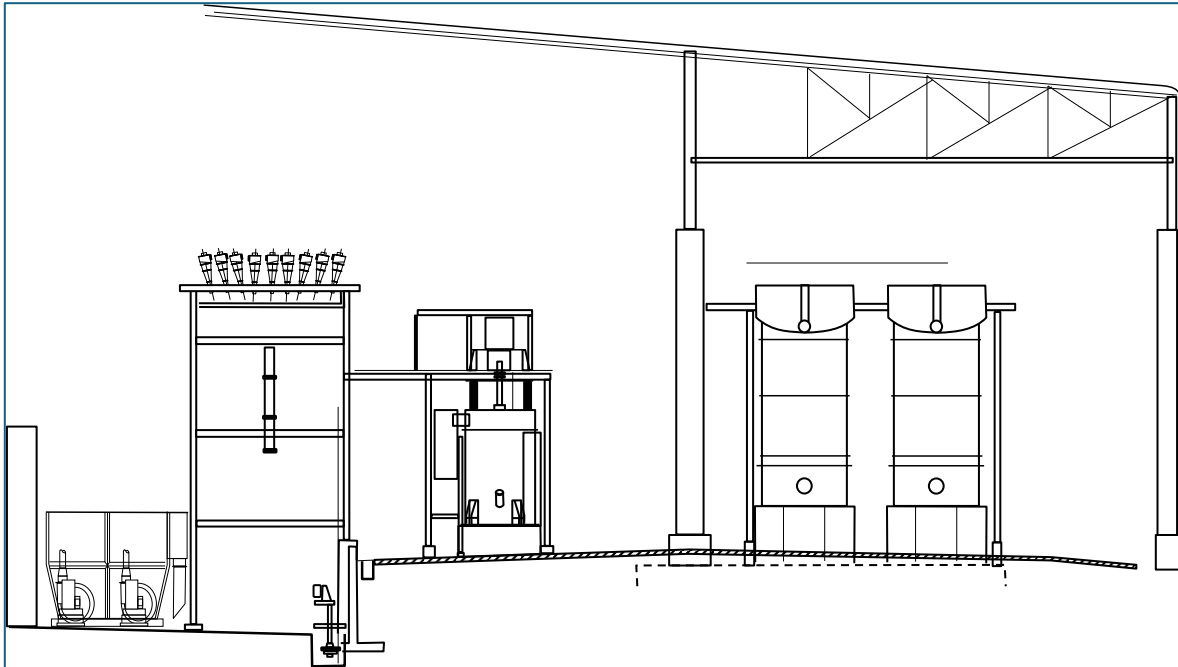


Figura 12: Corte de Circuito de Remolienda Collahuasi

En abril de 2008, durante una visita a la concentradora, con una capacidad en ese momento, de 110 kt/d, el F_{80} a flotación era de entre 200 a 210 μm . En dicha visita se estableció que la remolienda de concentrados rougher y Scavenger se realiza en 7 molinos Vertimill de 1.250 kW. En ese momento se dijo que de un total de siete molinos se operaba con cuatro de ellos. La clasificación de concentrado remolido se realizaba en hidrociclones de 15" para asegurar una granulometría del concentrado final de 70% -325 mallas.

Circuito de Remolienda Cerro Casale (FS)

Durante los años 2010 a 2011 aproximadamente, se realizó una ingeniería que fue denominada Cerro Casale EPCM Joint Venture (CEJV). Participaron Fluor, Amec y Barrick Gold entre otros. El Proyecto Cerro Casale consideró una capacidad de tratamiento a una tasa de 160.000 t/d de mineral, a través de una planta que recuperaría cobre y oro.

La unidad de remolienda de concentrados se concibió con dos molinos de bolas de 5,5 m D x 12,2 m EGL, equipados con motores de 6,7 MW cada uno.

La **Figura 13** muestra un esquema del circuito de remolienda de Cerro Casale.

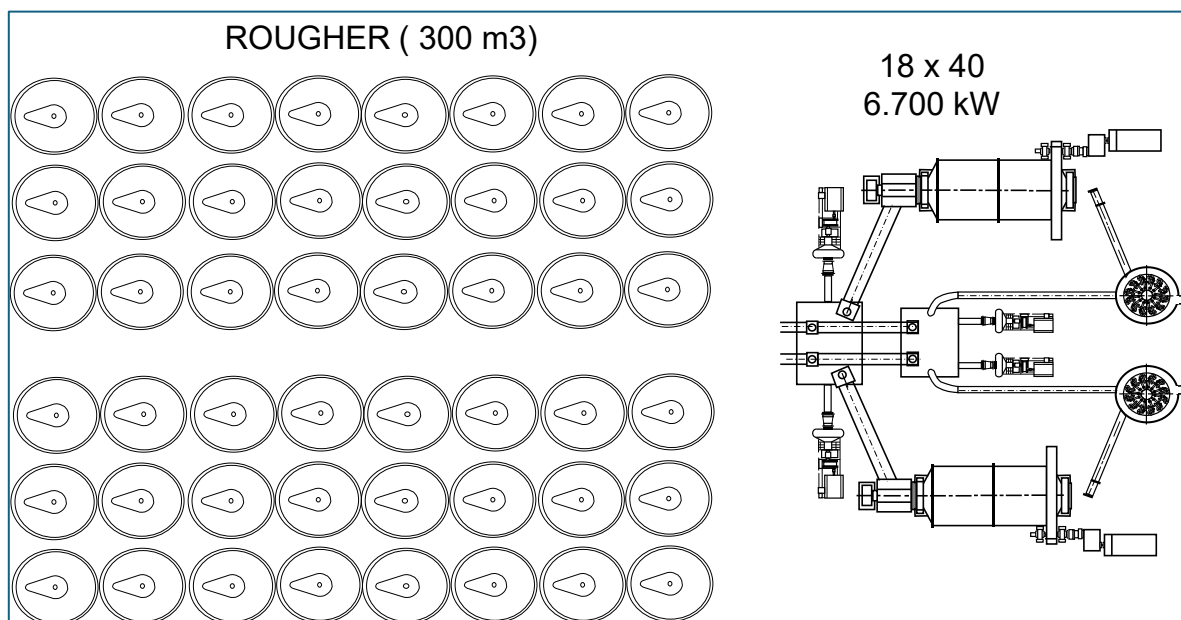


Figura 13: Circuito Remolienda Concentrados Cerro casale (FS)

La **Figura 14** presenta un esquema con los dos molinos de bolas de Cerro Casale. El consumo de energía específica de 10,8 kWh/t fue estimado con la fórmula de Bond (antes de correcciones), con un W_i de 13,47 kWh/t. Después de aplicar factores se asumió que la potencia requerida para una tarea de molienda desde un F_{80} de 120 micrones a un P_{80} de 30 micrones era de alrededor de 12.200 kW. Finalmente se seleccionó para cada molino un motor de 6.700 kW de potencia.

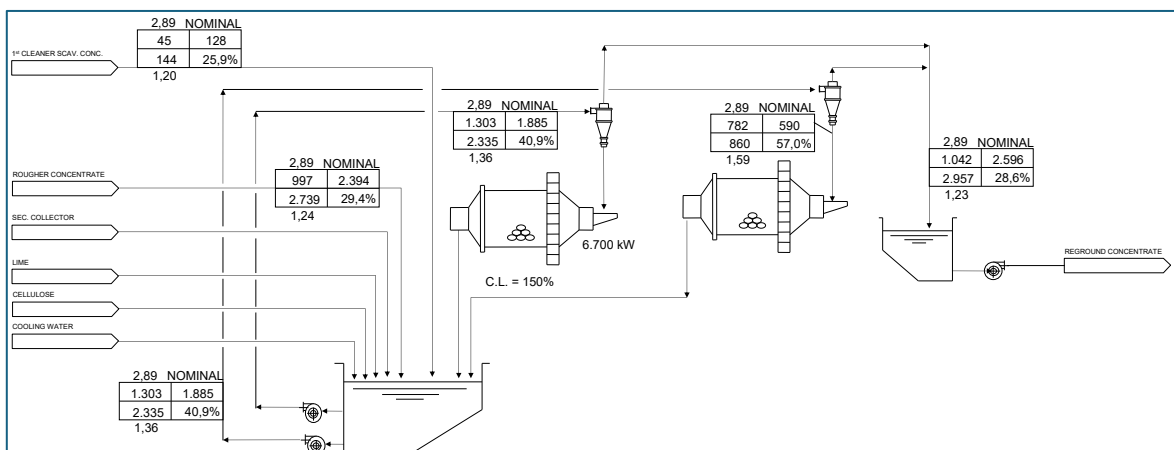


Figura 14: Esquema Circuito Remolienda Cerro casale

La **Figura 15** muestra una foto del modelo del circuito de remolienda del proyecto Cerro Casale.

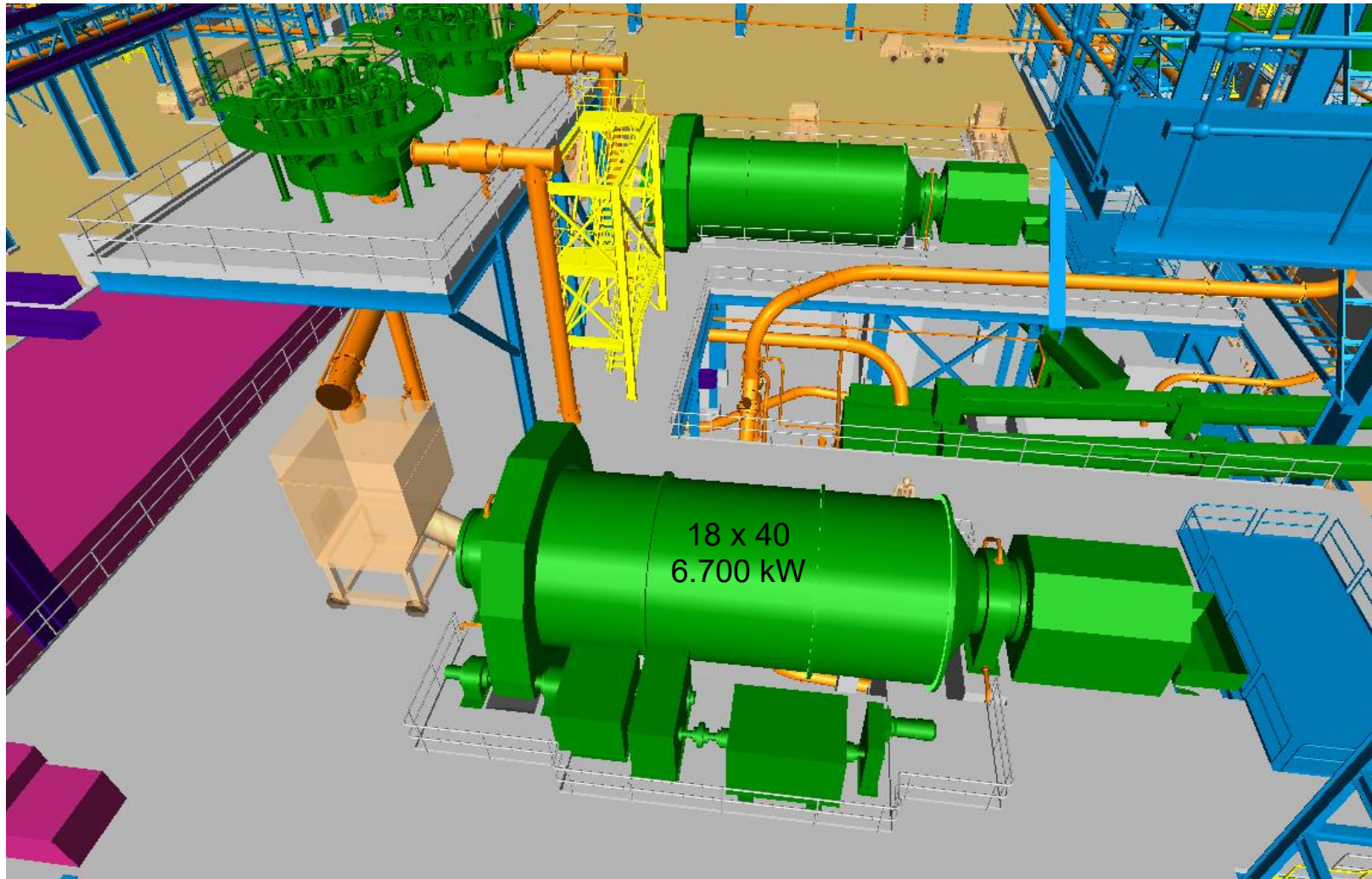


Figura 15: Foto Modelo 3D Remolienda Cerro Casale

Circuito de Remolienda Alumbreira

El Proyecto Bajo de la Alumbreira, estaba programado para el inicio de producción en enero de 1997. El diseño de Fluor se concibió para una tasa de diseño nominal de 80.000 t/d de mineral. Con unas leyes de cobre de 0,51% y de oro de 0,64 g/t tenía un “Life of Mine” (LOM) de 20 años. La mina, ubicada en Catamarca, Argentina, fue un importante Proyecto que operó desde 1997 hasta 2017.

La molienda consideró dos líneas, cada una con un molino SAG de 36 ft x 19 ft con accionamiento GMD⁶ de 13,4 MW, y dos molinos de bolas de 20 ft x 30 ft con accionamiento piñón corona con motor de 6 MW.

La flotación rougher consideró cuatro líneas paralelas de ocho celdas OK 100 cada una.

La **Figura 16** presenta un esquema de la flotación rougher y del circuito de remolienda del Proyecto Alumbreira.

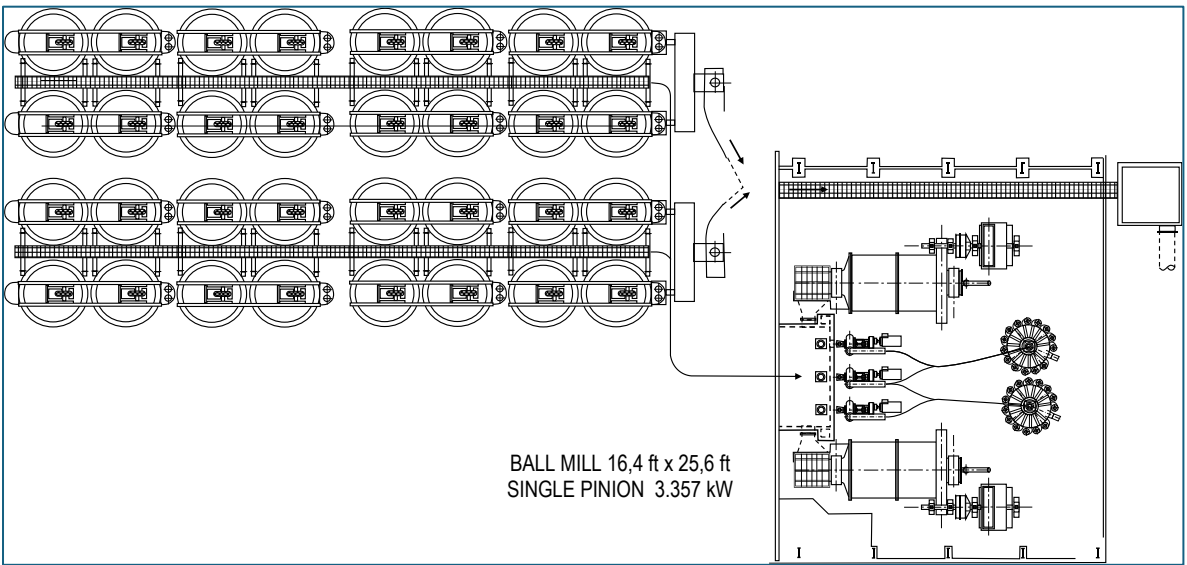


Figura 16: Circuito Remolienda Alumbreira

El circuito de Remolienda consideró dos molinos de bolas de 16,4 ft x 25,6 ft con accionamiento piñón corona con motor de 3,4 MW. La carga fresca a cada molino de bolas de remolienda con 277 t/h de sólidos de concentrado tenía por diseño un F_{80} de 150 micrones y un P_{80} de 40 micrones. El criterio de diseño en Rev. B que dispongo, no tiene dato del W_i de remolienda. Sin embargo, el W_i de molienda secundaria se reporta con un valor promedio de 11,11 kWh/t.

En esa fecha, todavía no estaba en forma definitiva, instalado el concepto de eficiencia energética. Quizás por esta razón circuitos de remolienda tales como Alumbreira, Los Colorados, y el Proyecto Cerro Casale, entre otros, fueron concebidos en base a molinos de bolas. Actualmente es usual incluir molinos verticales de mayores eficiencias energéticas para tareas de remolienda.

La **Figura 17** presenta un esquema con un corte del molino de remolienda del Proyecto Bajo de la Alumbreira. Se observa varios equipos debajo de la batería de hidrociclones. Se trata de un harnero estacionario y dos concentradores KNELSON, que descargan el concentrado hacia tote bins y el rechazo hacia la alimentación del molino de remolienda.

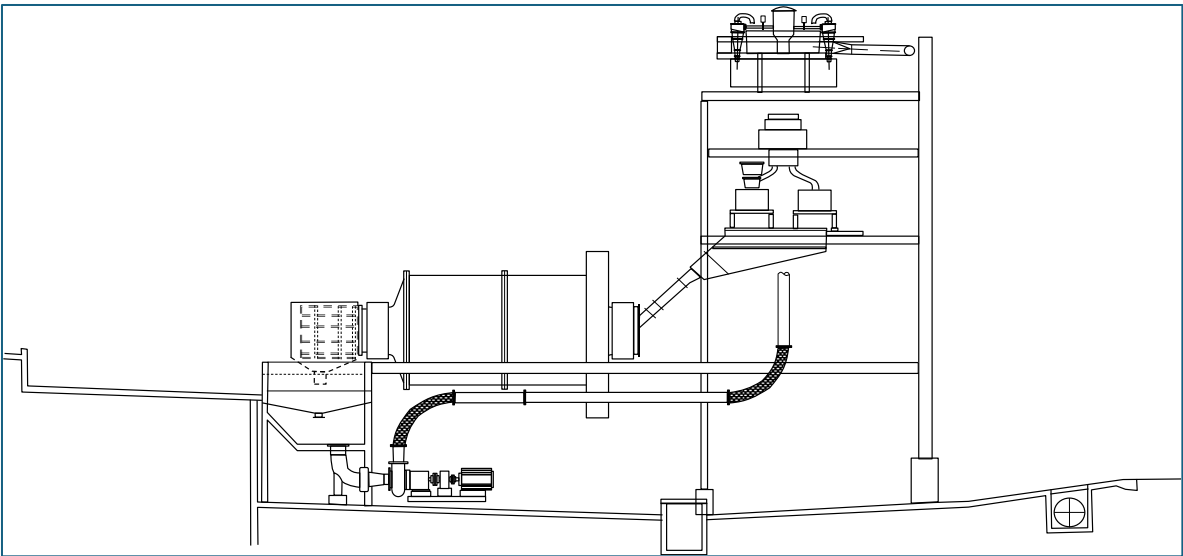


Figura 17: Corte Molino Remolienda Alumbreira

⁶ Un accionamiento “Gearless Mill Drive” (GMD) es un motor tipo anillo en que los polos están solidarios al flange del lado de alimentación del molino. Un estator anclado al piso rodea el conjunto de polos formando un anillo.

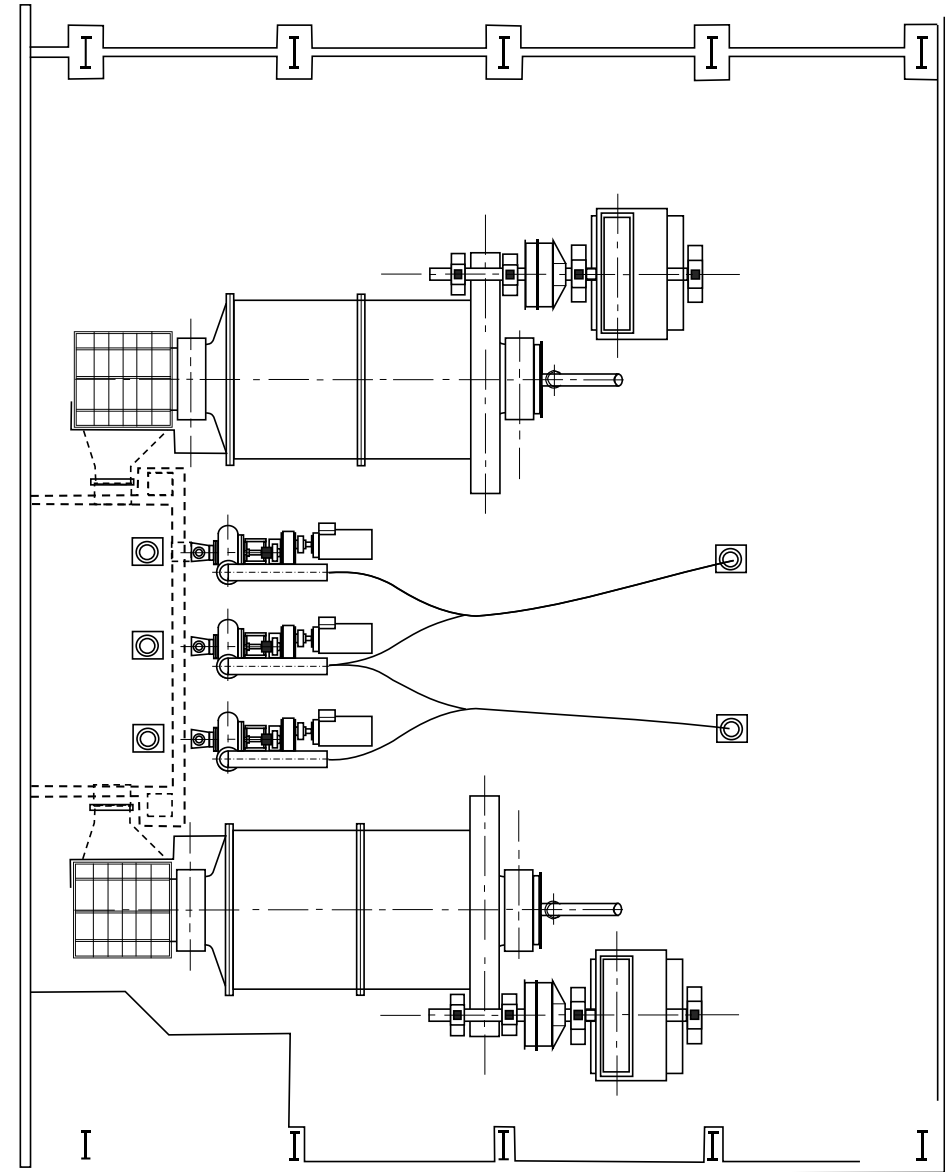


Figura 18: Planta Molinos Remolienda Alumbraera

Remolienda Sossego

Sossego es una concentradora ubicada en Brasil, la cual fue diseñada originalmente para una capacidad nominal de tratamiento de mineral de 41.096 tpd. Con una utilización de 93%, el tonelaje horario nominal es de 1.841 t/h. Sossego inició sus operaciones en 2004 tratando minerales de cobre básicamente calcopirita con pequeña presencia de bornita y calcosina. La ley de cobre original de 0,98% Cu y con contenido de oro del orden de 0,28 g/t.

La **Figura 19** muestra un esquema simplificado del circuito de flotación de Sossego.

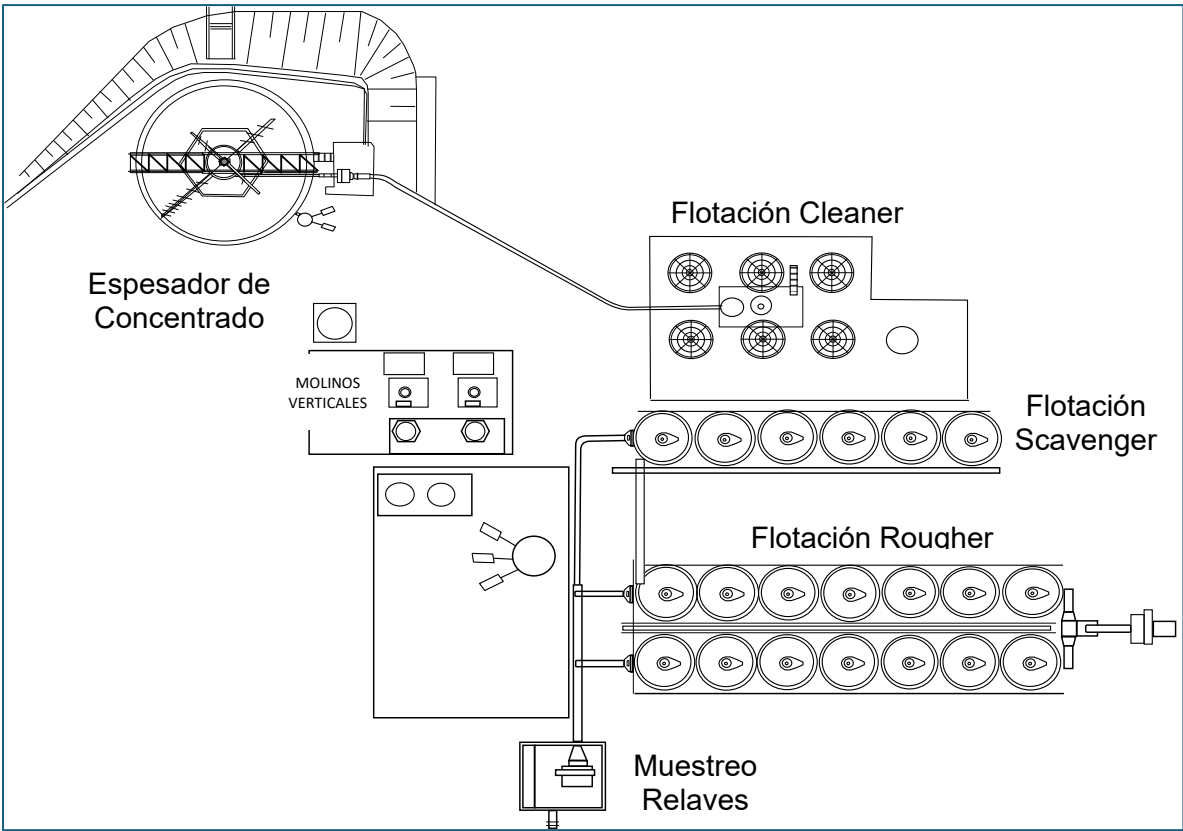


Figura 19: Arreglo General Planta de Flotación Sossego

Los concentrados rougher y Scavenger-Cleaner de flotación alimentan dos baterías de siete hidrociclones de 15” de diámetro. En la **Figura 20** se presenta un esquema simplificado del circuito de remolienda de Sossego, tal como fue diseñado originalmente.

Dos molinos verticales de 1.118 kW cada uno, operan con bolas de acero cromo de 19 mm de diámetro, con un consumo aproximado de 20 g/t de alimentación fresca.

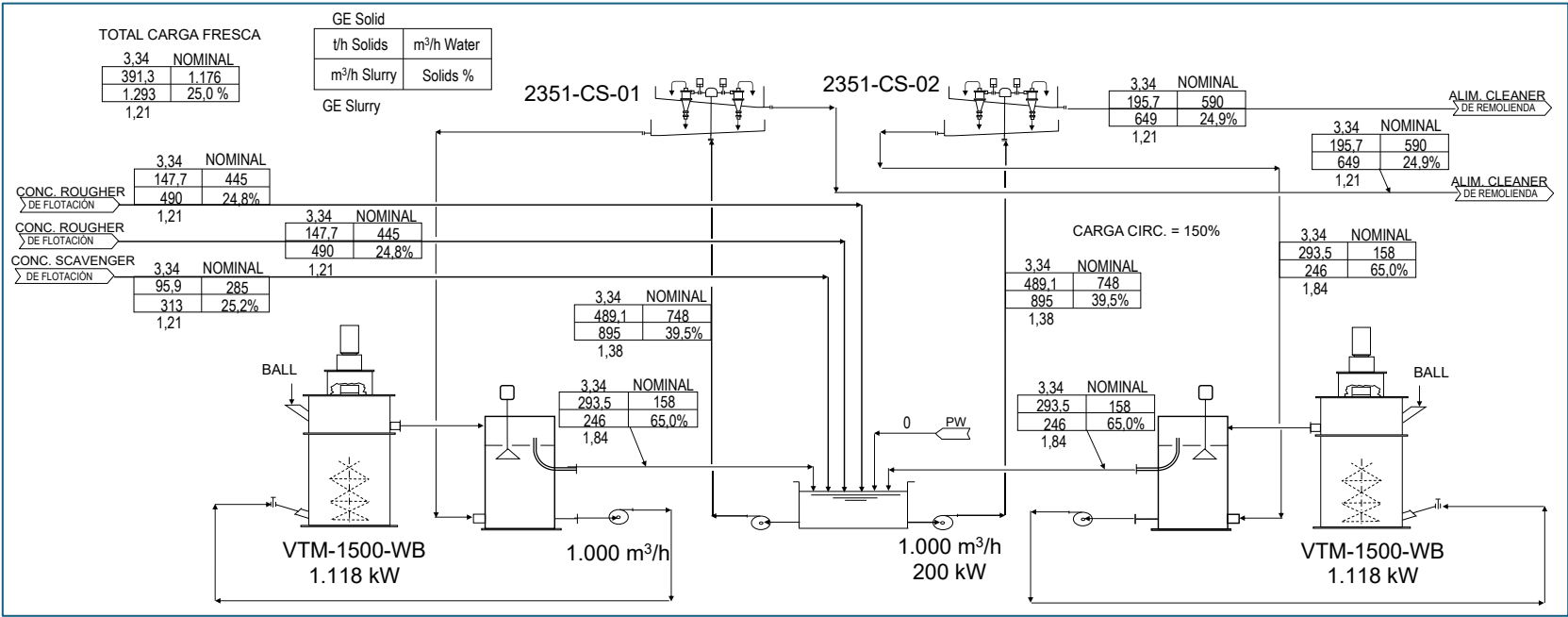


Figura 20: Diagrama de Flujo Simplificado Remolienda Sossego

Los principales temas de mantenimiento son las bombas de alimentación a la batería de hidrociclones y el tornillo de cada molino vertical, cada cual debe ser reemplazado cada 12 meses. En realidad, lo que se cambia son los revestimientos de la hélice, pero para efectos de continuidad operacional se saca la hélice completa y se reemplaza por una con sus revestimientos nuevos.

Para una producción⁷ de concentrados rougher y Scavenger de 244 t/h, el consumo específico de energía es de alrededor de 8,3 kWh/t al utilizar un 90% de la energía instalada.

Un artículo de Mauricio Guimarães Bergerman⁸ indica que estudios de benchmarking comparando datos industriales de Sossego y Maracá con alimentación a través de la parte superior del molino entregan productos más gruesos. Esta observación indica que los molinos verticales operando en circuito cerrado, entregan mejores eficiencias energéticas cuando son operados con la alimentación desde la parte inferior del molino.

⁷ Este dato de 243,5 t/h tomado desde el diagrama de flujo (D5-PR-CT002-BE-2351-60-1002-02-C), corresponde al balance de masa de Outokumpu, simulación MSS-FS-011.

⁸ IMPC-2014 Regrind of metallic ores with Vertical Mills: An overview of the existing plants in Brazil.

Otro artículo⁹ indica que, desde la puesta en marcha del circuito de molienda y flotación, los molinos verticales de remolienda nunca han sido un cuello de botella para el circuito de flotación.

El circuito de remolienda de Sossego fue proyectado a partir de ensayos de jarra por el fabricante de los molinos verticales. Dichos ensayos indicaron la necesidad de 6,0 kWh/t para llegar a un P₈₀ de 44 micrones con el mineral proveniente de la mina de Sossego y de 10,4 kWh/t para el mismo P₈₀ con mineral de la mina Sequeirinho.

La **Figura 21** muestra los estanques de flotación, las columnas de flotación de limpieza y al fondo los motores color amarillo de los molinos verticales de remolienda.



Figura 21: Circuitos de Flotación Sossego

En la **Figura 22** se muestra una foto de un molino vertical con la hélice en posición de entrada/salida del cuerpo del molino. Se observa, además, que la altura de la base es aproximadamente igual a la estatura de un trabajador.



Figura 22: Molino Vertical Sossego

⁹ IMPC 2013 New Delhi, India. Paper N° 298. Copper Concentrate regrind at Sossego >Plant using Vertical Mill – An Evaluation on the First yrs of Operation. Mauricio Guimaraes Bergerman et al.

Remolienda en Planta N° 2 de Las Tórtolas

Existen dos plantas de flotación colectiva y dos de flotación selectiva en la concentradora Las Tórtolas.

La planta de flotación N°1 de Las Tórtolas es para una capacidad nominal de 61.000 t/d de mineral y sus concentrados de flotación Rougher y Scavenger son conducidos a una planta de remolienda que incluye dos molinos de bolas. Los molinos de bolas de remolienda son Svedala de 12,5 ft x 27 ft, con motor de 2.000 HP de potencia cada uno. Si estimamos una producción de concentrados rougher y Scavenger de alrededor de 449 t/h y una toma de potencia de 95% de los molinos de bolas obtenemos un consumo de energía específica de 6,3 kWh/t.

La planta de flotación N°2 de Las Tórtolas es para una capacidad nominal de 87.000 t/d de mineral y sus concentrados de flotación Rougher y Scavenger son tratados en una planta equipada con tres molinos Vertimill de 1.500 HP cada uno. Si estimamos una producción de concentrados rougher y Scavenger de alrededor de 625 t/h y una toma de potencia de 95% de los molinos de bolas obtenemos un consumo de energía específica de 5,1 kWh/t.

La **Figura 23** presenta un diagrama de flujo de la planta de remolienda de concentrados de la concentradora N°2 de Las Tórtolas. En dicho esquema se aplica una notación que es típica en este trabajo en el sentido de representar los valores de balance nominal de masa con la notación siguiente:

GE Solid

t/h Solids	m³/h Water
m³/h Slurry	Solids %

GE Slurry

Como es bastante típico en concentradoras de cobre, la alimentación al circuito de remolienda de la planta N°2 de remolienda de Las Tórtolas, está constituido por los concentrados Rougher y Scavenger¹⁰.

La carga circulante, como hemos notado anteriormente, aunque depende de caso a caso, normalmente para efectos de diseño se considera una cifra de 150%, para una remolienda en circuito cerrado con clasificación con hidrociclones.

Se debe tener la precaución de no tentarse con la idea de implementar un circuito abierto si la flotación requiere de una buena liberación o si el concentrado final debe ser conducido con transporte hidráulico de sólidos a través de una cañería hacia un puerto lejano.

Al observar la **Figura 23** se puede notar que la descarga de los hidrociclones es alimentada a los molinos verticales por la parte superior. Esto ahorra energía por la altura de las baterías de hidrociclones, pero se postula y es lógico pensar que un molino vertical con flujo en contracorriente gravitacional y con transporte de sólidos con la hélice del molino trabajará en forma óptima si la alimentación de gruesos se realiza desde la parte inferior del molino. Y en efecto, esta disposición de ingresar los gruesos por la parte inferior del molino es una práctica común en circuitos de remolienda con molinos verticales.

La **Figura 24** presenta un esquema simplificado de los circuitos de flotación primaria, de barrido y de remolienda de la planta concentradora N°2 de Las Tórtolas.

¹⁰ La etapa de flotación denominada “Scavenger” se refiere u un circuito de barrido de las colas de otras etapas de limpieza.

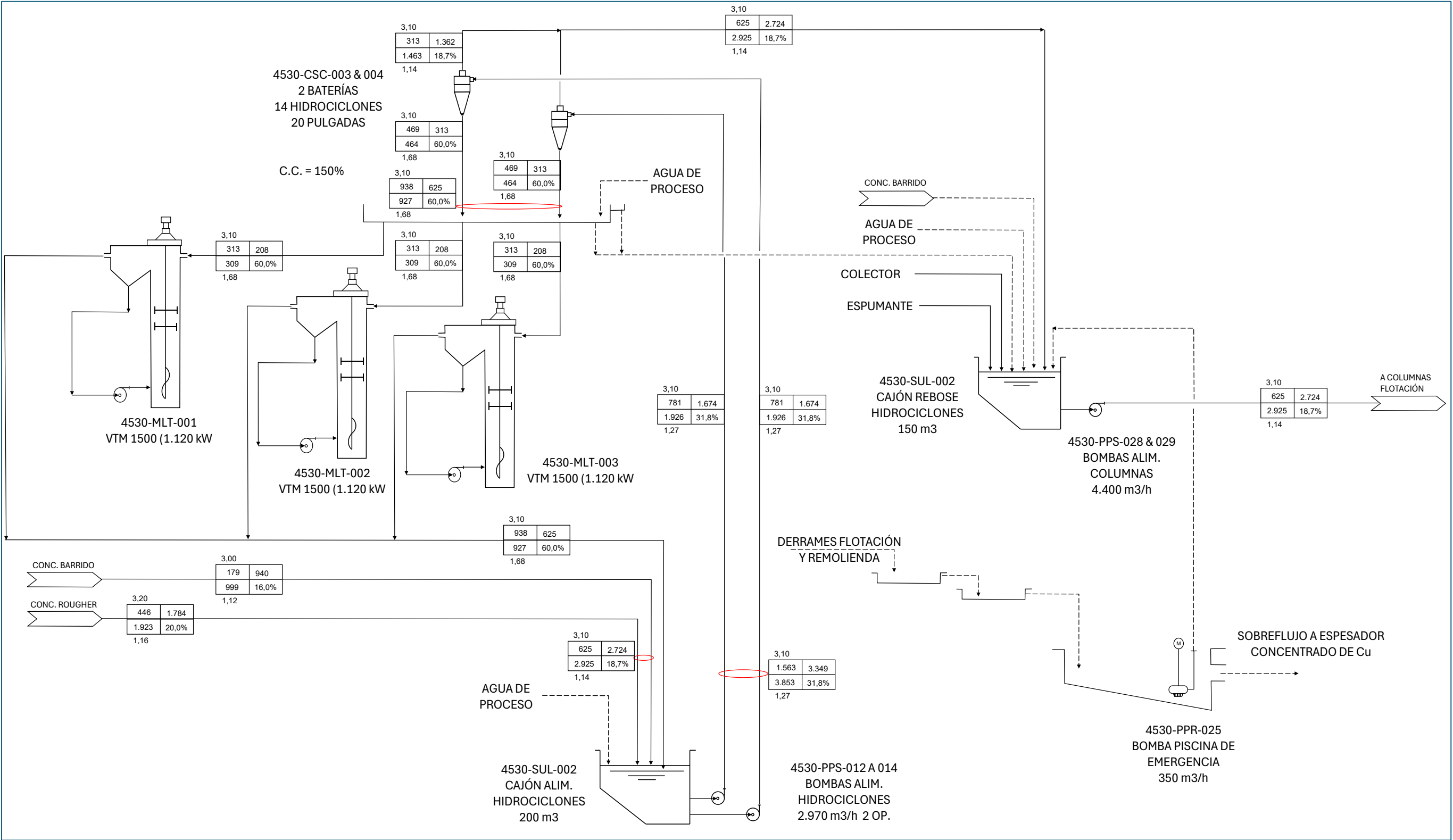


Figura 23: Diagrama de Flujo Planta Remolienda Las Tórtolas 2

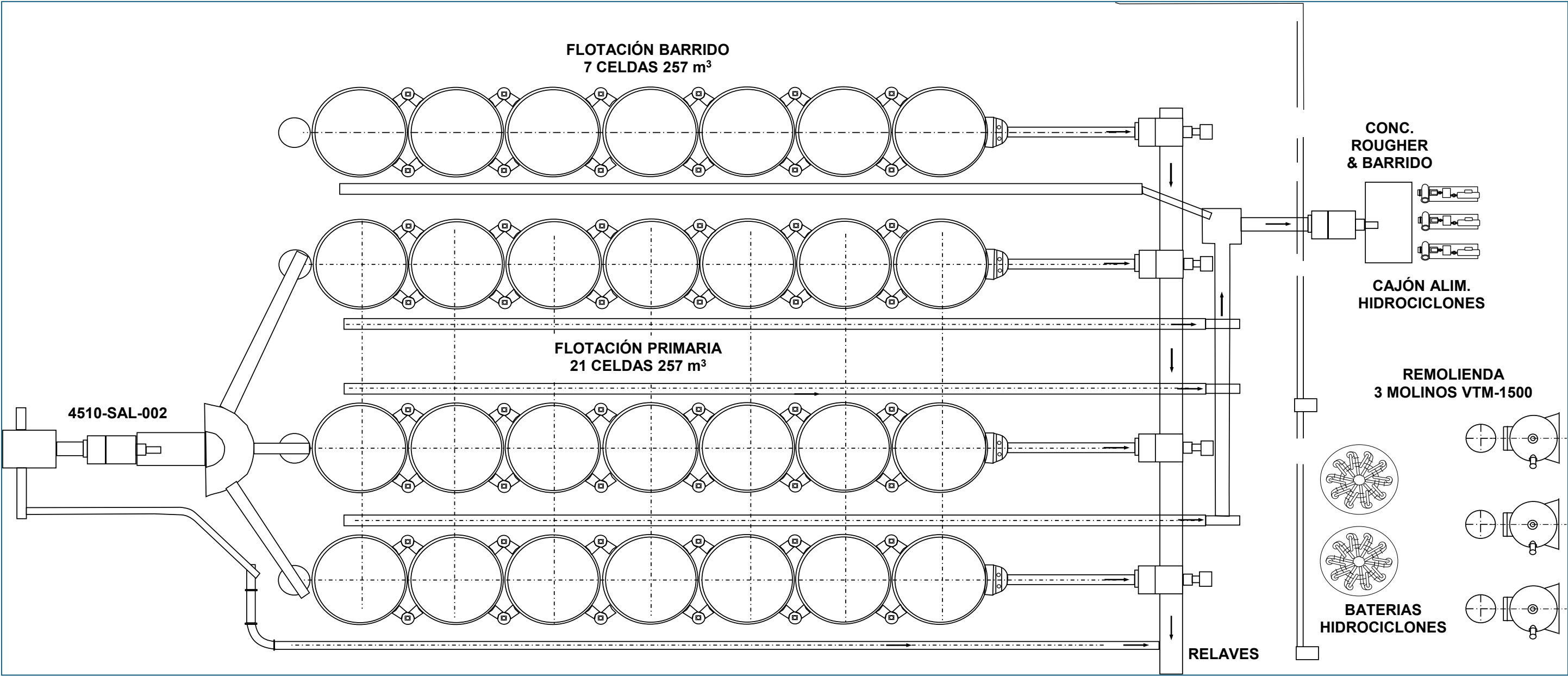


Figura 24: Esquema Simplificado Disposición General Flotación Rougher y Remolienda Planta 2 Las Tórtolas

Remolienda Concentradora Antamina

Antamina es una mina en Perú que produce concentrados de cobre, zinc, bismuto y molibdeno. Es uno de los mayores productores peruanos de concentrados de cobre y zinc.

La ingeniería del proyecto original de Bechtel, contempló una capacidad nominal entre 70 kt/d y 100 kt/d, dependiendo del tipo de mineral a tratar. Se trabaja por campañas y los minerales disgregados reportan mayores capacidades de tratamiento. Posteriormente se llevó a cabo una ampliación de capacidad de tratamiento a una tasa nominal de 130 kt/d.



Figura 25: Fotografía Concentradora Antamina

La **Figura 26** presenta un esquema de planta de la flotación rougher y Scavenger, y la remolienda del circuito de flotación de cobre de Antamina. A pesar de la ampliación y de la necesidad de agregar otro molino de remolienda con la ampliación a 130 kt/d, se mantuvieron solamente los dos molinos Vertimill VTM 1000 de la fase original.

La **Figura 27** muestra un esquema del diagrama de flujo del circuito de remolienda de concentrado de cobre de Antamina. Se observan dos VTM 1000. Para una carga fresca total, nominal, de 383 t/h, el consumo específico de energía es de 3,51 kWh/t. Obviamente muy bajo.

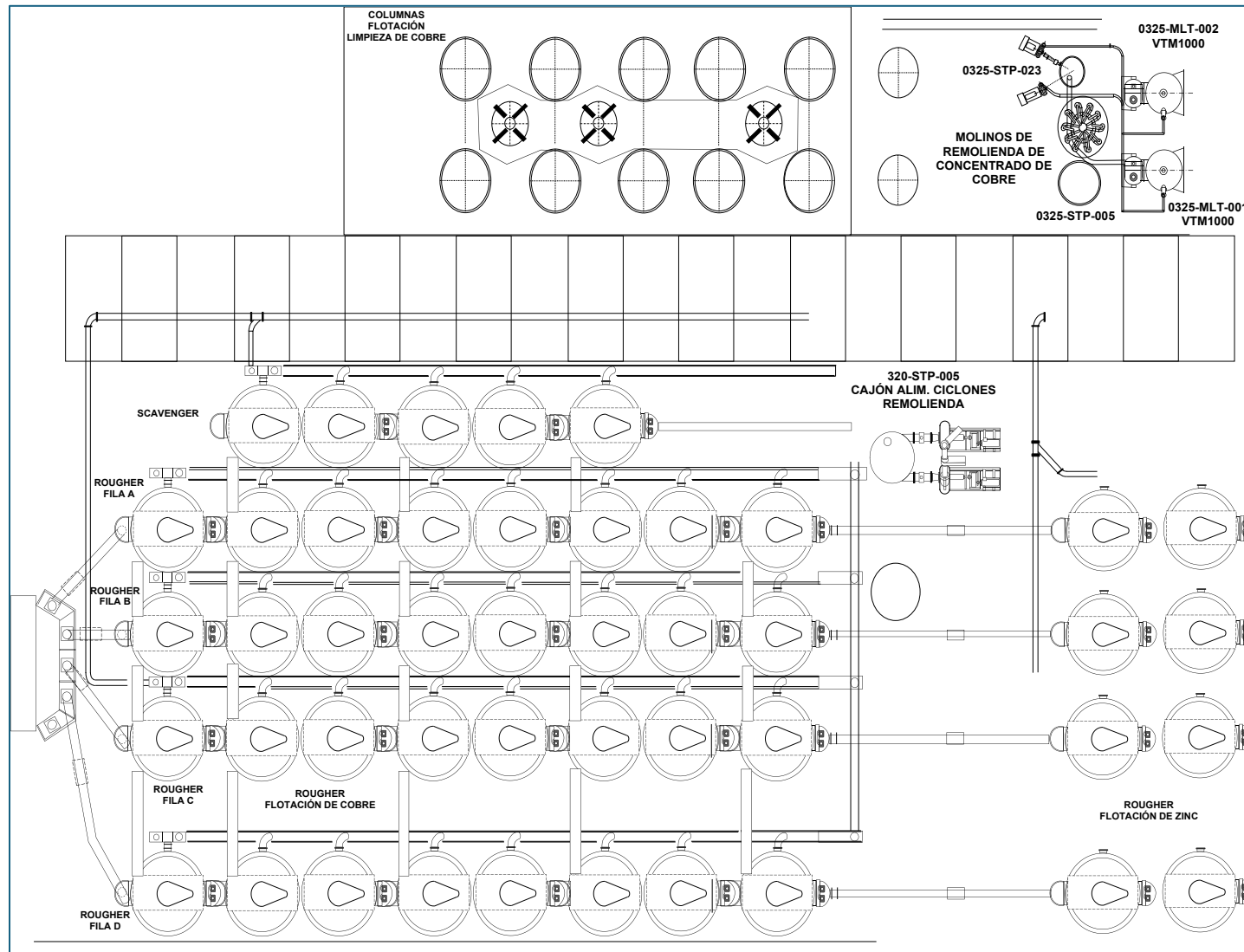


Figura 26: Esquema simplificado Planta Flotación y Remolienda de Concentrados de Cobre Antamina

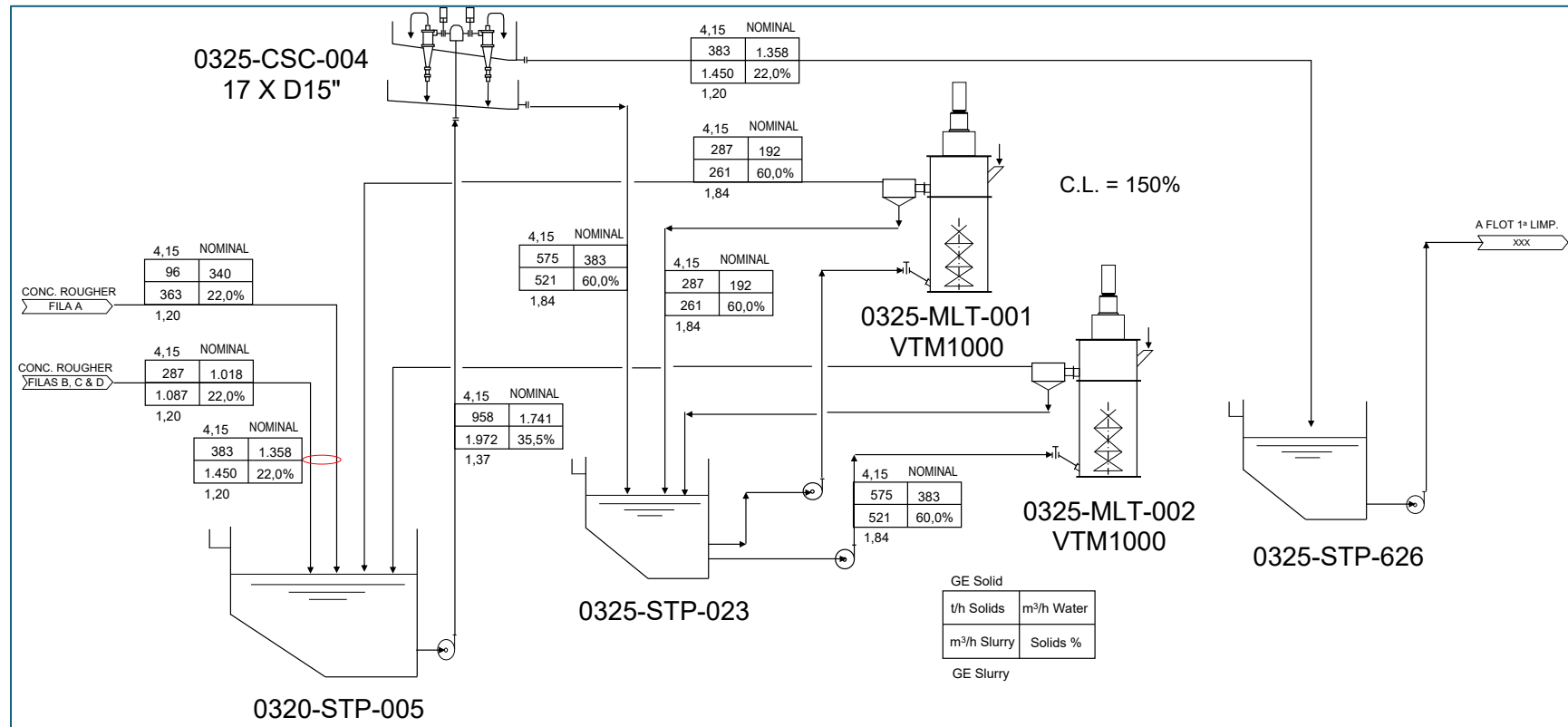


Figura 27: Esquema Diagrama de Flujo Circuito Remolienda de Cobre Antamina

Cabe hacer presente que, a pesar de haber considerado un molino adicional para el circuito de cobre, y un molino adicional para el circuito de zinc, durante la ampliación a 130 kt/d, finalmente no se consideraron dichas ampliaciones de capacidad de remolienda. Esto puede observarse al dividir la potencia instalada por el tonelaje de concentrado a remolienda, lo que entrega valores de consumos específicos de energía muy bajos.

Remolienda Concentradora Pelambres 85 kt/d

En el año 1998 se diseñó la concentradora de MLP para 85 kt/d en una ingeniería de Bechtel-Cade Idepe. Por esos años, se acostumbraba a designar como “availability” el “Run Time” o tiempo efectivo de operación de un circuito. Dicho tiempo era usual, como dato de ingeniería, a emplear la cifra de 92% de tiempo efectivo diario de operación. De este modo, 85.000 t/d dividido por 0,92, da 3.850 t/h de mineral y esa cifra se consideraba una capacidad nominal de la planta. Hoy se usa, más bien, el concepto de utilización efectiva y se debe negociar con el cliente una cifra. Esto porque mucho después del “Ramp-up” el cliente con su equipo de operaciones y de mantenimiento pueden alcanzar cifras superiores, pero para diseño es más conservador usar no más allá de 93% de utilización. El diseño original de 85 kt/d fue largamente superado durante la operación de esta planta original. Es así como se alcanzaron capacidades de alrededor de 110 kt/d, lo que representó un aumento de casi un 130%. Es anecdótico señalar que el reductor del accionamiento de una de las bombas “bajo molino¹¹” falló en esa condición de operación. Es un tema discutible si un reductor debe tener un factor de diseño de 1,3 por encima de su carga nominal. En todo caso, el reductor con falla fue reemplazado a costo del proveedor del sistema de accionamiento de la bomba bajo molino que presento el problema.

El circuito original consideró una planta de molienda con dos molinos SAG de 36 ft x 17 ft, con accionamiento GMD de 14,92 MW, cada molino SAG trabajando con dos molinos de bolas de 21 ft x 33 ft con accionamiento piñón corona de 7.830 kW, cada uno.

En la **Figura 28** se muestra un esquema del circuito original de molienda de MLP. Este circuito, en el diagrama de flujo de Bechtel - Cade Idepe, de 1998, señala que los pebbles serían extraídos “a futuro”. El diseño incluyó un cañón de agua para retornar los pebbles al interior de cada molino SAG. Esta solución también se implementó en el circuito original de Minera Antamina, con cañón de agua para retorno de pebbles.

El circuito de MLP, para 85 kt/d, utilizó para efectos de diseño, un “run time” de 92%, cifra que era casi un estándar para la época.¹² De este modo, la capacidad instantánea del circuito de molienda queda en 3.850 t/h en total, con ambos molinos SAG en servicio.

¹¹ En la jerga de bombas centrífugas de gran tamaño, para pulpas gruesas y de elevados porcentajes de sólidos, que alimentan las baterías de hidrociclones de molienda secundaria, se denomina a dichas bombas como “bombas bajo molino”.

¹² Una vez más quiero recordar que en la década de los años 80 muchas empresas de ingeniería utilizaban el término “availability”, con valor de 92%, para pasar desde una capacidad “nominal” de toneladas por día a una capacidad nominal de toneladas por hora. Actualmente se utiliza el término “run time” o utilización efectiva para dividir el tonelaje diario por 24 horas y por dicha utilización en tanto por uno. Esto es, en mi concepto, una especie de factor de diseño, ya que para circuitos de molienda no se usan factores de diseño mayores a la unidad. Los molinos deben ser diseñados con capacidad “fit for purpose”, es decir, constituyen el cuello de botella por definición.

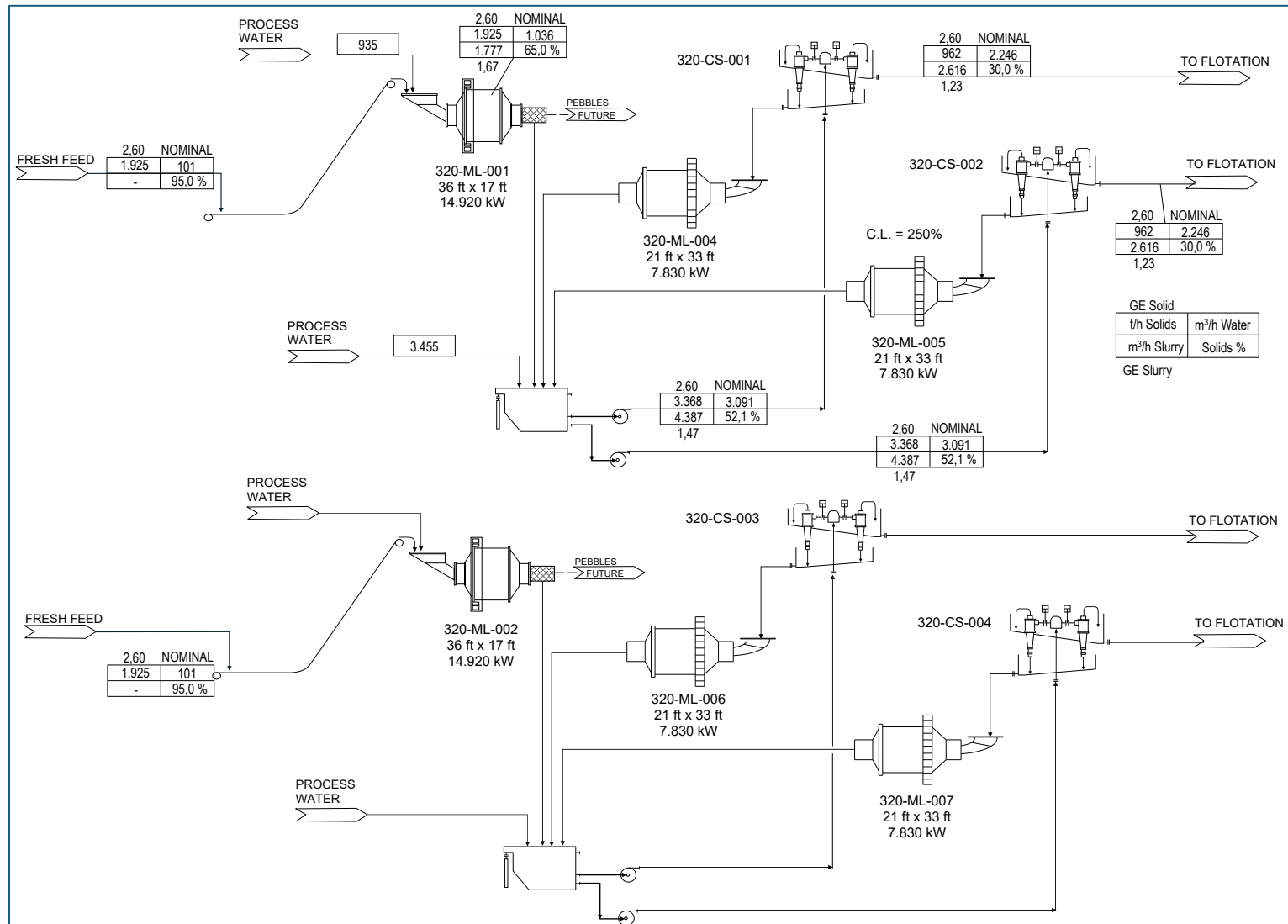


Figura 28: Esquema Diagrama de Flujo Circuitos de Molienda Diseño MLP 85 ktpd

La **Figura 29** presenta un esquema simplificado del circuito de remolienda del proyecto original de 85 kt/d de Minera Los Pelambres.

En la **Figura 29** se muestra que la suma de los concentrados Rougher más el concentrado Scavenger es 715 t/h. Con un Work Index métrico de 12,7 kWh/t, y una tarea de remolienda desde 121 micrones a 55 micrones, usando la fórmula de Bond sin factores obtenemos una potencia necesaria de 3.998 kW. Si aplicamos un factor arbitrario de ahorro de energía por concepto de uso de molino vertical, de 45%, se requiere una potencia de 2.199 kW. Con dos molinos verticales de 750 kW cada uno, es decir con 1.500 kW de potencia instalada, estamos cortos según esta aproximación, incluso utilizando el 100% de dicha potencia instalada. Esta aproximación indica que, si las condiciones anteriores se mantienen, pero el producto final, P_{80} es de 70 micrones, los dos molinos VTM de 750 kW operando a 95,5% de toma de potencia serían capaces de tratar 715 t/h de concentrado.

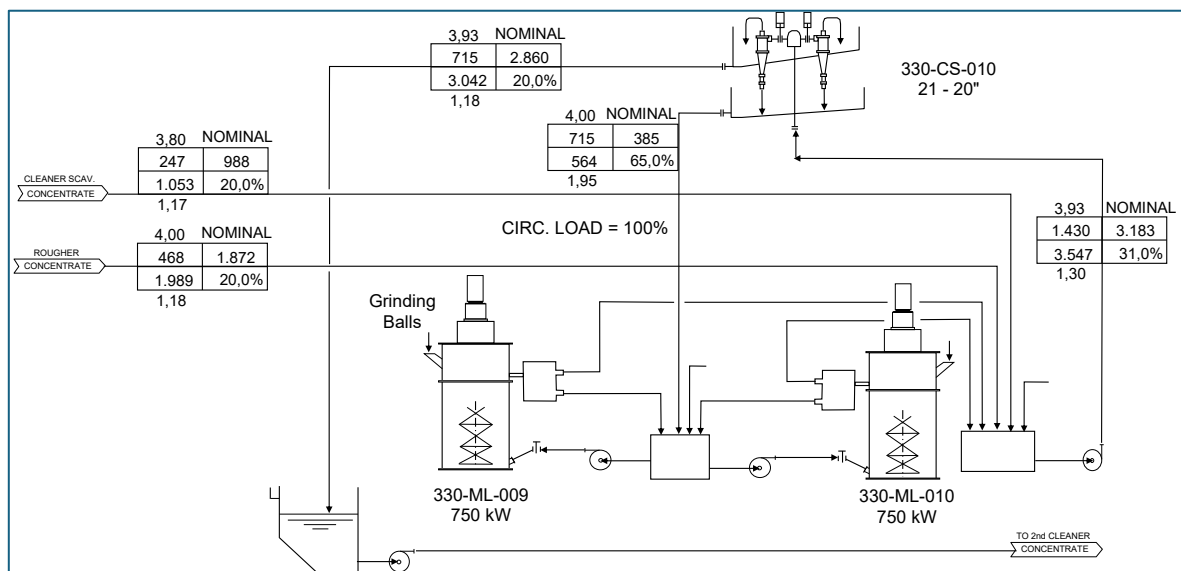


Figura 29: Circuito Original Remolienda Minera los Pelambres (85 kt/d)

En la actualidad, MLP ha realizado ampliaciones, tanto en sus circuitos de molienda, como los de flotación, y el circuito de remolienda cuenta con cuatro molinos verticales y el producto tiene un P_{80} de 70 a 75 micrones.

Remolienda Concentradoras Chuquicamata

Codelco, División Chuquicamata, dispone de tres áreas de concentración denominadas A-0, A-1 y A-2.

- La planta A-0, con una molienda convencional de la década del 50, tiene una capacidad de tratamiento de 70 kt/d.
- La planta A-1, con una molienda convencional de la década del 70, tiene una capacidad de tratamiento de 34 kt/d.
- La planta A-2, con una molienda SAG y molinos de bolas, empieza a operar a fines de la década del 80, con una capacidad de 78 kt/d.

En total las plantas concentradoras de Chuquicamata tienen una capacidad de 182 kt/d. Es necesario destacar que la Mina Radomiro Tomic es capaz de alimentar la planta concentradora de Chuquicamata por medio de un sistema de chancado primario y correa transportadora con una capacidad de 100 kt/d.

Es necesario recordar que las concentradoras siempre oscilan en su capacidad de tratamiento de mineral. Es así como, por ejemplo, en 2021 La planta concentradora Chuquicamata trató un promedio de 172 kt/d de mineral.

La planta de remolienda de Chuquicamata, data del año 1952 y debido a un gran nivel de interferencias, alta tasa de fallas de los molinos, congestionamiento de cañerías y estructuras, se decidió diseñar y construir una nueva planta de remolienda de concentrados. Esta antigua planta de remolienda estaba equipada con 12 molinos de bolas de 300 HP y dos molinos de bolas de 1.750 HP, para procesar los concentrados a remolienda de las plantas A-0, A-1 y A-2.

Debido a lo anterior, la División Chuquicamata desarrolló un proyecto para reemplazar esta planta de remolienda, por una nueva, con molinos verticales. Estos molinos verticales del tipo “Vertimill”, fueron adquiridos a CITIC, una empresa china fabricante de molinos de casi todos los tipos y tamaños. Citic Heavy Industries con más de 50 años en la industria de la minería y del cemento, arma y prueba sus equipos en su propia fábrica.

Los molinos verticales Citic suministrados a la División Chuquicamata son modelo CSM-1500 de 1.500 kW de potencia y alrededor de 250 toneladas de peso cada uno.

A la fecha de escribir este documento, el autor tiene dudas acerca del verdadero modelo de molino vertical que fue suministrado a la División Chuquicamata para el proyecto de reemplazo de molinos de remolienda. Por ejemplo, algunas informaciones disponibles indican que los molinos son modelo CSM-1500, o sea de 1.500 kW de potencia. Sin embargo, otras informaciones indican que el modelo es CSM-1200, o sea de 1.200 kW de potencia.

En la **Figura 30** se presenta un esquema simplificado del diagrama de flujo del nuevo circuito de remolienda de la División Chuquicamata de Codelco.

Además, del mejor arreglo general del nuevo circuito, se produce un ahorro de energía por la mayor eficiencia de molienda de los molinos verticales.

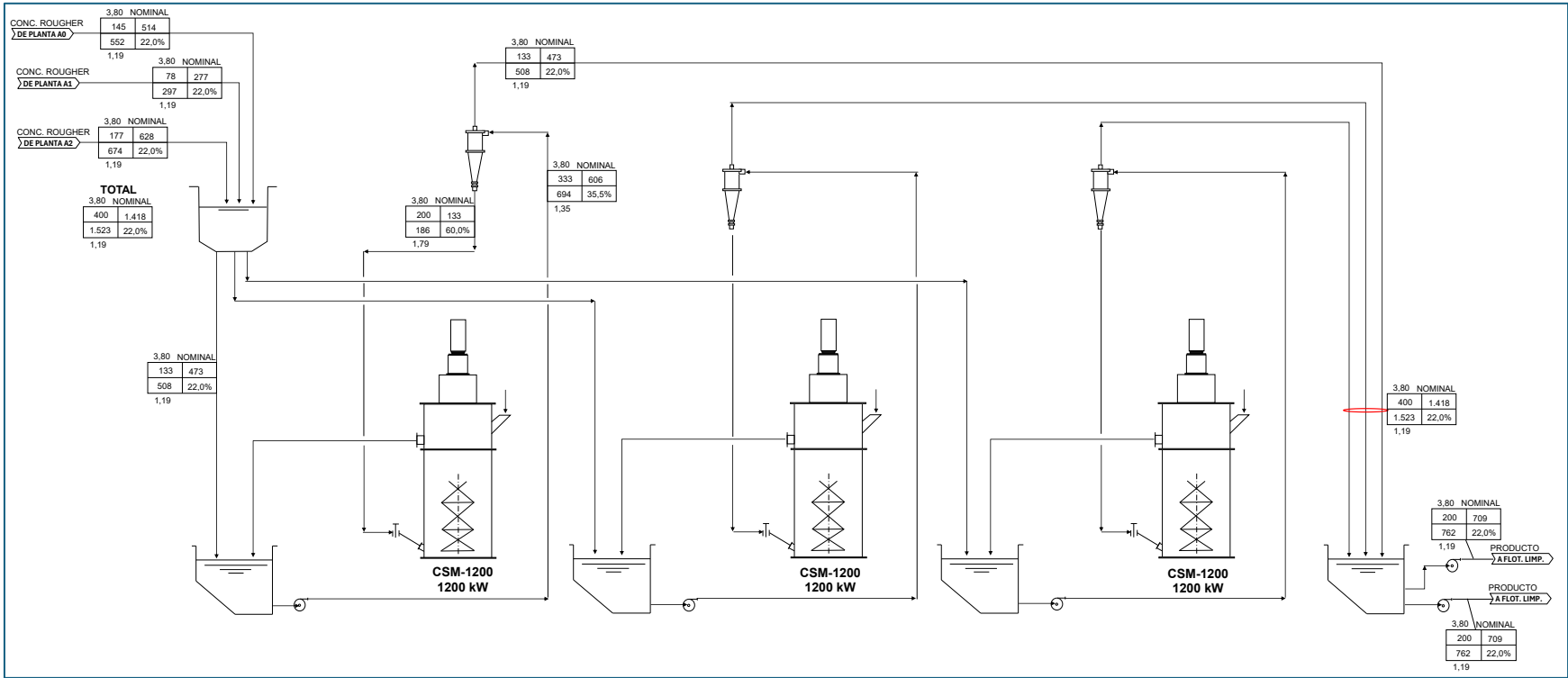


Figura 30: Esquema simplificado Diagrama de Flujo Circuito Remolienda Chuquicamata

Remolienda Laguna Seca Minera Escondida

Laguna Seca de Escondida es la segunda concentradora instalada en la mina Escondida. La primera concentradora, denominada Los Colorados, inició operaciones en la década de los 80.

Laguna Seca es una concentradora cuyo diseño original contempló una capacidad de 110 kt/d. Incluye un molino SAG de 38 ft x 20 ft con un accionamiento tipo GMD de 19,4 MW de potencia y tres molinos de bolas de 25 ft x 40 ft con accionamiento GMD de 13,4 MW cada uno.

Para la remolienda se incluyó un circuito con cuatro molinos verticales de 1.120 kW de potencia instalada cada uno. El criterio de diseño contempló una tarea de remolienda con un tamaño de alimentación, F_{80} de 120 a 140 micrones. El producto especificado fue de un P_{80} de 80 a 100 micrones.

La clasificación del circuito cerrado de remolienda incluyó tres baterías de hidrociclones con nueve hidrociclones de 20", de los cuales, para 110 kt/d se consideraron seis hidrociclones operando por cada batería.

La **Figura 31** presenta un esquema de planta de los molinos verticales de Laguna seca.

La **Figura 32** muestra un esquema del circuito de remolienda de concentrados de Laguna Seca.

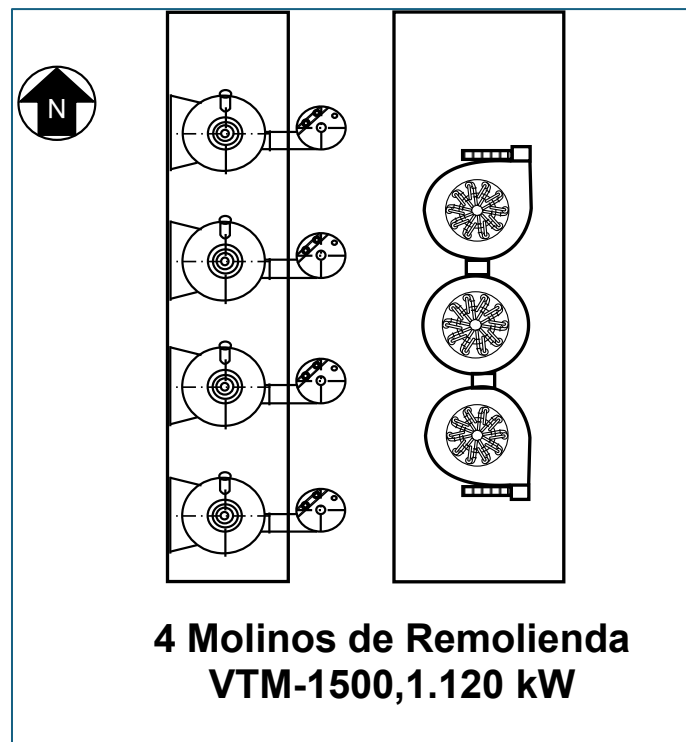


Figura 31: Esquema de Planta Molinos Verticales Laguna Seca

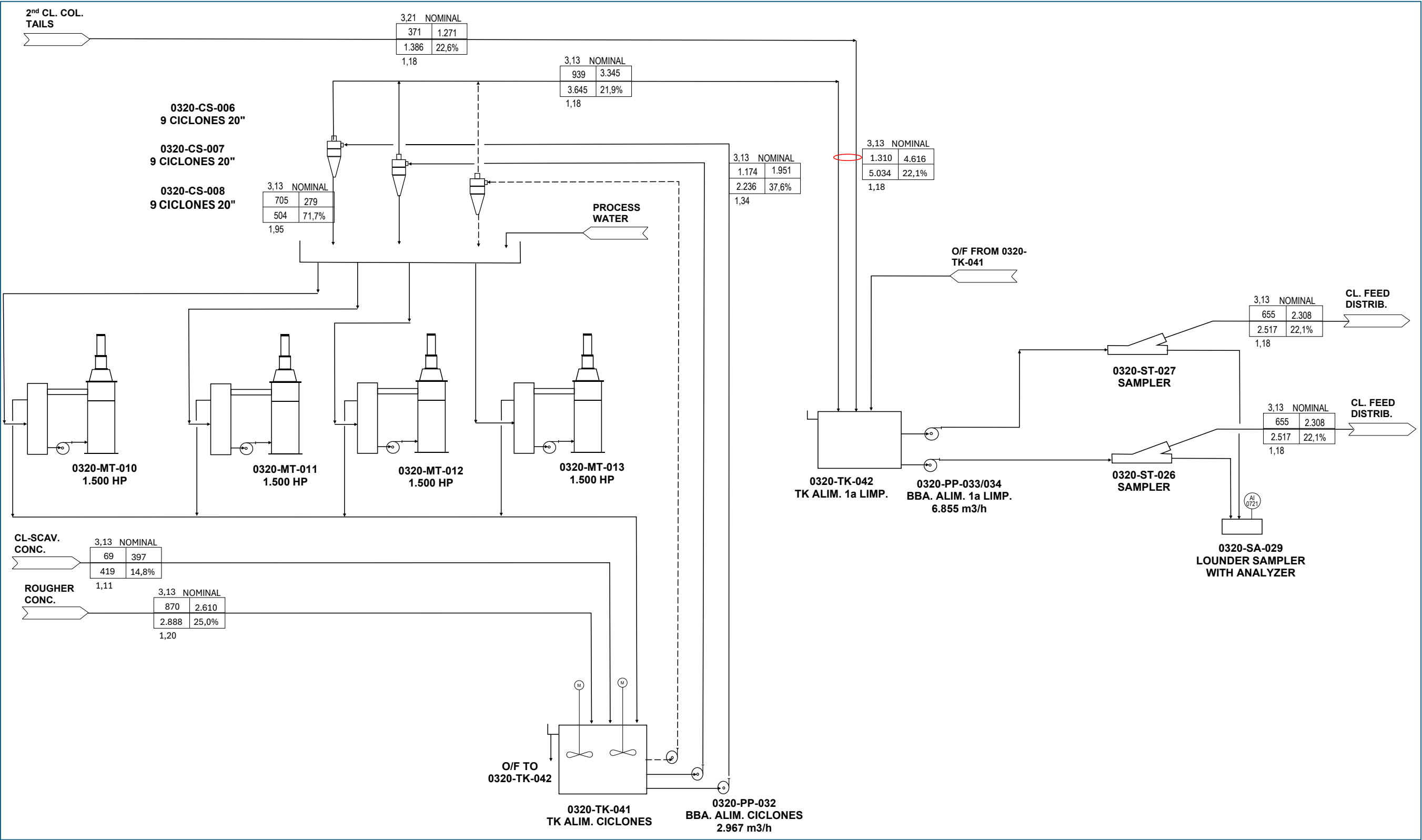


Figura 32: Esquema del Diagrama de Flujo del Circuito de Remolienda de Laguna Seca

La aproximación de Fred Bond fue desarrollada para un molino de bolas de 8 pies de diámetro y no se considera que pueda aplicarse directamente a un molino vertical. Por otra parte, el Work Index para molino de bolas (WIMB) podría ser diferente para los concentrados, con respecto al mineral. Sin embargo, algunos autores usan este sistema aplicando un factor global de mayor eficiencia de molienda para molinos verticales, valor que fluctúa entre 30 a 40%. Es decir, un molino vertical se supone que debería necesitar solamente entre el 60 a 70% de la potencia para una tarea de molienda con respecto a un molino de bolas.

Si usamos un WIMB de 13,9 kWh/t (métrico), y una tarea de molienda con un $F_{80} = 120 \mu\text{m}$, y un $P_{80} = 80 \mu\text{m}$; se tiene que, sin factores, se requeriría una energía específica de 2,85 kwh/t. Este valor multiplicado por la carga fresca a remolienda, de 939 t/h, nos entrega una potencia necesaria de 2.678 kW lo cual no nos hace sentido (por su valor muy bajo).

Si tuviera sentido utilizar este método debemos pensar en un $F_{80} = 130 \mu\text{m}$, y un $P_{80} = 45 \mu\text{m}$; lo cual con un BMWI de 13,9 kWh/t y sin factores, nos entrega una energía específica para molino de bolas de 8,53 kWh/t. Esto comparado con cuatro molinos verticales VTM-1500 de 1.120 kW de potencia instalada cada uno; y considerando una toma de potencia de 90%, los cuatro molinos verticales pueden entregar una potencia de molienda de 4.032 kW lo que representa alrededor de un 50% de la potencia de molino de bolas para 939 t/h de concentrado.

Las consideraciones anteriores muestran lo arbitrario que resulta tratar de usar el método de Bond para estimar la potencia de molinos verticales. En realidad, Bond no fue desarrollado para molienda en molinos verticales. Es por esta razón que se usan las pruebas tipo “Jar test” para molinos verticales, pruebas que son propietarias de Metso. La **Tabla 1** presenta algunas discrepancias entre los requerimientos de energía estimada por proveedores versus los requerimientos de energía medidos en planta.

El autor de este trabajo ha observado muchos proyectos que especifican en su diseño, una cantidad muy baja de requerimientos de potencia para remolienda. No es el caso del diseño de la planta de remolienda de Laguna Seca.

Remolienda Los Colorados Minera Escondida

La concentradora Los Colorados de Minera Escondida partió en el año 1990. El diseño original de Fluor Daniel fue para una capacidad de 35 kt/d. La planta concentradora Los Colorados ha funcionado como escuela para muchos ejecutivos y funcionarios de Escondida según Minería y Futuro de 15 de marzo de 2024. En verdad, también fue una escuela para muchos ingenieros chilenos que estuvieron involucrados en su diseño, construcción y precomisionamiento.

Varias ampliaciones de capacidad fueron desarrolladas por Fluor Daniel hasta la etapa denominada 3.5, en que los operadores y ejecutivos de MEL decidieron migrar hacia Bechtel para sus futuras concentradoras, tales como Laguna seca y luego OGP1.

La disposición de la planta de molienda con molinos SAG y de bolas de Los Colorados utilizó una configuración de molinos “side by side”, tal como puede apreciarse en la **Figura 33**, donde se presentan hasta la etapa 3.5.

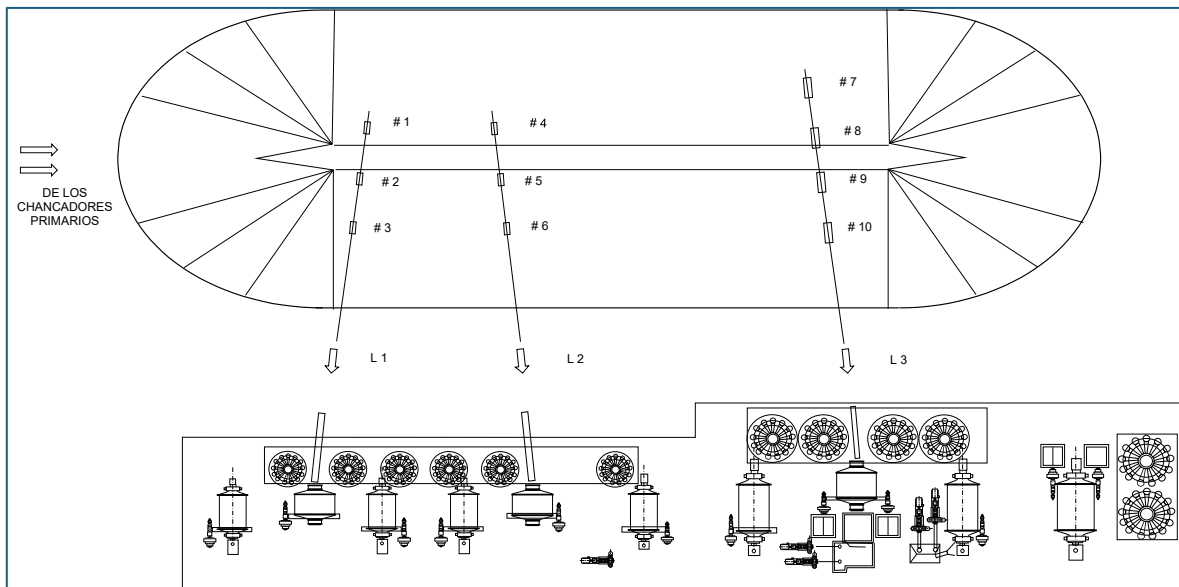


Figura 33: Esquema simplificado de la planta de molienda de Los Colorados

En esa época muchos ingenieros no teníamos las herramientas para diseñar un acopio de gruesos “Coarse Ore Stockpile” (COS). El resultado fue que las ventanas de extracción de los alimentadores de las correas para los molinos SAG, al parecer, no estaban sintonizadas con la naturaleza del mineral a manejar. Actualmente existen empresas especializadas en manejo de materiales, tales como Jenike and Johanson y TUNRA Bulk Solids Handling Research Associates.

La formación de “rat holes¹³” obliga a usar bulldozers para empujar la carga y así poder mantener una alimentación más fluida a las correas de alimentación de los molinos SAG.

¹³ “Rat holes” en el contexto de stockpiles y silos se refiere a cavidades estables, cilíndricas que se forman con material granular, impidiendo el flujo de material en forma tal que disminuye el tiempo de residencia para la alimentación de los alimentadores bajo el acopio o silo.



Figura 34: Molinos SAG y Molinos de Bolas en configuración “side by side” de Los Colorados



Figura 35: Estanque “Amelunxen” para disposición de relaves en Los Colorados

La **Figura 34** muestra una fotografía con la disposición de los molinos SAG y los molinos de bolas en una disposición “side by side”, a diferencia de otras concentradoras de alrededor de

100 kt/d, en que el molino SAG se encuentra en una disposición “back to back”, con los molinos de bolas.

La **Figura 35** muestra una fotografía de un estanque de colección y transferencia de los relaves de la concentradora Los Colorados desde el cerro Amelunxen hasta el depósito de relaves. Esta Transferencia es por gravedad y al parecer resolvió muchos problemas de derrames y acumulaciones de pulpa en el área de los espesadores de relaves.

La **Figura 36** presenta un arreglo general de la planta de flotación de la concentradora los Colorados. En la esquina inferior derecha se puede apreciar los tres molinos de bolas de remolienda. Precisamente esa área donde están mostrados los molinos de remolienda, se encuentran¹⁴ en una zona que tiene una cota inferior, tanto de la nave de flotación con celdas estanque, como de la zona de las columnas de limpieza. Esta disposición, a pesar de contar con dos potentes bombas de pozo, permanecía con una capa de pulpa en el fondo, lo que irritaba, con razón, a los ejecutivos de MEL, debido a las condiciones poco seguras. La pulpa normalmente tiene un pH sobre 10,5 u 11 lo que provoca irritaciones severas en la piel si los operadores entran en contacto prolongado con esta pulpa.

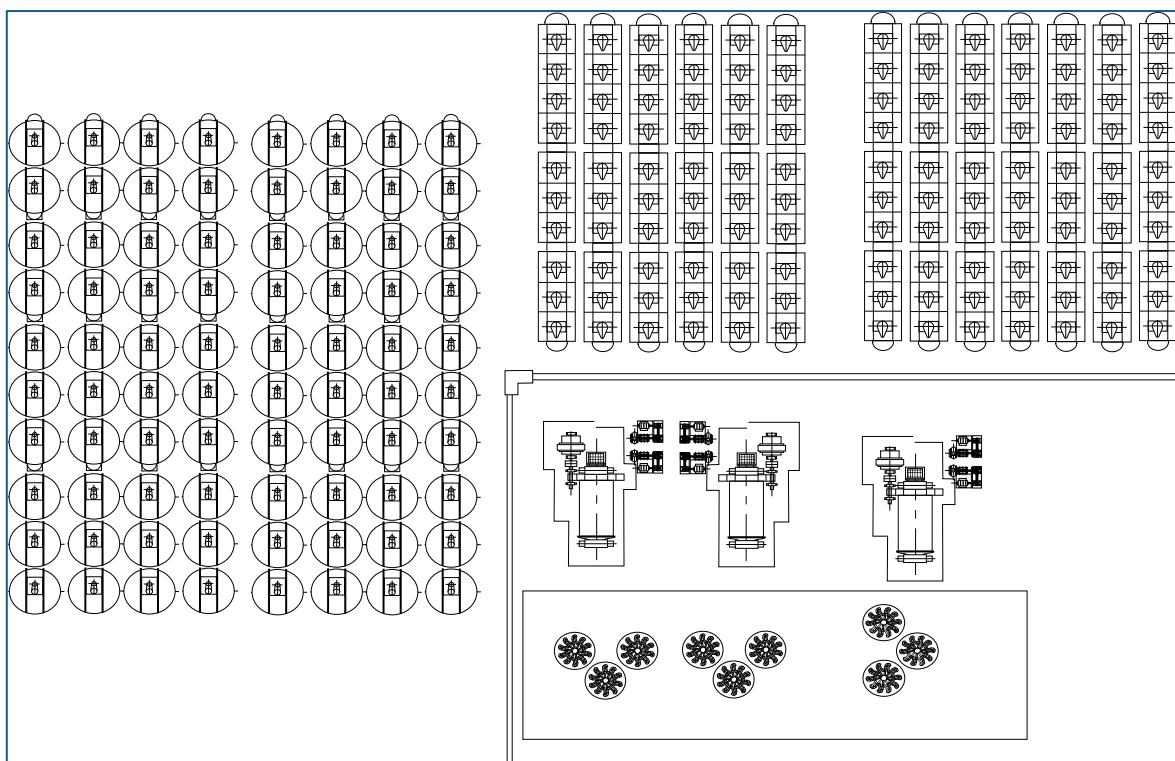


Figura 36: Esquema simplificado de disposición general de la planta de Flotación de Los Colorados.

El diseño original para 35 kt/d solamente contempló dos molinos de bolas de remolienda con accionamiento piñón corona con un motor eléctrico de 1.865 kW de potencia cada uno. Cada molino trataba un promedio de 458 t/h de concentrado con elevados porcentajes de toma de potencia instalada.

Se observa que cada molino de Remolienda tiene asociados tres baterías de hidrociclones.

¹⁴ A la fecha de escribir este trabajo, no estoy seguro de si Los Colorados todavía está en operación.

La **Figura 37** muestra un esquema simplificado de diagrama de flujo de un molino de bolas de remolienda de Los Colorados. Para el balance de masa de este circuito cerrado inverso de remolienda se utilizó una carga circulante de 100%.

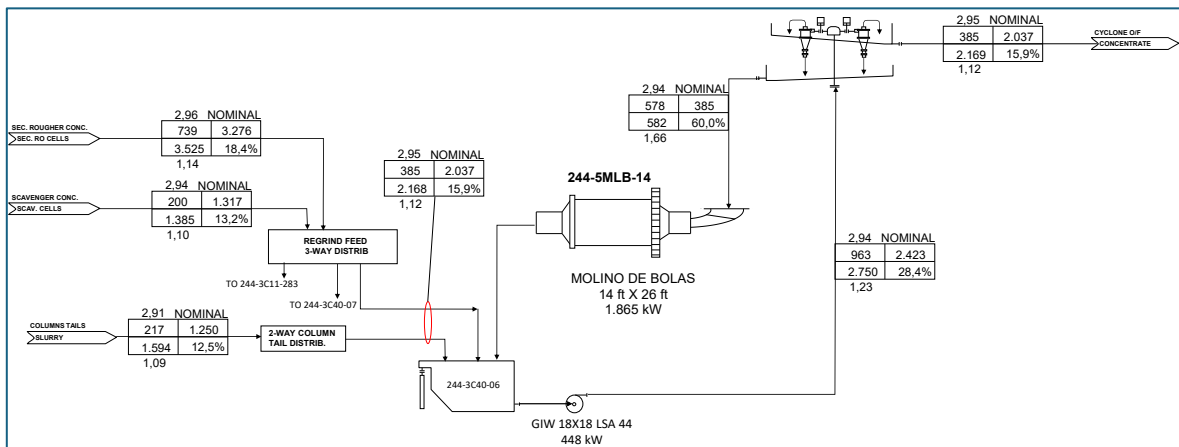


Figura 37: Esquema simplificado de un Molino de Remolienda de Los Colorados

La **Tabla 3** presenta datos de toma de potencia de los molinos 14 y 15 de remolienda de Los Colorados. Se observan elevados valores de tomas de potencia. Se debe recordar que probablemente dichos valores no corresponden a potencia en el manto, y posiblemente son potencias en bornes y lo más probable de lecturas desde el sistema de control.

Los consumos específicos de energía reportados y mostrados en la **Tabla 3**, son bastante bajos, casi todos con valores inferiores a 4 kWh/t.

Tabla 3: Toma de Potencia de molinos de remolienda de Los Colorados años 1992-1993.

			t/h	t/h	kW	kW
			458	458	1.865	1.865
Fecha	RB Mill 14	RB Mill 15	RB Mill 14	RB Mill 15	RB Mill 14	RB Mill 15
1992 - 1993	kW	kW	kWh/t	kWh/t	%	%
June	1.787	1.713	3,90	3,74	95,8%	91,8%
July	1.795	1.805	3,92	3,94	96,2%	96,8%
August	1.799	1.792	3,93	3,91	96,5%	96,1%
September	1.806	1.816	3,94	3,96	96,8%	97,4%
October	1.792	1.787	3,91	3,90	96,1%	95,8%
November	1.730	1.745	3,78	3,81	92,8%	93,6%
December	1.735	1.914	3,79	4,18	93,0%	102,6%
January	1.773	1.802	3,87	3,94	95,1%	96,6%
February	1.787	2.114	3,90	4,62	95,8%	113,4%
March	1.768	1.772	3,86	3,87	94,8%	95,0%
April	1.739	1.772	3,80	3,87	93,2%	95,0%
May	1.736	1.750	3,79	3,82	93,1%	93,8%
avg	1.771	1.815	3,87	3,96	94,9%	97,3%



Figura 38: Fotografía de los dos Molinos de Remolienda Fase original Los Colorados

Remolienda OGP1 Minera Escondida

El Proyecto Organic Growth Project 1 (OGP1), desarrollado por Bechtel, fue concebido para reemplazar la Concentradora los Colorados Phase 3.5.

La tasa de alimentación nominal a la planta es de 152 kt/d, para tratar minerales con 1% de cobre y producir alrededor de 1.664.400 t/a de concentrado de cobre.

La **Figura 39** muestra un esquema simplificado de la planta de flotación de OGP1.

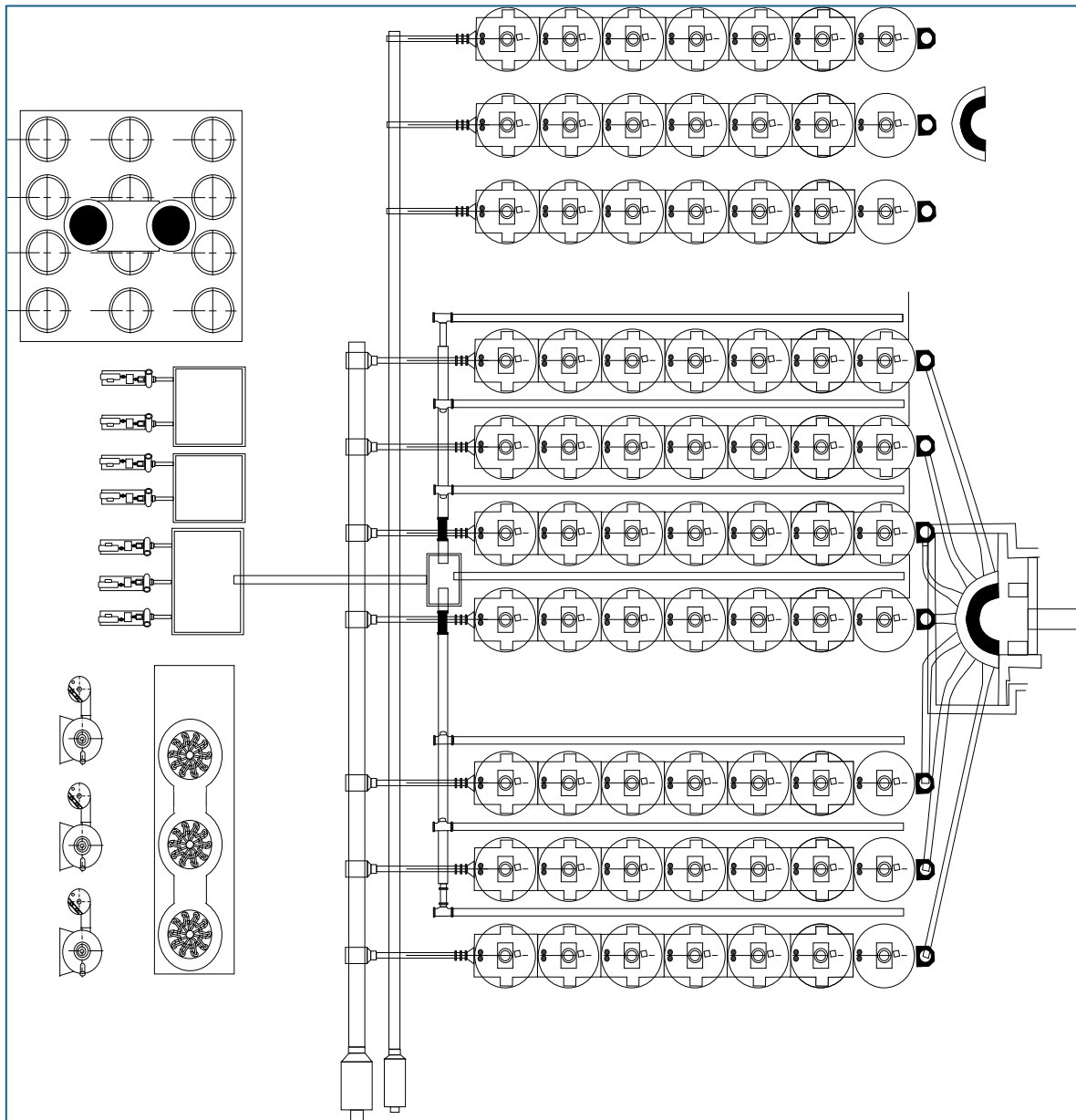


Figura 39: Esquema simplificado planta de flotación Concentradora OGP1

La **Figura 40** muestra un esquema simplificado del diagrama de flujo de la planta de remolienda de la Concentradora OGP1.

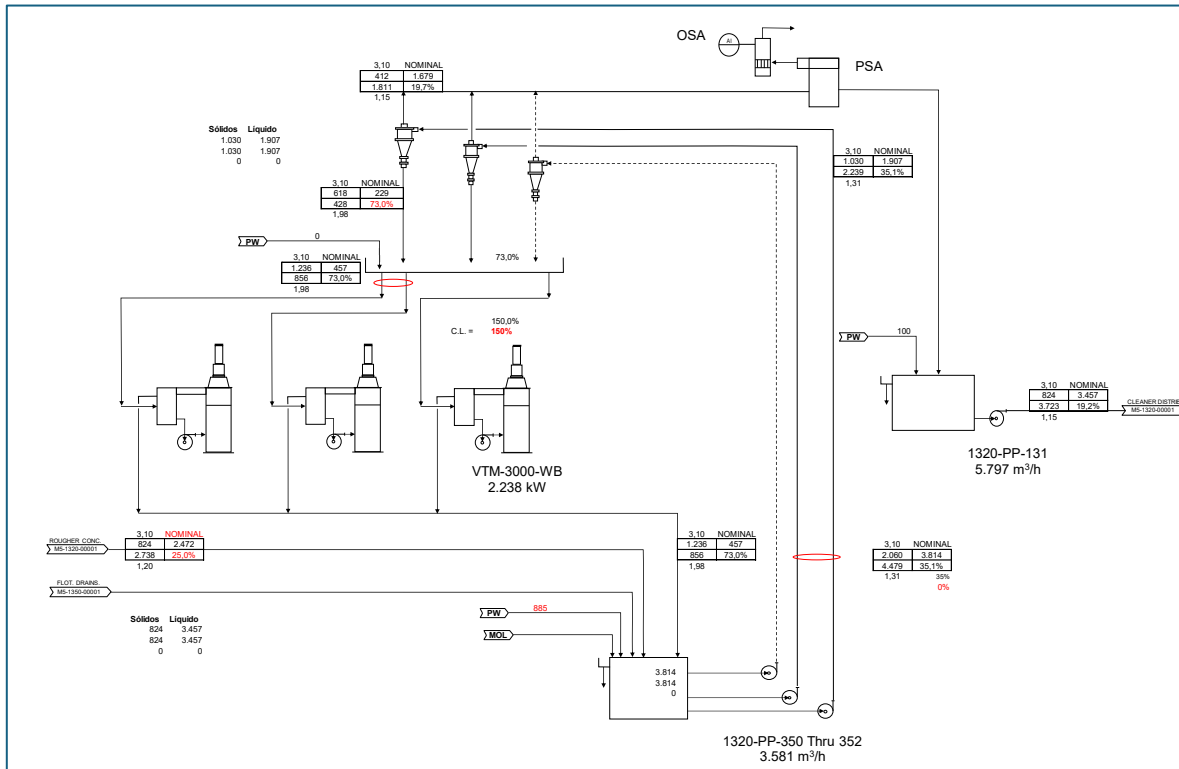


Figura 40: Diagrama de Flujo simplificado del Circuito de Remolienda de OGP1.

Tres molinos verticales VTM-3000, de 2.238 kW cada uno están concebidos para tratar un flujo nominal de 824 t/h de concentrados de flotación primaria o flotación rougher.

El criterio de diseño de procesos indica un consumo de energía específica en remolienda de 5,97 kWh/t. Este mismo criterio especifica una toma de potencia de 82% de cada molino vertical. A diferencia de otros proyectos este criterio indica un tamaño de alimentación de 60% -325 mayas (45 micrones) a un producto de 75% -325 mayas.

Tres baterías de hidrociclones, con 16 hidrociclones de 20" instalados en cada batería, y 11 en servicio, mientras 5 en stand-by.

Consideraciones Finales

Es claro que, desde hace bastante tiempo, se diseñan circuitos de remolienda en base a molinos verticales. Esta tendencia se basa en la mayor eficiencia de molienda de los circuitos con molinos verticales.

El autor ha observado cierta falta de metodología para diseñar los circuitos de remolienda. Al parecer, se busca determinar, ya sea por pruebas (Jar test) o mediante la aplicación de una cifra típica, el consumo específico de energía. Este consumo, para molinos verticales generalmente se mueve en torno a 4 a 5 kWh/t. Sin embargo, esta cifra puede ser bastante más alta para molinos de bolas en aplicaciones de remolienda.

Aspectos de layout son importantes por sus efectos, no sólo en el diseño de procesos del circuito, por ejemplo, la eliminación del estanque de recirculación y la necesaria elevación de las baterías de hidrociclones en esa configuración. Por otra parte, es importante seguir la recomendación de Metso, de instalar el molino vertical sobre una base que no sea muy elevada, para minimizar el riesgo durante las operaciones de vaciado de bolas para el mantenimiento de la hélice. Metso recomienda una base de una altura de alrededor de 1600 mm para tener espacio para el bin de recepción de bolas durante la descarga.

El corte de los hidrociclones depende de la presión y del porcentaje de sólidos, dada una geometría, de cada hidrociclón. Se utilizan hidrociclones de diámetros “pequeños de hasta 20 pulgadas, para mejorar el corte.

A mayores porcentajes de sólidos en la alimentación, el corte se hace más grueso. A mayor presión de alimentación el corte se hace más fino. Sin embargo, el efecto del porcentaje de sólidos es más importante que la presión. Esta última generalmente es superior a la utilizada en clasificación en circuitos de molienda secundaria.

La instrumentación para despliegue de flujos másicos, volumétricos y porcentaje de sólidos de la alimentación a hidrociclones es importante. En la **Tabla 2** se puede observar que algunos circuitos se diseñan con lazos de control modulante para la densidad de alimentación, y en otros diseños solamente se tienen los instrumentos para despliegue en sala de control.

En la base de datos del que escribe, solamente he observado el uso de molinos tipo “Stirred Media Detritors” (SMD) en remolienda de concentrados de cobre, en una concentradora. Ese uso de molinos SMD por parte, al menos en el diseño, de la concentradora: Cerro Verde, la cual no excluye el uso de molinos verticales tipo Vertimill. En el diseño original de la concentradora Cerro Verde, para 108 kt/d, se utilizan ambos tipos de molinos de remolienda.