



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

**ANÁLISIS DE CAPACIDAD DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y
CLASIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA MINERA LA PATAGUA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
METALÚRGICO**

PABLO VICENTE TORRES GONZALEZ

PROFESOR GUÍA

WALDO VALDERRAMA

VALPARAÍSO, ENERO 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el apoyo constante durante el largo periodo de mi formación académica, cada integrante cumplió un rol clave para poder culminar este proceso. Destaco enfáticamente a Jessica, Jorge, Hugo y Claudia por no perder las esperanzas, siempre alentarme a seguir adelante y creer en mí en cada momento.

Agradezco a Silvia por siempre acompañarme y apoyarme en los buenos y malos momentos que pasamos durante todos estos años y por siempre estar ahí cuando lo necesite, sin ella, esto no hubiese sido posible.

Agradezco a Compañía Minera La Patagua, en especial a Jorge Diaz por abrirme sus puertas y permitirme finalizar mi carrera con ellos, haciéndome sentir parte importante de la familia de La Patagua.

Agradezco a mi profesor Waldo por el apoyo, la orientación en los momentos difíciles y la paciente y comprensiva espera de la finalización de este trabajo.

Finalmente agradezco a mis amigos por comprenderme y ayudarme durante todos los años de este largo camino, destacando a Franco, Martín, Bernardo, Francisco, Katherine y Elisabet.

1 Índice

1	ÍNDICE.....	3
1	INTRODUCCIÓN.....	15
2	ANTECEDENTES	17
2.1	ANTECEDENTES GENERALES DE LA PLANTA	17
2.2	ANTECEDENTES ESPECÍFICOS DE LA PLANTA	21
1.1.1.	<i>Molino de bolas Allis Chalmers 5'x6':.....</i>	<i>21</i>
1.1.2.	<i>Molino de bolas Allis Chalmers 6'x5':.....</i>	<i>23</i>
1.1.3.	<i>Molino de bolas Hardinge 8'x48":.....</i>	<i>25</i>
3	MARCO TEÓRICO	27
3.1	EQUIPOS PRINCIPALES	27
3.2	CONFIGURACIÓN DEL CIRCUITO.	28
3.3	CONCEPTOS ASOCIADOS AL MOLINO DE BOLAS.	30
3.3.1.	<i>Dimensiones y diseño de revestimiento:.....</i>	<i>30</i>
3.3.2.	<i>Fracción de la velocidad critica.....</i>	<i>32</i>
3.3.3.	<i>Porcentaje de solidos.....</i>	<i>32</i>
3.3.4.	<i>Nivel de llenado y tamaño de bolas de molienda</i>	<i>33</i>
3.4	CONCEPTOS ASOCIADOS AL HIDROCICLÓN.	34
3.4.1.	<i>Eficiencia de clasificación.....</i>	<i>34</i>
3.4.2.	<i>Variables de control.....</i>	<i>35</i>
3.5	ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE UN CIRCUITO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN.....	37
3.6	SIMULACIÓN CON MOLY-COP TOOLS	39
4	OBJETIVOS	44
4.1	OBJETIVO GLOBAL.....	44
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	44
4.3	HIPÓTESIS.....	44
5	METODOLOGÍA Y ACCIONES REALIZADAS	45
5.1	ESTADO ACTUAL DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN.	45
5.2	REVISIÓN DE VARIABLES OPERACIONALES Y PROPUESTAS DE MEJORA.....	46
5.3	ANÁLISIS ECONOMICO DE LAS PROPUESTAS.....	47
5.4	RESULTADOS PROPUESTOS CONCRETADAS.	47

6	RESULTADOS	48
6.1	CARACTERIZACIÓN MINERAL	48
6.2	RESULTADO MUESTREOS CIRCUITO	48
7	DISCUSIÓN	51
7.1	ESTADO ACTUAL DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA MINERA LA PATAGUA	51
7.1.1.	<i>Análisis de registros históricos y pérdidas</i>	51
7.1.2.	<i>Análisis y estimación de la capacidad teórica del circuito</i>	55
7.1.3.	<i>Análisis del muestreo del circuito</i>	57
7.2	SELECCIÓN DE VARIABLES	70
7.3	ANÁLISIS DE VARIABLES Y PROPUESTAS	71
7.3.1.	<i>Configuración del circuito</i>	72
7.3.2.	<i>Análisis revestimientos molinos</i>	73
7.3.3.	<i>Análisis fracción de la velocidad critica</i>	79
7.4	ANÁLISIS ECONÓMICO	83
7.4.1.	<i>Propuesta por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'</i>	83
7.4.2.	<i>Propuesta por cambio del revestimiento al molino Hardinge 8'x48"</i>	85
7.4.3.	<i>Propuesta cambio RPM molino Allis Chalmers 6'x5'</i>	88
7.4.4.	<i>Propuesta cambio RPM molino Hardinge 8'x48" '</i>	90
8	RESULTADOS DE PROPUESTAS	93
8.1	CAMBIO DE REVESTIMIENTO MOLINO HARDINGE 8'x48"	93
8.1.1.	<i>Comparación de la producción registrada por planta y la despachada</i>	93
8.1.2.	<i>Análisis de las diferencias reportadas por planta y fino despachado</i>	93
8.2	RESULTADO PROPUESTAS CONCRETADAS	95
9	CONCLUSIONES	96
10	REFERENCIAS	99
11	ANEXOS	100
11.1	INFORME TEST DE BOND	100
11.1.1.	<i>Antecedentes</i>	100
11.1.2.	<i>Procedimiento</i>	100
11.1.3.	<i>Resultados</i>	101
11.1.4.	<i>Resultados ensayo de Bond (Wi)</i>	101
11.2	REGISTROS HISTÓRICOS PLANTA	105

11.2.1.	<i>Datos de producción año 2018.....</i>	105
11.2.2.	<i>Datos de producción Mayo 2019</i>	106
11.3	MOLY-COP TOOLS	107
11.3.1.	<i>Ingreso de datos y ajuste en molino Allis Chalmers 5'x6'</i>	107
11.3.2.	<i>Ingreso de datos y ajuste en molino Allis Chalmers 6'x5'</i>	108
11.3.3.	<i>Ingreso de datos y ajuste en molino Hardinge 8'x48"</i>	109
11.3.4.	<i>Resultados parámetros de modelación molino Allis Chalmers 5'x6'</i>	111
11.3.5.	<i>Resultados parámetros de modelación molino Allis Chalmers 6'x5'</i>	111
11.3.6.	<i>Resultados parámetros de modelación molino Allis Chalmers 8'x48"</i>	112
11.3.7.	<i>Simulación: Aumento fracción de la velocidad critica del molino Hardinge 8'x48"</i>	114
11.4	FORMAS DE CÁLCULO PARA EL BALANCE ECONÓMICO.	115

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de planta, parte 2.	20
Figura 2. Molino de bolas Allis Chalmers 5'x6'	21
Figura 3. Revestimiento actual del molino 5'x6'	22
Figura 4. Molino de bolas Allis Chalmers 6'x5'	23
Figura 5. Revestimiento y levitador actuales del molino 6'x5'	24
Figura 6. Molino de bolas Hardinge 8'x48"	25
Figura 7. Revestimientos actuales del molino 8'x48"	26
Figura 8. Esquema molino de bolas con descarga por rebalse.	27
Figura 9. Esquema hidrociclón.	28
Figura 10. Circuito cerrado directo.	29
Figura 11. Circuito cerrado inverso.	29
Figura 12. Circuito cerrado dual.	30
Figura 13. Consumo de potencia en función de la altura del levitador y la fracción de la velocidad crítica.	31
Figura 14. Efecto de la altura del levitador en el movimiento de carga.	31
Figura 15. Nivel de llenado.	33
Figura 16. Tipos de descarga, (a) Spray (b) rope.	36
Figura 17. Curvas granulométricas molino 5'x6'	49
Figura 18. Curvas granulométricas molino 8'x48"	49
Figura 19. Recirculación por derrames.	54
Figura 20. Curva de eficiencia del hidrociclón asociado al molino Allis Chalmers 5'x6'	58
Figura 21. Curva de eficiencia del hidrociclón asociado al molino Allis Chalmers 6'x5'	60
Figura 22. Curva de eficiencia del hidrociclón asociado al molino Hardinge 8'x48".	61
Figura 23. Respuesta del P_{80} al modificar el flujo de alimentación del molino Allis Chalmers 5'x6'.	62
Figura 24. Caso base para el molino Hardinge 8'x48".	63
Figura 25. Respuesta del P_{80} del circuito al modificar el flujo de alimentación de los molinos Allis Chalmers.	63
Figura 26. Respuesta del P_{80} del circuito al modificar el flujo de alimentación del molino Hardinge.	64
Figura 27. Capacidad del molino Hardinge 8'x48" en circuito cerrado directo simple.	72

Figura 28. Revestimiento anterior del molino Allis Chalmers 5'x6'	73
Figura 29. Propuesta 1, molino Allis Chalmers 5'x6'	74
Figura 30. Propuesta 2, molino Allis Chalmers 5'x6'	74
Figura 31. Resbalamiento de la carga molino Hardinge 8'x48"	77
Figura 32. Propuesta revestimiento molino Hardinge 8'x48"	78
Figura 33. Simulación capacidad hardinge 8'x48" al 75% fracción de la velocidad crítica.	82
Figura 34. Recirculación por derrames con propuesta.	95
Figura 35. Distribución granulométrica resultados ensayo Don Jaime.	103
Figura 36. Distribución granulométrica resultados ensayo Peumo	105
Figura 37. Ingreso datos molino Allis Chalmers 5'x6'	107
Figura 38. Ajuste de datos molino Allis Chalmers 5'x6'	108
Figura 39. Ingreso datos molino Allis Chalmers 6'x5'	109
Figura 40. Ajuste de datos molino Allis Chalmers 6'x5'	109
Figura 41. Ingreso datos molino Hardinge 8'x48"	110
Figura 42. Ajuste de datos molino Hardinge 8'x48"	110
Figura 43. Simulación: Aumento fracción de la velocidad crítica, molino Hardinge 8'x48" ..	114

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipo de descargas según la relación entre apex y vortex.	37
Tabla 2. Índice de Bond y densidad.	48
Tabla 3. Caracterización por D_{80} del circuito de molienda.	50
Tabla 4. Porcentaje de solidos flujos y potencia molinos.	50
Tabla 5. Balance de producción real /teórico.	51
Tabla 6. Comparación de lo procesado registrado, despachado y extraído por las minas.	52
Tabla 7. Balance derrames planta concentrada.	53
Tabla 8. Balance embancamientos acondicionador.	54
Tabla 9. Potencia teórica molinos.	55
Tabla 10. Capacidad teórica.	55
Tabla 11. Comparación capacidad teórica, flujo objetivo y procesado real.	56
Tabla 12. Comparación capacidad teórica y flujo actual de los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5'.	57
Tabla 13. Granulometría y flujos masicos del molino Allis Chalmers 5'x6'.	58
Tabla 14. Granulometría y flujos masicos molino Allis Chalmers 6'x5'.	59
Tabla 15. Granulometría y flujos masicos del molino Allis Chalmers 6'x5'.	60
Tabla 16. Capacidad en función del espesor molino Allis Chalmers 5'x6'.	75
Tabla 17. Expectativa de vida útil, revestimientos molino Allis Chalmers 5'x6'.	76
Tabla 18. Estimación aumento velocidad molino Allis Chalmers 6'x5'.	80
Tabla 19. Incremento de cobre y plata pagable por el cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.	83
Tabla 20. Incrementos de ingresos por el cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.	84
Tabla 21. Deducción metalúrgica por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.	84
Tabla 22. Costo mensual por adquisición e instalación y detención de producción por cambio revestimiento s molino Allis Chalmers 5'x6'.	84
Tabla 23. Costo de minas mensual por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.	85
Tabla 24. Resume balance económico por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.	85

Tabla 25. Incremento mensual de producción por cambio de revestimiento s molino Hardinge 8'x48''.....	86
Tabla 26. Incrementos de ingresos por cambio de revestimiento s molino Hardinge 8'x48''....	86
Tabla 27. Deducción metalúrgica por cambio de revestimiento s molino Hardinge 8'x48''	86
Tabla 28. Costo mensual por adquisición e instalación y detención de producción por cambio revestimiento s molino Hardinge 8'x48''	87
Tabla 29. Costo de minas mensual por cambio de revestimiento al molino Hardinge 8'x48'' .	87
Tabla 30. Resume balance económico cambio revestimiento al molino Hardinge 8'x48''	87
Tabla 31. Incremento mensual de producción por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'’’	88
Tabla 32. Incrementos de ingresos por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'’	88
Tabla 33. Deducción metalúrgica por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'’	89
Tabla 34. Costo de minas mensual por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'’	89
Tabla 35. Resume balance económico por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'’ ...	89
Tabla 36. Balance producción con propuesta concretada.	93
Tabla 37. Balance mineral derramado con propuesta.	94
Tabla 38. Designación de perdidas con propuesta.	94
Tabla 39. Carga de bolas, molino bond.....	100
Tabla 40. Resultados test de Bond	101
Tabla 41. Resultados ensayo de bond Don Jaime	102
Tabla 42. Distribución granulométrica ensayo Don Jaime.....	102
Tabla 43. Resultados ensayo de bond Peumo	104
Tabla 44. Distribución granulométrica ensayo Peumo.....	104
Tabla 45. Datos reportados por planta.....	105
Tabla 46. Datos de cobre fino despachado.....	106
Tabla 47. Balance mediante extracción de minas y stock.	106
Tabla 48. Producción registrada con propuesta concretada.	106
Tabla 49. Despachado ENAMI con propuesta concretada.....	106
Tabla 50. Parámetros molienda, molino 5'x6'’	111
Tabla 51. Función fractura, molino 5'x6'’	111
Tabla 52. Parámetros clasificación, molino 5'x6'’	111
Tabla 53. Constantes clasificación, molino 5'x6'’	111
Tabla 54. Parámetros molienda, molino 6'x5'’	111

Tabla 55. Función fractura, molino 6'x5' .	112
Tabla 56. Parámetros clasificación, molino 6'x5' .	112
Tabla 57. Constantes clasificación, molino 6'x5' .	112
Tabla 58. Parámetros molienda, molino 8'x48''	112
Tabla 59. Función fractura, molino 8'x48''	112
Tabla 60. Parámetros clasificación, molino 8'x48'' .	113
Tabla 61. Constantes clasificación, molino 8'x48''	113

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidad
P_{80}	Tamaño del 80% pasante del producto	$[\mu\text{m}]$
F_{80}	Tamaño del 80% pasante de la alimentación	$[\mu\text{m}]$
W_i	Índice de dureza de Bond	$[\text{kW/t}]$
V	Velocidad de giro	$[\text{rpm}]$
V_c	Velocidad crítica	$[\text{rpm}]$
H_c	Altura de nivel de bola hasta el punto más alto	$[\text{feet}]$
R	Diámetro del molino	$[\text{feet}]$
r_s	Densidad del mineral	$[\text{t/m}^3]$
d_B	Diámetro ideal de la bola	$[\text{mm}]$
D_{50}	Tamaño que posee la misma probabilidad de ir al rebose o descarga del hidrociclón	$[\mu\text{m}]$
E_i	Eficiencia real del tamaño i	$[-]$
B_p	Fracción en peso correspondiente al bypass	$[-]$
E_c^i	Eficiencia corregida del tamaño i	$[-]$
D_u	Diámetro del ápex	$[\text{mm}]$
D_o	Diámetro del vortex	$[\text{mm}]$
P	Potencia neta del molino de bola	$[\text{kW}]$
E	Consumo específico de energía	$[\text{kWh/t}]$
M	Capacidad de molienda	$[\text{t/h}]$
D	Diámetro efectivo del molino	$[\text{feet}]$
L	Largo efectivo del molino	$[\text{feet}]$
J	Fracción del llenado de bola	$[-]$

N_c	Fracción de la velocidad crítica	[-]
α	Ángulo dinámico de la carga	[°]
ρ_{ap}	Densidad aparente de la carga	[t/m ³]
ρ_b	Densidad de bolas	[t/m ³]
H	Presión de alimentación expresada en altura de columna de pulpa de alimentación equivalente	[feet]
D_i	Diámetro de la alimentación del hidrociclón	[in]
$\emptyset$	Diámetro del hidrociclón	[in]
Q	Flujo de alimentación	[m ³ /h]
h	Altura del hidrociclón, definida como la distancia desde el fondo del vortex hasta la parte superior del ápex,	[in]
Q_u	Caudal de la descarga del hidrociclón	[m ³ /h]
Q_o	Caudal de del rebose del hidrociclón	[m ³ /h]
S	Razón de la partición del flujo entre la descarga y el rebalse del hidrociclón	[-]
m	Pendiente de clasificación de Plitt	[-]
E_c^i	Eficiencia corregida del tamaño i	[-]
B_{pf}	Bypass de fino de la pulpa en la descarga del hidrociclón	[-]
B_{pw}	Bypass de agua hidrociclón	[-]
R_s^C	La recuperación hipotética total de solidos si la eficiencia del ciclón fuese la eficiencia corregida	[-]

Resumen

Se analizó el circuito de molienda y clasificación de la Compañía Minera La Patagua, compuesto por los molinos de bolas Hardinge 8'x48", Allis-Chalmers 5'x6' y Allis-Chalmers 6'x5', cada uno en circuito cerrado directo, con su respectivo hidrociclón, teniendo la particularidad que el producto de los molinos Allis-Chalmers cae al cajón de descarga del molino Hardinge, siendo éste el único que entrega el producto final de flotación.

Dentro del documento se abordaron los siguientes temas: comparación entre las cifras de venta efectiva de cobre fino y las estadísticas de producción; diferencias entre el flujo promedio de 2018, el objetivo de producción y la capacidad estimada; muestreo del circuito de molienda y clasificación; identificación de brechas y oportunidades de mejora; captura de oportunidades.

Al comparar el cobre fino vendido con las estadísticas de producción, se encontraron diferencias negativas de 101,5[TMS]. Estas pudieron ser explicadas principalmente por los derrames ocurridos dentro del proceso, los que fueron estimados en 16,8[TMS/día]. Al recircularse, se volvían a contabilizar, lo que provocó un error de registro, proporcionando un valor irreal en el tonelaje procesado. Finalmente, la producción real fue de 379,2[TMS/día].

Se analizó el flujo promedio de 2018, el objetivo de producción y la capacidad teórica global estimada, considerando los tres molinos en circuito cerrado directo. Se encontró que no existen diferencias significativas entre las dos últimas, lo que implicó que el objetivo de producción fuera alcanzable. El flujo promedio de 2018 fue menor a la capacidad teórica y al objetivo de producción, debido a la gran cantidad de derrames generados. Estos fueron provocados por fallas operacionales y no por falta de capacidad, debido a que existieron días en los cuales no ocurrieron derrames. También se comparó el flujo actual de los molinos Allis Chalmers 5' x 6' y 6' x 5' con el teórico donde no existen diferencias significativas.

Se realizó un muestreo al circuito de molienda y clasificación donde se obtuvo su comportamiento. Con ayuda de Moly-Cop Tools se calcularon las curvas de eficiencia de clasificación de los hidrociclones. Allí se encontró que la eficiencia de éstos, para los molinos Allis-Chalmers era extremadamente baja, presentando un corto circuito de fino superior al 50%, implicando cargas circulantes sobre el 500%. Se recomienda revisar en detalle el diseño de los

hidrociclones y la instrumentación en éstos. Para el hidrociclón asociado al molino Hardinge 8'x48" no se presentaron problemas, encontrándose todos sus indicadores en rangos aceptables.

Posteriormente se identificaron y compararon las variables de los molinos que presentaban mayores diferencias con la literatura y que podrían en ese momento implicar un aumento importante en la capacidad de producción. Estas fueron el diseño del revestimiento, la fracción de la velocidad crítica y la configuración del circuito del molino Hardinge 8'x48". Luego de someterlas a un análisis cuantitativo se generaron 4 propuestas que fueron analizadas económicamente. La primera consistió en remplazar el diseño del revestimiento liso del molino Hardinge 8'x48" por uno mono ondas, estimándose un aumento del 5%. El análisis económico arrojó utilidades mensuales de 10.143,9 [USD/mes]. El segundo consistió en remplazar el diseño del revestimiento del molino Allis Chalmers 5'x 6' que se encontraba sobreestimado, por uno de menor espesor. El análisis económico para éste entregó utilidades de 11.169,7 [USD/mes] y un payback de 2 meses. La tercera y cuarta propuesta consistió en aumentar la fracción de la velocidad crítica de los molinos Allis Chalmers 6'x 5'y Hardinge 8'x48" desde 67,8% y 71% respectivamente hasta 75%. Para la tercera propuesta se obtuvo un ingreso de 6.673,5[USD/mes] con un Payback de 0,3 meses y para la cuarta ingresos por 7780,93[USD/mes], no aplicando el payback, ya que no requería de inversión.

De las propuestas presentadas, solo el cambio de revestimiento del molino Hardinge 8'48" fue concretado. Instalado en abril de 2019, se obtuvo un aumento de la producción de 0,68[TMS/h], lo que se tradujo en ingresos adicionales de 22.780[USD/mes].

1 Introducción

La mediana minería en Chile representa el 5,2% de la producción de cobre a nivel nacional. Su producción es de valor similar o mayor a la registrada por otras industrias tradicionales de la economía chilena como la celulosa, vitivinícola y forestal (Hernández, 2014). Para la región de Valparaíso, la minería representa el 15% del PIB regionalizado (Sernageomin, 2012).

Dentro de la región de Valparaíso, en la comuna de La Ligua, existen 45 yacimientos mineros (Sernageomin, 2012). Entre ellos encontramos el asentamiento minero La Patagua existente desde 1924. Aquí se instaló la primera planta de flotación para la mediana minería en Chile, siendo un precedente para las demás empresas mineras. Más tarde en el año 1976 se conforma Compañía Minera La Patagua, propiedad del empresario Jaime Zegers, ganador de varios premios a nivel nacional en reconocimiento a su auténtico testimonio de devoción a la minería.

En la actualidad la Compañía Minera La Patagua, es liderada por Juan Enrique Zegers, hijo de Jaime Zegers. Esta minera se dedica al procesamiento de minerales sulfurados de cobre mediante su planta de beneficio de minerales, ubicada en el asentamiento minero La Patagua. Hoy en día la capacidad de tratamiento corresponde a 400 toneladas diarias, con una ley promedio de cobre del 1,55%. El mineral se extrae desde las minas Don Peumo y Don Jaime ubicadas en la comuna de Cabildo.

El proceso productivo inicia con la extracción del mineral desde las minas, para luego ser transportado hasta la planta concentradora en la cual ocurren los siguientes procesos: chancado primario, secundario y terciario, molienda, flotación, filtrado y secado. El producto final corresponde a un concentrado de cobre con una ley promedio del 20% que es comercializado a la empresa nacional de minería ENAMI.

Dentro de estos procesos, es en la planta concentradora que la empresa ha incorporado nuevas tecnologías, cambiando el sistema de clasificación mecánico por rastra a uno hidráulico por hidrociclones en enero del 2018. Lamentablemente, no se logrado aún cumplir con las expectativas de aumento de producción.

Considerando lo anterior y el intento permanente de la empresa por disminuir los costes unitarios por tonelada procesada e incrementar las utilidades, es que se requiere un aumento del tonelaje tratado. Por esto, se hace necesario realizar un análisis de la situación actual del circuito de molienda y clasificación, para identificar oportunidades de mejora del sistema tanto

operacionales como de equipos, y con el propósito de generar propuestas que aumenten la capacidad de producción del circuito.

2 Antecedentes

2.1 Antecedentes generales de la Planta

El proceso productivo de la planta inicia con la recepción de mineral proveniente de las minas, el cual es depositado en canchas de acopio, para luego ser descargado en la tolva de alimentación del chancador primario, donde el mineral que excede el tamaño admisible es separado y reducido mediante el uso de un martillo hidráulico montado sobre un minicargador.

El chancador primario de mandíbula Sket de 500 x 800 [mm] reduce el mineral bajo 3[in], este es llevado mediante una cinta transportadora al chancador secundario de conos Sket de 3[ft] con cabeza larga, donde el mineral se reduce a menos de 1,5[in]. Posteriormente el mineral es transportado por una cinta, la cual puede tener dos destinos, stock pile intermedio o hacia la tolva de alimentación del chancado terciario, para lo cual existe un chute repartidor. Este circuito tiene una capacidad de 65 [TMS/h].

El producto de la tolva del chancado terciario es enviado al harnero Furlan modelo PV500200/2D, el cual tiene dos niveles. El primero con mallas de 5/8[in] y el segundo con mallas de ¼ [in]. El mineral sobre tamaño es enviado al chancador terciario Sket de 3 [feet] de cabeza corta y posteriormente enviado nuevamente al harnero. El mineral bajo tamaño se puede enviar a la tolva fina o un stock pile fino. Siendo un circuito cerrado inverso de capacidad de 25[t/h].

Este proceso se puede observar en la siguiente Figura 1.

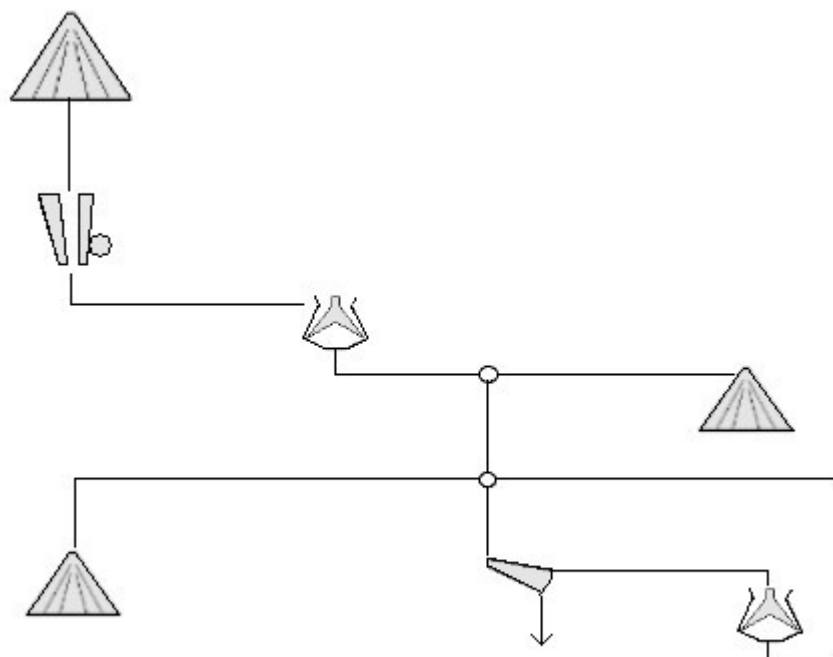


Figura 1. Diagrama de planta, parte 1.

El mineral de la tolva fina es ingresado a tres molinos de bolas, dos en circuito cerrado directo y uno en circuito cerrado dual. Cada uno recibe alimentación fresca, teniendo diferentes objetivos de producción, los molinos Allis Chalmers 5'x 6' y 6'x 5' deben entregar un producto intermedio de 40% pasante en la malla #200 ASTM, que es destinado al cajón de descarga del molino Hardinge 8'x 48", siendo el encargado de entregar el producto final de molienda a flotación, el cual debe tener entre un 55-60% pasante en la malla #200 ASTM, con un desempeño global de 17[TMS/h].

El producto de molienda ingresa a un acondicionador de 8x8[ft], donde son incorporados los reactivos necesarios para flotación. Luego este flujo es ingresado al circuito de flotación donde pueden distinguirse 3 etapas características que corresponden a: rougher, cleaner y scavenger, estas consideran 4, 10 y 10 celdas respectivamente.

La etapa rougher está compuesta por las celdas Wemco N°1 hasta la N°4, donde el concentrado de éstas es enviado al molino de remolienda 3'x 6', en el cual se obtiene un producto con un P_{80} inferior a 75[μm]. Este es enviado a las celdas pre cleaner Wemco N°5 y N°6. Los concentrados de estas celdas son enviados al circuito cleaner que considera las

celdas Vulco N°1 y N°2 y las Denver N°1 hasta la N°6, donde se produce el concentrado final. La cola de la etapa cleaner vuelve al cajón de descarga del molino Hardinge 8'x 48".

La cola de las celdas Wemco N°4 y N°6 entra a la etapa scavenger que corresponde desde la Wemco N°7 hasta la N°18, todos los concentrados producidos en esta etapa son enviados a la etapa rougher, respectivamente a la celda Wemco N°1, finalmente la cola final sale de la celda Wemco N°18 y es enviada al tranque de relave.

El concentrado final con un porcentaje de sólidos del 17 % es depositado en el espesador 5[m] de diámetro con 3[m] de altura, recuperando el agua clara en una piscina especial y entregando un producto con 48% de sólidos, que es dirigido hacia el filtro de discos Dorr Oliver, donde a través de una bomba de vacío se extrae agua, obteniendo como producto final un concentrado de cobre-plata con un porcentaje de humedad entre 20 a 23 %. Este producto ingresa a la etapa de secado, a través de un tornillo sin fin que se usa como alimentador del horno a gas. El concentrado pasa a través de este, para obtener un producto comercializable con un 8% a 10% de humedad aproximadamente. Finalmente es despachado a ENAMI Ventanas a través de camiones batea. Todo este proceso se observa en la Figura 2.

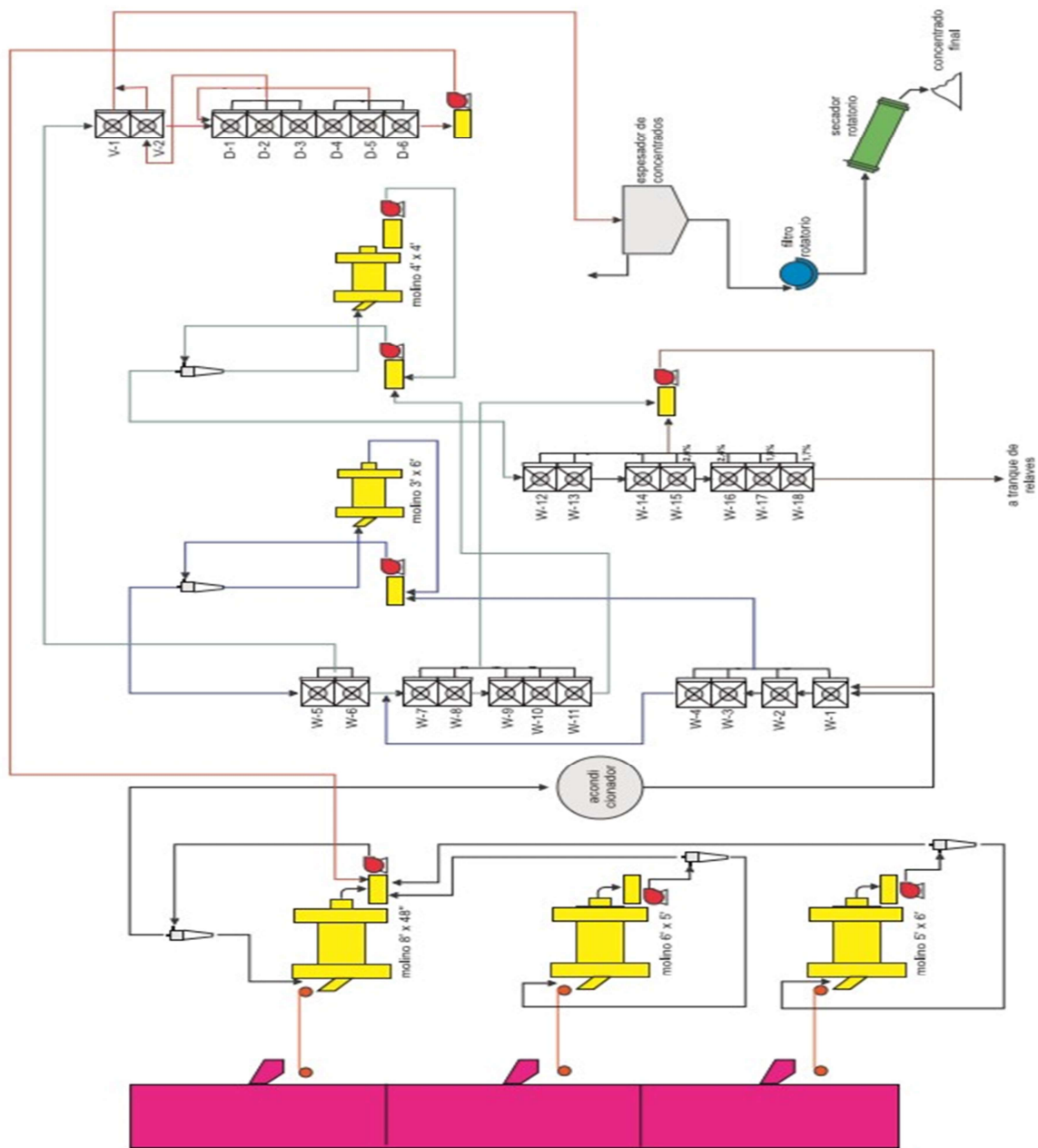


Figura 2. Diagrama de planta, parte 2.

2.2 Antecedentes específicos de la Planta

1.1.1. Molino de bolas Allis Chalmers 5'x6':



Figura 3. Molino de bolas Allis Chalmers 5'x6'.

- Tipo descarga: Rebalse
- Diámetro: 1,34 [m]
- Largo: 2 [m]
- Capacidad: 3,7 [TMH]
- Granulometría: 40% pasante en la malla #200 ASTM
- Nivel de llenado: 40 %
- Fracción de la velocidad critica: 74 %
- Tamaño de bolas: 2,5 [in]
- Potencia nominal motor: 120 [HP]

2.2.1.1 Diseño revestimiento molino de bolas Allis Chalmers 5'x6':

El molino Allis Chalmers 5'x6' presenta un sistema de revestimiento traslapado de 91[mm] de espesor medio, entregando una vida útil de 10 años utilizando acero alto al manganeso bajo la normal ASTM 128. El plano del revestimiento puede verse en la Figura 4.

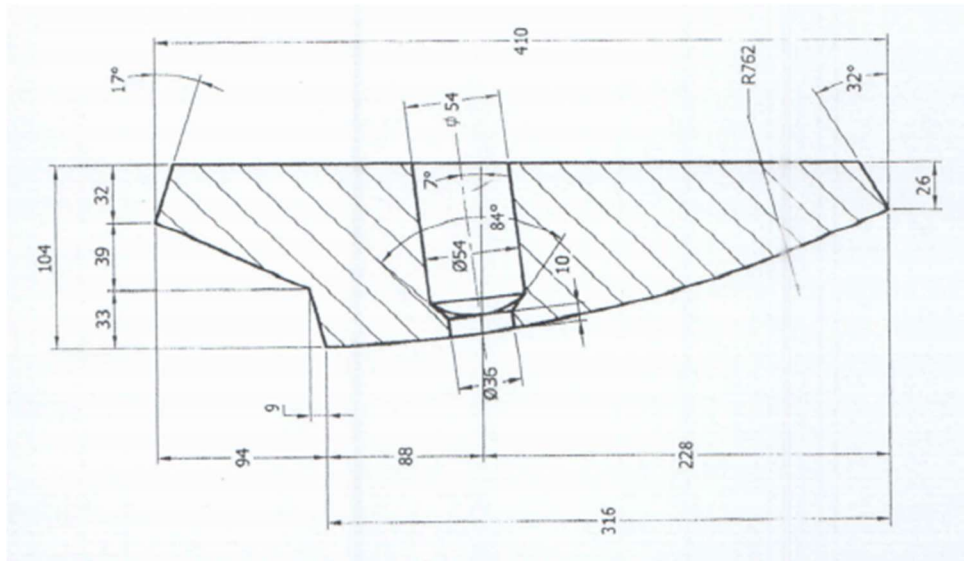


Figura 4. Revestimiento actual del molino 5'

2.2.1.2 Hidrociclón asociado al molino de bolas Allis Chalmers 5'x6':

- Diámetro: 15 [in]
- Largo: 885 [mm]
- Apex: 46 [mm]
- Vortex: 76 [mm]
- Inlet: 4,1 [in²]
- Presión: 4 [PSI]

1.1.2. Molino de bolas Allis Chalmers 6'x5':



Figura 5. Molino de bolas Allis Chalmers 6'x5'.

- Tipo descarga: Rebalse
- Diámetro: 1,7 [m]
- Largo: 1,48 [m]
- Capacidad: 5,7 [TMH]
- Granulometría: 40% pasante en la malla #200 ASTM
- Nivel de llenado: 40 %
- Fracción de la velocidad critica: 67,8 %
- Tamaño de bolas: 2,5 [in]
- Potencia nominal motor: 135 [HP]

2.2.1.3 Diseño revestimiento molino de bolas Allis Chalmers 6'x5':

El molino Allis Chalmers 6'x5' presenta un sistema de revestimiento liso y levantadores de 1,25 [in] y 1,5 [in] respectivamente, entregando una vida útil de 2 años, utilizando acero alto al manganeso bajo la normal ASTM 128. El detalle de los planos no fue posible conseguirlos ya que no se encuentran en la faena, solamente se pudieron fotografiar en la última instalación de revestimiento s, que pueden ser vistas en las Figura 6.



Figura 6. Revestimiento y levantador actuales del molino 6'x5'.

2.2.1.4 Hidrociclón asociado al molino de bolas Allis Chalmers 6'x5':

- Diámetro: 10 [in]
- Largo: [mm]
- Apex: 44 [mm]
- Vortex: 76 [mm]
- Inlet: 4,1 [in²]
- Presión: 4 [PSI]

1.1.3. Molino de bolas Hardinge 8'x48":



Figura 7. Molino de bolas Hardinge 8'x48".

- Tipo descarga: Rebalse
- Diámetro: 2,25 [m]
- Largo: 1,22 [m]
- Capacidad: 8,4 [TMH]
- Granulometría: 55-60 % pasante en la malla #200 ASTM
- Nivel de llenado: 40 %
- Fracción de la velocidad crítica: 71 %
- Tamaño de bolas: 2,5 [in]
- Potencia nominal motor: 200 [HP]

2.2.1.5 Diseño revestimiento molino de bolas Hardinge 8'x48":

El molino Hardinge 8'x48" presenta un diseño de revestimiento liso de 95[mm] de espesor, entregando una vida útil media de 3 años, utilizando acero alto al manganeso bajo la normal ASTM 128. El plano del revestimiento puede verse en la Figura 8.

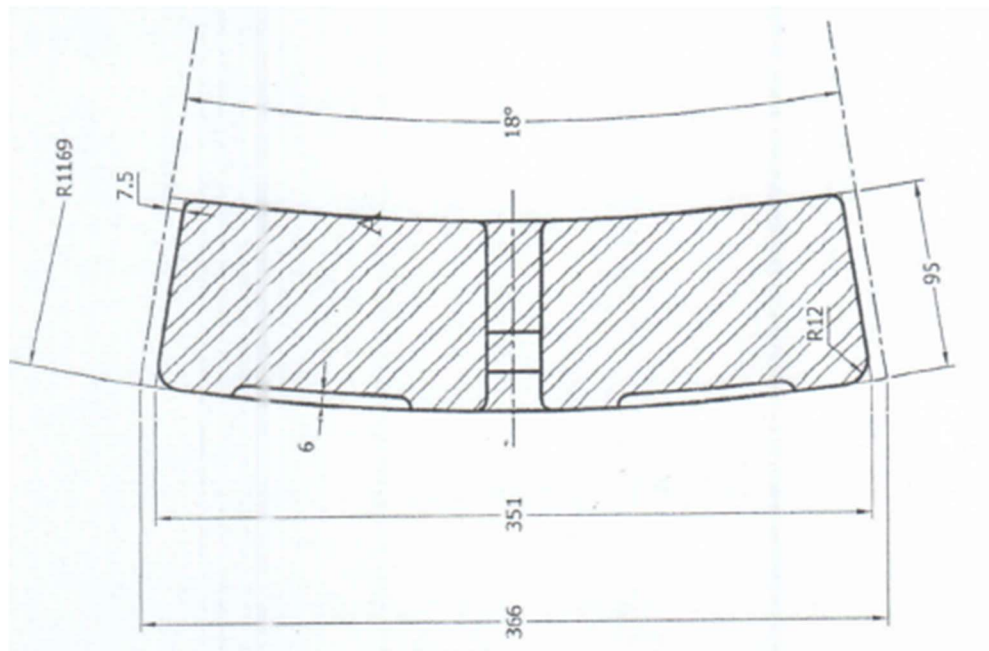


Figura 8. Revestimientos actuales del molino 8'x48''

2.2.1.6 Hidrociclón asociado al molino de bolas Hardinge 8'x48'':

- Diámetro: 10 [in]
- Largo: 1250 [mm]
- Apex: 62 [mm]
- Vortex: 116 [mm]
- Inlet: 4,8 [in²]
- Presión: 7 [PSI]

3 Marco teórico

En la industria minera, dedicada a tratar los sulfuros de cobre, tienen una vital importancia los circuitos de molienda y clasificación, ya que tienen el objetivo de reducir el tamaño del mineral proveniente del chancado terciario o molienda SAG, para entregar el producto a la etapa de flotación, encargada de concentrar y recuperar el cobre, donde estos resultados estarán fuertemente influenciados por la calidad del proceso anterior.

3.1 Equipos principales

Los principales equipos de un circuito de molienda y clasificación corresponden tradicionalmente a los molinos de bolas e hidrociclones.

Un molino de bolas es el encargado de la reducción de tamaño mediante la transferencia de energía, desde las bolas hacia el mineral, producto del movimiento de rotación sobre el eje horizontal. Un esquema de este puede verse en la Figura 9.

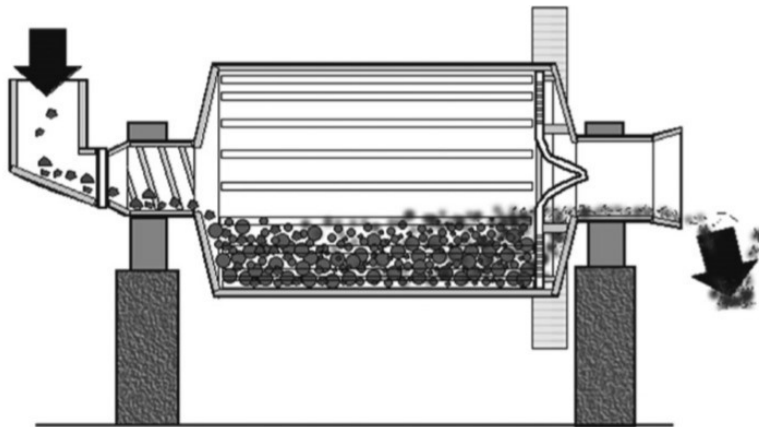


Figura 9. Esquema molino de bolas con descarga por rebalse.

Las principales secciones de un molino de bolas corresponden a:

Manto: Corresponde a la sección exterior del molino encargada de soportar los impactos y la carga provocada por la masa del mineral, las bolas y los revestimientos.

Revestimiento: Tienen el objetivo de proteger el casco de la abrasión e impactos de la carga, estos son retirados según el nivel de desgaste presente y remplazados por nuevas piezas. Estos son fabricados principalmente de fundición blanca alto cromo.

Levantadores: Tienen el objetivo de proteger el revestimiento y aumentar la vida útil de estos, además de promover un movimiento de carga adecuado.

Carga de bolas: Son las encargas de la reducción de tamaño del mineral, mediante abrasión e impacto. Estas pueden ser fabricadas de acero forjado o fundidas.

El hidrociclón es el clasificador por tamaño de pulpa, más utilizado en la industria minera, su función consiste en separar las partículas gruesas de las finas. El funcionamiento de este consiste en ingresar la alimentación por la entrada tangencial “inlet” bajo presión, generándose dos movimientos de tipo espiral, uno descendente y otro ascendente producto de la diferencia de presión entre las aperturas inferior y superior. El primero ocurre adyacente a las paredes del equipo, transportando las partículas gruesas hasta la descarga inferior “ápex”, por su parte el espiral ascendente en la zona central del equipo, transporta las partículas finas hasta el rebalse superior “vortex”. Un diagrama de esto puede apreciarse en la Figura 10.

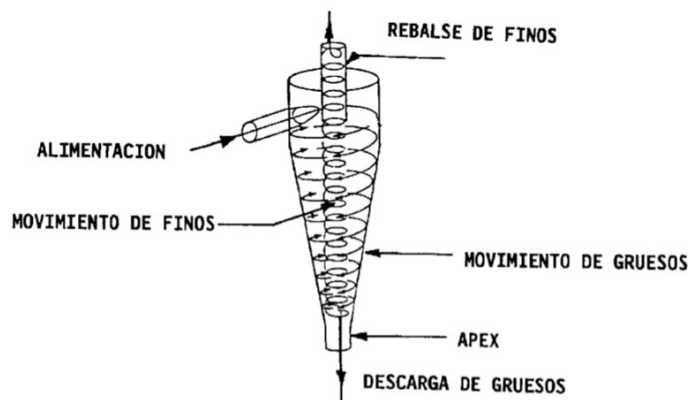


Figura 10. Esquema hidrociclón.

3.2 Configuración del circuito.

Los circuitos de molienda y clasificación, tradicionalmente contempla un hidrociclón y un molino de bolas, estos pueden presentarse en las siguientes configuraciones:

Circuito cerrado directo:

En esta configuración la alimentación fresca ingresa de forma directa al molino, para luego ser clasificada por su tamaño, donde las partículas gruesas volverán al molino mientras las que las finas seguirán a las etapas posteriores. Véase la Figura 11.

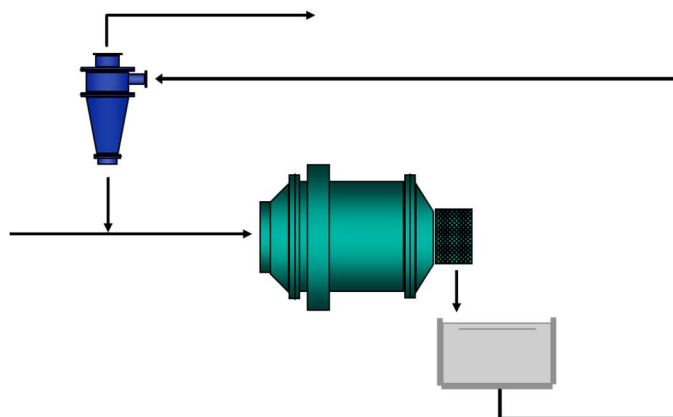


Figura 11. Circuito cerrado directo.

Circuito cerrado inverso:

En esta configuración la alimentación fresca es clasificada previamente antes de ser ingresada al molino, para eliminar la fracción de masa que posea con las condiciones adecuadas para el proceso posterior y así enviar a reducir las que estén sobre el objetivo de producción. Véase la Figura 12.

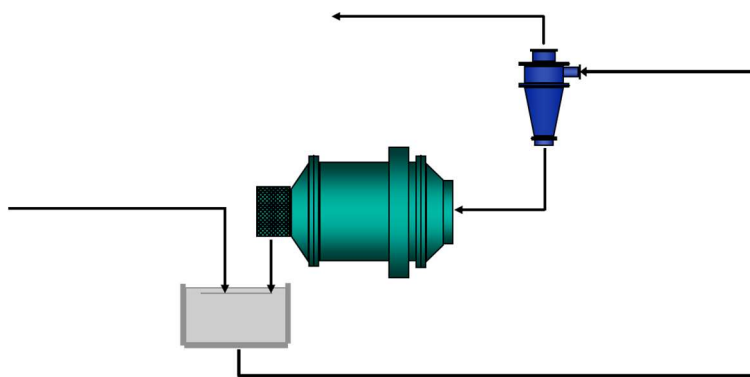


Figura 12. Circuito cerrado inverso.

Circuito cerrado dual:

Esta configuración se puede definir como la unión del circuito cerrado directo e inverso, en la que se tienen dos alimentaciones frescas. Una ingresa de forma directa al molino para ser reducida y luego clasifica, y la otra lo hace ingresando al hidrociclón para ser clasificada en primera instancia y luego reducir el mineral que este sobre el objetivo de producción. Véase la Figura 13.

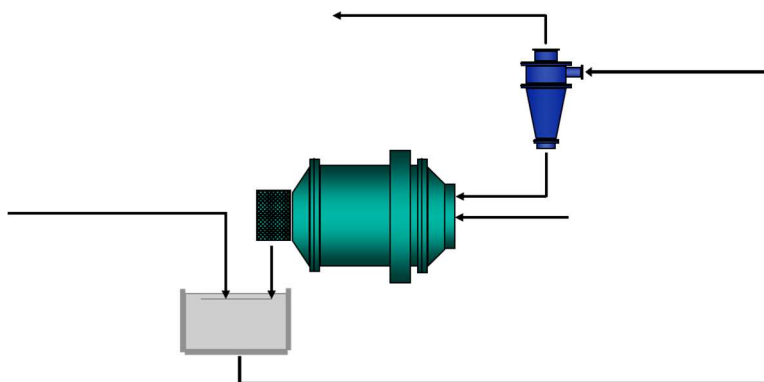


Figura 13. Circuito cerrado dual.

El objetivo de todas las configuraciones presentadas es reducir la sobre molienda del mineral, que se encuentra en una granulometría adecuada para el proceso posterior. Un parámetro importante de esto es la carga circulante, que corresponde a la relación entre el flujo que ingresa al molino y la alimentación fresca de este., se sabe que esta debe bordear el 250 % (Gupta, 2015).

3.3 Conceptos asociados al molino de bolas.

3.3.1. Dimensiones y diseño de revestimiento:

Las principales dimensiones del equipo corresponden al diámetro y largo del manto, que determinarán la potencia máxima transferible hacia el mineral y por ende, la capacidad de molienda. Esta es una variable no modificable en la evaluación y optimización de un circuito, debido a que requeriría un cambio completo del molino, como si lo es, en un diseño de una planta.

El diseño del revestimiento utilizado tiene directa relación con el consumo de potencia y el movimiento de carga, que se traduce en capacidad de molienda. Una muestra de esto puede ser observado en la Figura 14 y Figura 15, que muestra el efecto de la existencia y altura del levitador del revestimiento, en el consumo de potencia de un molino de bolas y el movimiento de carga de este, los datos mostrados corresponden a una simulación DEM ratificada con experimentos a escala de laboratorio (Bian, 2017).

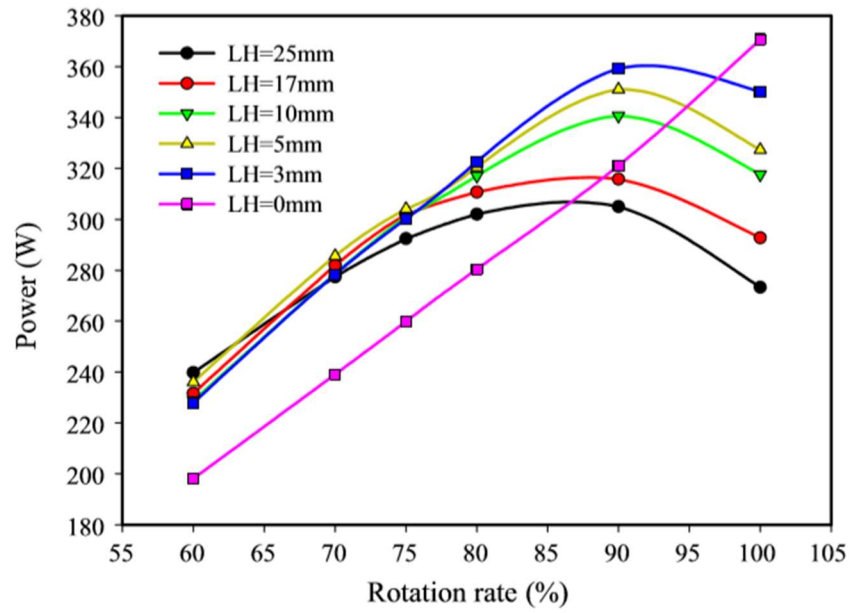


Figura 14. Consumo de potencia en función de la altura del levantador y la fracción de la velocidad crítica.

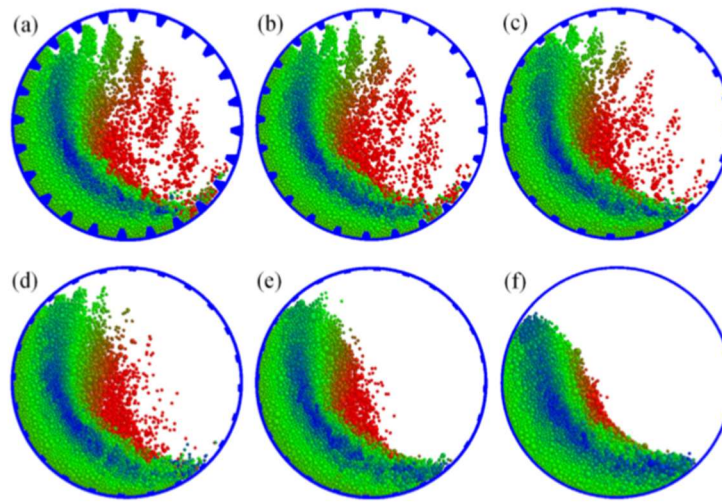


Figura 15. Efecto de la altura del levantador en el movimiento de carga.

Es importante considerar que los diseños iniciales cambiarían su forma y comportamiento a lo largo de su vida útil, por el elevado desgaste ocurrido en el proceso.

3.3.2. Fracción de la velocidad crítica

Es un parámetro que permite comparar la velocidad de giro en molinos de distintas dimensiones. La fracción de la velocidad crítica corresponde al porcentaje de la velocidad, en cual la carga del molino es centrifugada, su fórmula de esto puede verse a continuación

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} [RPM] \quad (\text{Ec. 1})$$

(Ec. 2)

$$N_c = \frac{V}{V_c} [-]$$

Donde:

D= Diámetro efectivo del molino, [feet]

V= Velocidad de giro, [RPM]

N_c= Fracción de la velocidad crítica, [-]

La fracción de la velocidad crítica afectara directamente el movimiento de carga y el consumo de potencia. Se debe intentar promover una velocidad elevada para aumentar la capacidad de molienda, procurando evitar que las bolas golpeen los revestimientos. La variable es fácilmente modificable si el motor asociado al molino presenta variador de frecuencia, por lo que es posible realizarlo sobre la marcha, en caso de no presentarlo, implicara un cambio en el sistema de poleas, que obligaría a una detención, provocando una disminución de la producción. Industrialmente se manejan valores entre el 60% y 80% (Austin et al., 1994).

3.3.3. Porcentaje de solidos

El porcentaje de solidos definirá la densidad y viscosidad de la pulpa, y a su vez la velocidad de descarga del molino, afectando el tiempo de residencia. Se conoce que una densidad de pulpa elevada en molienda húmeda produce una pulpa densa y viscosa que puede absorber el impacto de las bolas evitando la ruptura del mineral, disminuyendo la eficiencia de molienda (Austin Leonard). En la industria se manejan valores entre el 65% al 80%

3.3.4. Nivel de llenado y tamaño de bolas de molienda

El nivel de llenado corresponde al porcentaje volumétrico del molino con bolas y está relacionado con la reducción de tamaño, ya que influirá en el consumo de potencia y definirá la cantidad de medios de molienda. En la industria se manejan valores de 35% a 45% (Napier, 1999). Una de las formas de cálculo puede verse a continuación:

$$\text{Nivel de llenado \%} = 113 - \left(63 * \frac{H_c}{R} \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

H_c corresponde a la altura desde el nivel de bolas hasta el punto más alto del molino,

R corresponde al diámetro efectivo del molino.

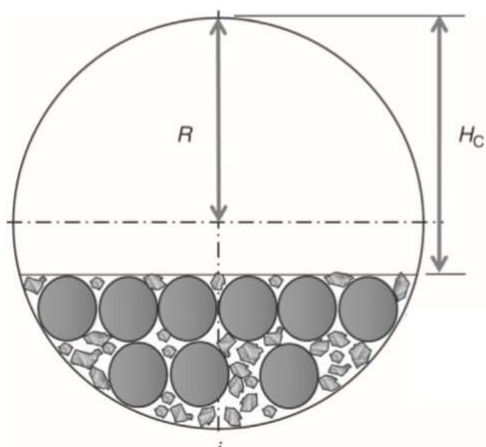


Figura 16. Nivel de llenado.

La elección correcta del tamaño de las bolas influirá en la eficiencia del proceso, ya que la masa de estas influirá en la máxima cantidad de energía suministrada al mineral, es decir bolas pequeñas no serán eficientes al reducir partículas de gran tamaño, como a su vez las bolas de gran tamaño no lo serán en partículas pequeñas. Entonces el diámetro ideal puede ser calculado

mediante las expresiones de Azzaroni's (Azzaroni, 1980) o Allis Chalmers (Gupta, 2015), que son presentadas a continuación.

Ettore Azzaroni's:

$$d_B = 6,06 * F_{80}^{0,263} * \frac{(r_s * W_i)^{0,4}}{\left(\frac{N}{D}\right)^{0,25}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Allis Chalmers:

$$d_B = 1,354 * (F_{80})^{0,5} * \left[\frac{r_s * W_i}{N_c * D^{0,5}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

d_B = Diámetro ideal de la bola, [mm]

F_{80} = Tamaño del 80% pasante de la alimentación fresca, [μm]

r_s = Densidad del mineral, [t/m^3]

W_i = Work Index de Bond's, índice de dureza [kWh/t] (métrico)

N = Velocidad de rotación del molino, [rpm]

N_c = Fracción de la velocidad critica, [-].

D = Diámetro efectivo del molino, [feet]

3.4 Conceptos asociados al hidrociclón.

3.4.1. Eficiencia de clasificación

La eficiencia de clasificación se puede determinar por las curvas de partición de Tromp, la cual consiste en la relación másica de un rango tamaño i para el flujo de alimentación y el enviado al rebalse del hidrociclón. Con esto se obtiene el D_{50} , que corresponde al tamaño que posee la misma probabilidad de ir al rebose o descarga del hidrociclón. Esto puede verse reflejado en la Figura 17.

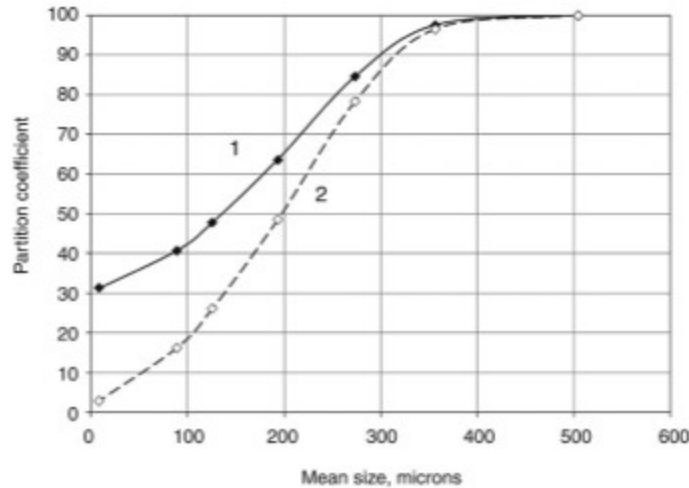


Figura 17. Curva de eficiencia de Tromp, (1) Curva real, (2) Curva corregida.

Se puede apreciar que existe una eficiencia de clasificación cercana al 100% para los tamaños más gruesos, indicando que este rango granulométrico saldrá por la descarga del hidrociclón. No obstante, para los tamaños más finos, la eficiencia de clasificación no es 0%, implicando que cierta cantidad de fino será enviada por la descarga del hidrociclón, siendo denominado esto “bypass” o corto circuito, un equipo que funcione adecuadamente estará entre 30% y 40%. Además, en la, se aprecia la curva corregida que considera que no existe corto circuito. Esta puede ser calculada con la siguiente expresión.

$$E_i = B_{pf} + (1 - B_{pf}) * E_i^c \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

E_i = Eficiencia real del tamaño i

B_p = Fracción en peso correspondiente al Bypass

E_i^c =Eficiencia corregida

3.4.2. Variables de control

Presión

La presión afectará la eficiencia de clasificación de la siguiente manera, una baja presión provocará corto circuito de fino y el alta un corto circuito de gruesos. Esta es medida mediante un manómetro en la entrada del hidrociclón, indicando si existen problemas en la bomba o en sus

secciones internas, al aumentar o disminuir la presión de trabajo o al incluir una mayor oscilación. La presión de trabajo habitual corresponde de 5 a 10 [psi]

Porcentaje de solidos

La variable de control con mayor impacto corresponde al porcentaje de sólidos en la alimentación del hidrociclón, la cual es controlada con la adición de agua en el cajón de descarga del molino de bolas. Esta modificara la densidad y viscosidad de la solución, provocando que a menor porcentaje de solidos se produzca un corte más fino, es decir un D_{50} menor (Austin, Leonard). Los valores utilizados rondan un 60% de sólido.

Otro indicador corresponde al porcentaje de sólidos en la descarga del hidrociclón, el cual está en directa relación con la eficiencia de clasificación. Al utilizar densidades mayores en la descarga se obtienen mejores resultados, pero se debe tener en cuenta, que, con esto, aumenta el riesgo de obturación de la descarga, lo que provoca un fuerte corto circuito de grueso.

Tipos de descarga

El tipo de descarga del hidrociclón esta relaciona con el corto circuito. Si es tipo spray con un ángulo elevado, existirá corto circuito de gruesos y si de tipo rope existirá corto circuito de fino, véase la Figura 18. La condición ideal corresponde a tipo spray, cuando el flujo cae en forma de cono, con un ángulo entre 20° y 30° grados.

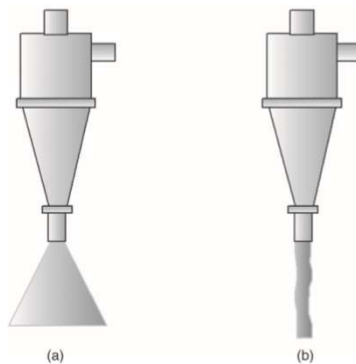


Figura 18. Tipos de descarga, (a) Spray (b) rope.

Bustamante y Concha (Gupta, 2015), señalan que el tipo de descarga estará definida principalmente por la relación entre el ápex y vortex, además indican los intervalos en que ocurren los diferentes tipos de descarga, véase la Tabla 1.

Tabla 1. Tipo de descargas según la relación entre apex y vortex.

	D_u/D_o	Condition
Bustamante	<0.34	Roping discharge
	0.34–0.5	Roping or spray
	>0.5	Spray discharge
Concha et al.	<0.45	Roping
	0.45–0.56	Roping or spray
	>0.56	Spray discharge

3.5 Estimación de la capacidad de un circuito de molienda y clasificación

Para determinar la capacidad de un circuito de molienda y clasificación, es necesario tener la potencia suministrada por el molino de bolas y la cantidad de energía requerida para la reducción de tamaño del mineral. La relación se puede observar a continuación.

$$M = \frac{P}{E} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

P= Potencia neta del molino de bolas, [kW].

E=Consumo específico de energía, [kWh/t]

M=Capacidad de molienda, [t/h]

El consumo específico de energía es obtenido utilizando la tercera ley de la conminación, postulada por Bond que describe la cantidad de energía requerida para reducir un mineral, siendo descrita a continuación:

$$E = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

E = Consumo específico de energía, [kWh/t].

F₈₀= Tamaño del 80% pasante de la alimentación fresca, [μm]

P_{80} = Tamaño del 80% pasante del producto, [μm]

W_i = Work Index de Bond's, índice de dureza [kWh/t] (métrico).

La potencia neta de un molino de bolas puede ser estimada a partir de los modelos de Bond o Hogg & Fuerstenau, siendo el ultimo utilizado por las Moly Cop Tools. Los modelos se describen a continuación:

Modelo de Bond:

$$P = 7,33 * J * N_c * (1 - 0,937 * J) * \rho_b * L * D^{2,3} * \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10*N_c}}\right) \quad (\text{Ec. 9})$$

Modelo de Hogg & Fuerstenau:

$$P = 0,238 * D^{3,5} * \left(\frac{L}{D}\right) * N_c * \rho_{ap} * (J - 1,065 * J^2) \sin \alpha \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

P = Potencia neta del molino de bolas, [kW]

L = Largo efectivo del molino, [feet]

D = Diámetro efectivo del molino, [feet]

N_c = Fracción de la velocidad critica, [-]

J = Fracción de llenado del molino de bolas, [-]

α = Angulo dinámico de la carga, [$^\circ$]

ρ_{ap} = Densidad aparente de la carga del molino, [t/m^3]

ρ_b = Densidad de las bolas, [t/m^3]

3.6 Simulación con Moly-Cop Tools

Moly-Cop Tools es un simulador diseñado en un conjunto de planillas Excel, que permite caracterizar y evaluar la eficiencia operacional de un circuito de molienda y clasificación, sobre la base de metodologías y criterios de amplia aceptación práctica.

El simulador consta de tres etapas, las cuales son el ingreso de los datos muestreados, la estimación de los parámetros de molienda y la simulación de nuevos escenarios operacionales. Considerándose de mayor relevancia el ajuste de los datos y la obtención de los parámetros de los modelos.

Para determinar el conjunto de parámetros de molienda y clasificación, se realiza un ajuste de regresión no lineal sobre estos, tal de minimizar la siguiente función objetivo, además de satisfacer el balance masa y los modelos de potencia y clasificación.

$$\emptyset = \sum w_{ik} * (F_{ik} - F_{ik}^*)^2 \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

F_{ik} = El porcentaje pasante de la i en medido en el flujo k .

F_{ik}^* =Representa el valor ajustado por el modelo para el tamaño i en el flujo k .

W_{ik} = Factor de confiabilidad para cada medición.

El modelo de molienda corresponde al llamado “Teoría Moderna de Conminucion”, el cual está definido por dos conjuntos de parámetros, de las funciones S y B . El primer conjunto es la velocidad fraccional de la fractura, relativo a las cinéticas de molienda de cada partícula independiente, y el segundo conjunto es la distribución de fragmentos primaria que caracteriza la distribución de tamaño de los fragmentos producidos como resultado de los eventos de ruptura. La ejemplificación de esto se observa en la Figura 19.

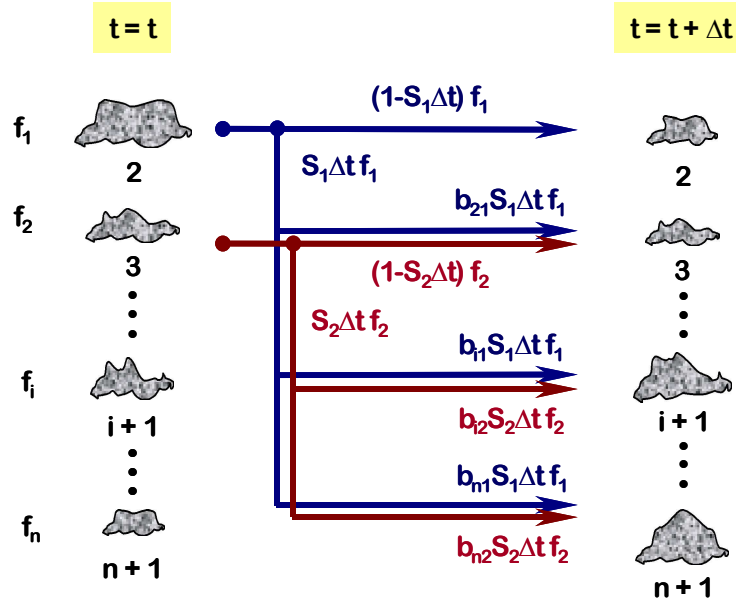


Figura 19. Dinámica de fractura para modelación.

La función de velocidad fraccional de la fractura, llamada S , se observa a continuación:

$$S_i = \frac{\alpha_0 (d_i^*)^{\alpha_1}}{[1 + \left(\frac{d_i^*}{d_{crit}}\right)^{\alpha_2}]} \quad (\text{Ec. 12})$$

Con:

$$d_i^* = (d_i * d_{i+1})^{0.5} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

S_i = Velocidad fraccional de la fractura para el tamaño i , [l/h]

d_i =Abertura en micrones de la i -enesima malla, [μm]

d_i^* = Fracción media de tamaño de la partícula i .

La función de distribución de fragmentos primaria, llamada B , se observa a continuación:

$$B_{ij} = \beta_0 * \left(\frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\beta_1} + (1 - \beta_0) * \left(\frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\beta_1} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

B_{ij} = Fracción en peso de los fragmentos resultantes de la fractura del tamaño i que terminan en j.

d_i =Abertura en micrones de la i-enesima malla, [μm]

d_j = Abertura en micrones de la j-enesima malla, [μm]

El modelo CIMM de 1983 es el utilizado en los hidrociclones. Considera 5 correlaciones independientes.

Presión de alimentación de los hidrociclones:

$$H = a_1 * \frac{Q^{1,46} \exp(-7,63 * \emptyset + 10,79 * \emptyset^2)}{(DC)^{0,2} * h^{0,15} * (DI)^{0,51} * (DO)^{1,65} * DU^{0,53}} \quad (\text{Ec. 15})$$

Tamaño de corte corregido.

$$d_{50}^c = a^2 \frac{DC^{0,33} DI^{0,58} DO^{1,91} e^{(11,12\emptyset)}}{DU^{0,8} h^{0,37} Q^{0,44} (\rho_s - 1)^{0,5}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Partición volumétrica de flujo.

$$S = \frac{Q_u}{Q_o} = a_3 \frac{h^{0,19} \left(\frac{DU}{DO} \right)^{2,64} e^{(-4,33\emptyset + 8,77\emptyset^2)}}{H^{0,54} (DC)^{0,52}} \quad (\text{Ec. 17})$$

Parámetro de Plitt en la curva de clasificación corregida

$$E_i^c = 1 - e^{\left(-0,693 \frac{d_i}{d_{50}^c} \right)^m} \quad (\text{Ec. 18})$$

Con:

(EC. 19)

$$m = e^{\left[\left(\frac{a_4}{DC} \right)^{0,646} 1,58 \frac{S}{S+1} \left(\frac{DC^2 h}{Q} \right) \right]^{0,15}}$$

Corto circuito de la pulpa

$$B_{PF} = \lambda B_{PW} \quad (\text{Ec. 20})$$

Con:

$$B_{PW} = \frac{\frac{S}{S+1} - \emptyset R_{sc}}{1 - \emptyset [1 - \lambda (1 - R_{sc})]} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$R_{sc} = \sum_{i=1}^n f_i E_i^c \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

H= Presión de alimentación expresada en altura de columna de pulpa de alimentación equivalente, [feet].

DU= Diámetro de la descarga del hidrociclón, [in].

DO= Diámetro del rebalse del hidrociclón. [in].

DI= Diámetro de la alimentación del hidrociclón [in].

$\emptyset$ = Diámetro del hidrociclón, [in].

Q= Flujo de alimentación, [m³/h]

h= Altura del ciclón, definida como la distancia desde el fondo del vortex hasta la parte superior del ápex, [in].

ρ_s = Densidad del solido [m³/t]

Q_u= Caudal de la descarga del hidrociclón, [m³/h]

Q_o= Caudal de del rebose del hidrociclón, [m³/h]

S= Razón de la partición del flujo entre la descarga y el rebalse del hidrociclón.

m = Pendiente de clasificación de Plitt.

E_c^i = Eficiencia corregida del tamaño i .

B_{pf} = Bypass de fino de la pulpa en la descarga del hidrociclón.

B_{pw} = Bypass de agua hidrociclón.

R_s^C = la recuperación hipotética total de sólidos si la eficiencia del ciclón fuese la eficiencia corregida

Considerando los modelos presentados y la restricción que el balance de flujos y sus componentes debe satisfacer, se obtienen los parámetros de molienda $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ y d_{crit} y para clasificación $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ y λ .

4 Objetivos

4.1 Objetivo Global

Analizar el desempeño del circuito de molienda y clasificación de la Compañía Minera La Patagua, según su capacidad de tratamiento y granulometría de producto, con el propósito de recomendar vías de optimización del proceso que permitan un aumento en la producción.

4.2 Objetivos específicos

- Establecer la situación actual de referencia del circuito de molienda y clasificación.
- Evaluar el desempeño de los molinos de bolas e hidrociclones.
- Identificar las variables que presentan la mayor posibilidad de generar un aumento en la capacidad.
- Generar propuestas que permitan un aumento de capacidad.
- Evaluar económicamente las propuestas generadas.

4.3 Hipótesis

Es posible aumentar el tonelaje tratado por el circuito de molienda y clasificación, sin afectar la calidad del producto enviado a flotación, a través de modificaciones en los hidrociclones y/o molinos actuales, sin necesidad de adquirir nuevos equipos.

5 Metodología y Acciones Realizadas

5.1 Estado actual del circuito de molienda y clasificación.

Se revisaron los registros históricos de producción del año 2018 y se comparó con las ventas de este, con el objetivo de conocer si el balance se cumplía satisfactoriamente. Al existir diferencias, se analizó su origen según la información proporcionada por la compañía y la observación visual durante la estadía, apoyado por los registros de las cámaras de seguridad. Para justificar lo encontrado, se comparó lo procesado registrado por la planta, lo despachado desde las minas, considerando los stocks y las ventas del mismo periodo.

Posteriormente se comparó la producción objetivo, la registrada y la obtenida teóricamente que consideran la naturaleza del mineral y las condiciones operacionales actuales. Con esto se determinó si los molinos se encuentran sobre o subutilizados.

Finalmente, para caracterizar el desempeño de los molinos y ciclones se realizó un muestreo para los tres molinos en los siguientes flujos:

1. Alimentación fresca.
2. Rebalse del ciclón.
3. Descarga del ciclón.
4. Descarga del molino.

El flujo N°1 fue obtenido deteniendo la correa de alimentación y retirando un metro de esta, siendo guardando en un balde rotulado generando un composite. Adicionalmente se registraba su masa para estimar el flujo procesado en el momento.

Para los flujos del N°2 al N°4 fueron obtenidos mediante corte, siendo acumulados de igual manera que el N°1. Todos los flujos fueron muestreados cada una hora durante un periodo de 8. Adicionalmente se registró lo siguiente:

- 3 El porcentaje de solido de los flujos que fuesen pulpa, mediante una balanza Marcy, incluyéndose la alimentación al ciclón
- 4 El consumo de corriente de los molinos mediante un medidor análogo.
- 5 La presión en la entrada del ciclón, instalando manómetros nuevos el día del muestreo para garantizar una medición correcta.

Además, se tomó una muestra de los minerales de la mina Don Jaime y Don Peumo desde los conos del producto del chancado secundario para determinar su Work Index. El detalle del procedimiento puede ser visto en el anexo 11.1.

Los tambores rotulados que contenían las muestras permanecieron tres días sin movimiento, para que se produjera la decantación de sólidos y poder eliminar el agua sobrenadante, con el cuidado de no levantar las partículas decantadas. Cada muestra húmeda fue trasvasijada a bandejas, para ser secadas en una estufa a una temperatura menor de 100[°C], evitando la ebullición del agua. Una vez las muestras secas fueron homogenizadas mediante roleo, se tomó una muestra representativa usando el separador de rifles, la cual posteriormente fue pesada y deslamada bajo la malla #400. El mineral sobre la malla fue recuperado y posteriormente secado, para determinar la fracción de mineral bajo la malla utilizada.

Las muestras secas y deslamadas fueron procesadas por un tamizador vibrador utilizando una serie de tamices en secuencia geométrica según su apertura, que corresponden a #4, #6, #10, #14, #18, #25, #50, #70, #100, #140, #200 y #270 ASTM.

Los resultados fueron introducidos a las planillas Moly-Cop Tools con el fin de determinar los parámetros de molienda del circuito. Para los casos de los molinos Allis Chalmers, se utilizó la planilla “BallParam_Direct”, la cual considera un circuito cerrado directo. En el caso del molino Hardinge se utilizó la planilla “BallParam_Dual” ya que considera un flujo que ingresa en el cajón de descarga del molino, además del circuito cerrado directo tradicional.

Una vez ingresados los datos en la hoja de “Data File” se utilizó la hoja “Control_Panel”, donde se estimaron los parámetros del modelo para el circuito de molienda, utilizando la herramienta Solver de Excel en el método de regresión no lineal, lo que permite minimizar el error asociado a la función objetivo.

Con esto se obtiene una visión global del funcionamiento del circuito de molienda y clasificación.

5.2 Revisión de variables operacionales y propuestas de mejora.

Debido a la gran cantidad de variables involucradas, fue necesario seleccionar cuales presentan las mayores diferencias con la industria minera y/o literatura. Además, cuáles de estas son las que generarían el mayor impacto en la capacidad de producción.

Una vez seleccionadas las variables principales, se realizaron simulaciones y/o estimación del impacto en la capacidad que estas tendrían al ser modificadas.

5.3 Analisis economico de las propuestas.

Teniendo las estimaciones del aumento de capacidad, producto de concretar las propuestas generadas individualmente, se realizó un análisis económico utilizando el nuevo delta ingresos y egresos, considerando los costos asociados a la adquisición, instalación, detención de la producción y maquila.

5.4 Resultados propuestos concretadas.

Se realizó un balance de masa y posterior análisis económico para determinar el impacto final de las propuestas que fueron concretadas.

6 Resultados

6.1 Caracterización mineral.

Los resultados de la prueba de Bond y densidad del mineral se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Índice de Bond y densidad.

Índice de Bond Mineral Don Jaime [kWh/t]	Densidad mineral Don Jaime [t/m ³]	Índice de Bond Mineral Don Peumo [kWh/t]	Densidad Mineral Don Peumo [t/m ³]
18,4	2,7	14,5	2,7

6.2 Resultado muestreos circuito.

Mediante el muestreo realizado, se obtuvieron las curvas granulométricas de los distintos flujos. Esto se muestra en las Figura 20, Figura 21 y Figura 22

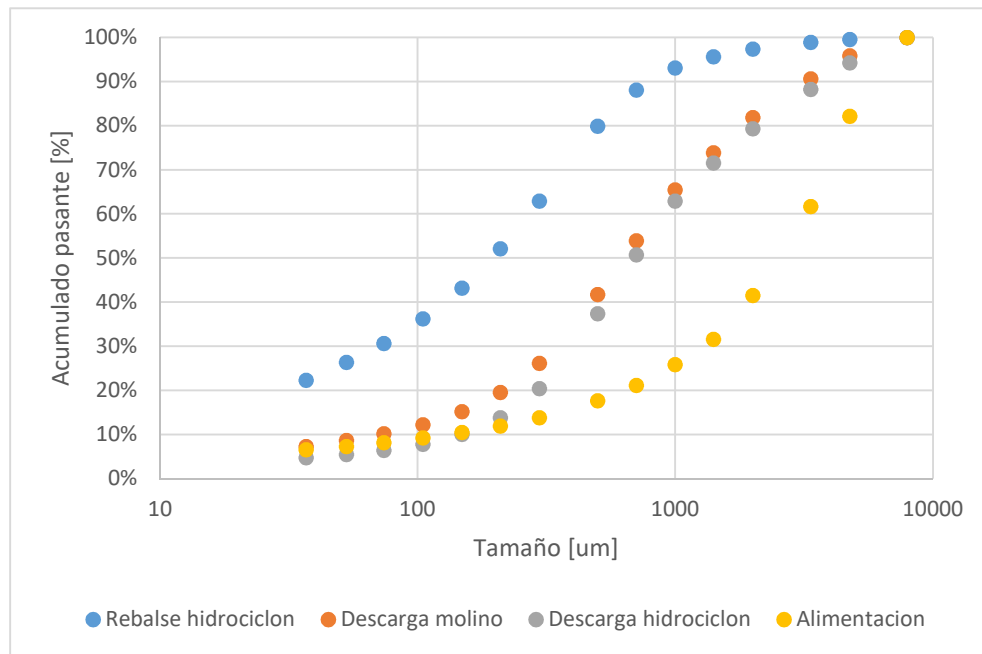


Figura 20. Curvas granulométricas molino Allis Chalmers 6'x5'.

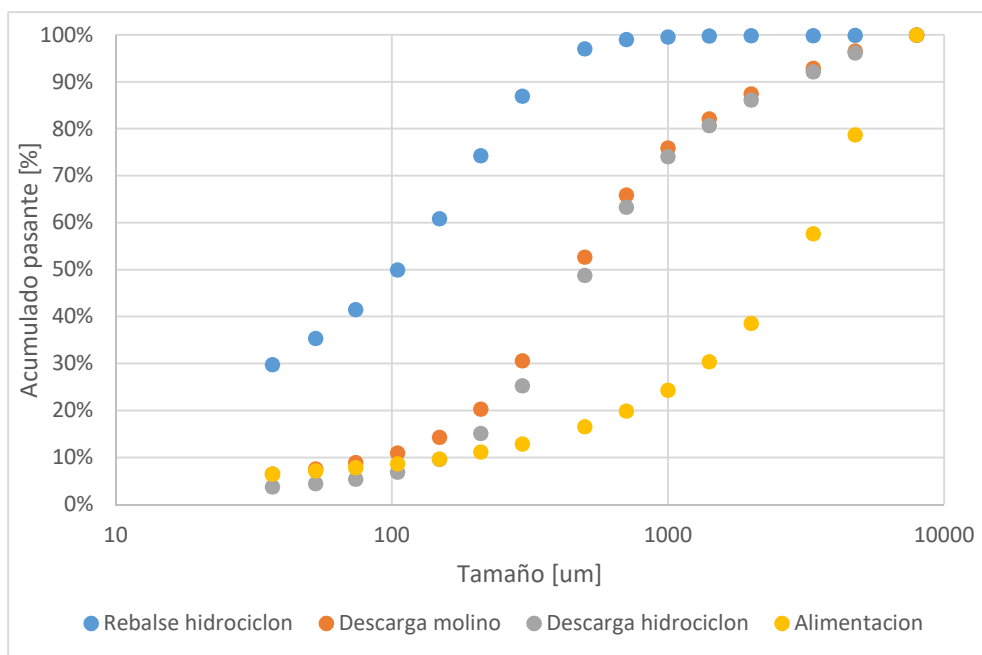


Figura 21. Curvas granulométricas molino Allis Chalmers 5'x6'.

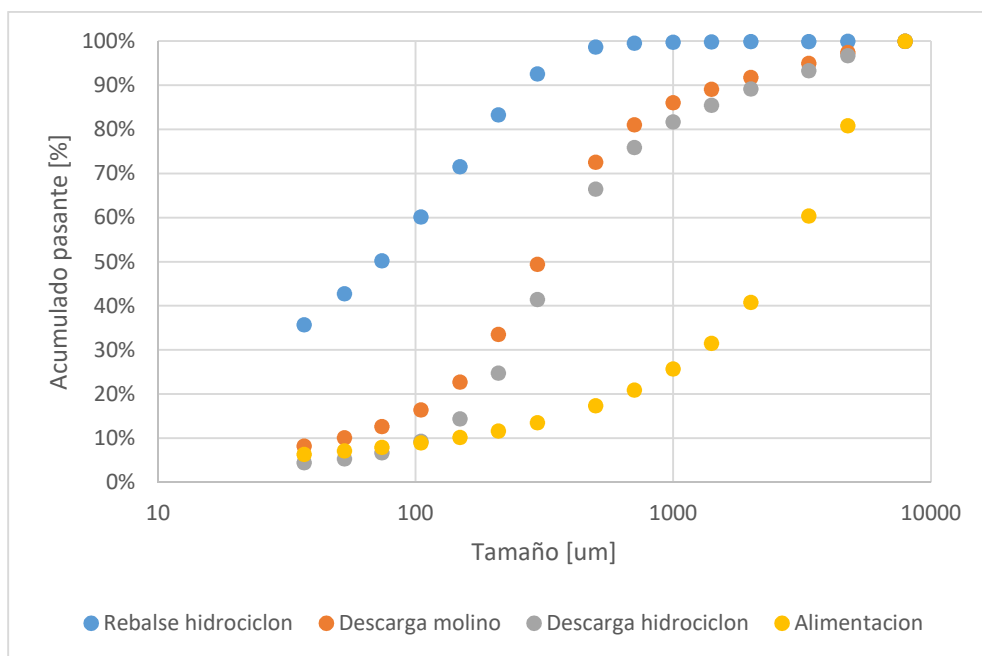


Figura 22. Curvas granulométricas molino Hardinge 8'x48"

Los distintos D_{80} del circuito de molienda se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización por D_{80} del circuito de molienda.

	Rebalse hidrociclón	Descarga hidrociclón	Descarga molino	Alimentación fresca
Molino Allis Chalmers 6'x5'	491,1	2087	1838	4608
Molino Allis Chalmers 5'x6'	246	1360	1238	4927
Molino Hardinge 8'x48"	198	915	797	4699

La media del porcentaje de sólidos en los distintos flujos y la potencia de los molinos pueden ser vistos en la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de sólidos flujos y potencia molinos.

	Porcentaje de sólidos %			Potencia [kW]
Molino / Lectura	Rebalse hidrociclón	Descarga hidrociclón	Descarga molino	Motor
Molino 6'x5'	45	80	77	41
Molino 5'x6'	33	79	77	32
Molino 8'x48"	27	80	76	104

7 Discusión.

7.1 Estado actual del circuito de molienda y clasificación de la Compañía Minera La Patagua.

7.1.1. Análisis de registros históricos y pérdidas.

Durante la estadía en la Compañía se visualizaron numerosos derrames de mineral dentro del circuito de molienda y clasificación, teniendo como principal elemento, el acondicionador, mostrado en la Figura 2. Esto, provocando inestabilidad operacional y pérdidas de producción no cuantificadas.

Durante los meses de producción del año 2018 existieron diferencias significativas entre la producción real y la teórica, en la cual no se daba ninguna explicación o cuantificación de lo sucedido. Por esto se analizó el año de ventas a ENAMI en 2018, que corresponderá al periodo producción entre el 26-12-2017 y el 25-12-2018 incluyéndose ambas fechas, para comparar la producción real y la teórica.

Comparación de la producción registrada por planta y la despachada.

Los datos reportados por la planta y el cobre fino despachado se observan en el anexo 11.2. El balance entre la producción real y la teórica puede verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Balance de producción real /teórico.

Producción de cobre fino real [TMS]	1782,4
Cobre fino recuperado teórico [TMS]	1883,9
Diferencia producción real / teórico [TMS]	-101,5

Se puede concluir que existen diferencias significativas entre la producción real y la registrada, esta corresponde a -101,5 [TMS] de cobre fino, equivalentes a un 5,7% de la producción anual.

Comparación de lo registrado por planta, la producción real equivalente y lo extraído por las minas.

Lo registrado por la planta, la producción real equivalente y lo extraído desde las minas considerando su stock inicial y su final, puede ser visto en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de lo procesado registrado, despachado y extraído por las minas.

Reportado por la planta [TMS]	149258
Producción real equivalente [TMS] (*)	138416
Extraído por las minas [TMS]	137522

(*) La producción real equivalente es estimada a partir de la recuperación, ley de la alimentación y el cobre fino despachado a ENAMI de las Tabla 52 y Tabla 53 en el anexo 11.2.

Existen diferencias entre lo extraído por las minas y lo reportado por la planta, que corresponde a -11736 [TMS], evidenciando que lo reportado en tonelaje, no corresponde a un dato representativo.

Comparando la producción real equivalente y lo extraído por las minas, se puede apreciar que no existen diferencias significativas entre estas cantidades. Esta tiene una variación del 0,7 % que pueden ser asociadas a errores de mediciones en los pesajes de los camiones, humedades o leyes. Por lo anterior, se concluye que no existen pérdidas en el fino despachado y el balance se cumple satisfactoriamente.

Lo anterior genera la inquietud del error en la estimación en el tonelaje procesado que es registrado por la planta.

Análisis de diferencias entre lo reportado por planta y el cobre fino despachado.

Las diferencias mostradas en la Tabla 6, entre lo reportado por planta y la producción real estimada corresponden a 7874 [TMS] de mineral, que son explicadas los siguientes motivos:

- Error en la estimación de los flujos en las cintas transportadoras.
- Derrames de mineral dentro de la planta concentradora.

Los errores en la estimación del flujo se deben a la alta variabilidad de la masa proporcionada por los chutes y el bajo control que existe en las cintas transportadoras. Al existir un único operar por turno para los tres molinos y el control de estos es completamente manual, dificulta poseer datos de con una gran confiabilidad.

Los derrames de mineral dentro de la planta de concentradora son de carácter recurrente. Dentro de los eventos más recurrentes se encuentran:

- Embancamiento del acondicionador.

- Embancamiento tubería que recibe los rebalses de los hidrociclones asociados a los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5'.
- Embancamiento de la alimentación de los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5'.

Se realizó un balance para determinar la cantidad atribuible a cada problemática. Para esto, las únicas variables cuantificadas, corresponden al mineral derramado retirado y dejado en stock, el mineral derramado reprocesado y la cantidad de embancamientos del acondicionador.

El balance del mineral derramado puede ser visto en la Tabla 7.

Tabla 7. Balance derrames planta concentrada.

Stock inicial derrame [TMH]	0
Stock final derrame [TMH]	850
Derrame reprocesado [TMH]	4410
Derrame producido [TMS] (*)	5156
Derrame producido equivalente a mineral [TMS] (*)	6135

(*) Se consideró una humedad de 1,98%, además los derrames producidos, poseen una ley mayor en 19 % a la ley de cabeza, debido a que este mineral se mezclada con la cola de la etapa cleaner como puede verse en la Figura 2, por lo anterior se debe transformar a un mineral equivalente con la ley de planta de 1,55%.

Utilizando la información de la Tabla 7, y lo calculado anteriormente, se obtiene el porcentaje de error atribuible a las perdidas por derrame y error de estimación que corresponden al 77,8% y 22,2% respectivamente.

El mayor porcentaje de discrepancias, entre lo reportado por planta y la producción real, corresponde a los derrames generados, siendo equivalentes a 6135 [TMS/año] o 16,8[TMS/día], por su parte el error de estimación corresponde a 1746 [TMS/año] o 4,8 [TMS/día]. Los derrames son una pérdida de producción relevante, aunque vuelva a ingresar al sistema, genera una disminución en la capacidad del mineral fresco.

El derrame de mayor impacto visual corresponde al embancamiento del acondicionador, por lo que se realizó un balance para determinar qué porcentaje de los derrames son atribuibles a este, además de ser el único que es cuantificado y registrado cuando ocurre.

El balance de los embancamientos del acondicionador se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Balance embancamientos acondicionador.

Embancamiento acondicionador [N°]	105
Embancamiento acondicionador [TMH]	2143
Embancamiento acondicionador [TMS] (*)	2100
Embancamiento acondicionador equivalente mineral [TMS] (*)	2499

(*) Se considera una humedad del 1,98%. Además, al igual que el mineral derramado, este posee una ley mayor al de la cabeza y se considera un 19% mayor para considerar un mineral equivalente.

Considerando la Tabla 8 y lo descrito anteriormente, se determina que el embancamiento del acondicionador corresponde a un 40,7% de los derrames y un 59,3% para los otros tipos.

Pérdida de capacidad producto de los derrames.

Utilizando la Tabla 7, se estima que existe una pérdida de capacidad de 16,8 [TMS/día] debido a los derrames producidos, estos provocan desajustes en el balance de masa, debido a que no son contabilizados ni restados de la producción diaria, por lo que eran contabilizados dos veces.

La situación provoca un flujo real de 396[TMS/día] en el punto de control, con la excepción, que solo 379,2 [TMS/día] llegan a flotación, esto puede ser visualizado en la Figura 23.

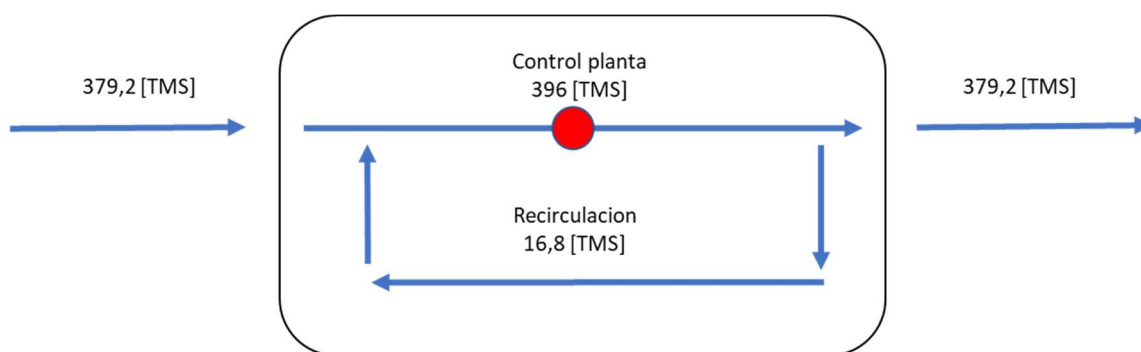


Figura 23. Recirculación por derrames.

7.1.2. Análisis y estimación de la capacidad teórica del circuito.

Estimación de capacidad de molienda.

Se realiza un análisis macro para comparar los flujos actuales con estimaciones teóricas, en base a los modelos de potencia descritos en 3.5. Debido a que el circuito presente, no permite determinar, mediante las ecuaciones tradicionales la capacidad de molienda del molino Hardinge 8'x48" ya que este posee dependencia de los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5'. Por lo tanto, se compara el flujo actual, con el estimado al tener los tres molinos en circuito cerrado directo de manera independiente.

Los datos necesarios del modelo para cada molino se encuentran en 4.2. En todos se considera un ángulo dinámico de carga de 32° y un porcentaje de sólidos de descarga de 77%. En el caso del molino Hardinge 8'x48" se agrega un incremento del 30% en la potencia obtenida, según lo postulado en (Austin & Hilton, 1992). Finalmente, la potencia de los molinos puede verse en la Tabla 9.

Tabla 9. Potencia teórica molinos.

Molino Hardinge 8'x48" [kW]	Molino Allis Chalmers 5'x6' [kW]	Molino Allis Chalmers 6'x5' [kW]
103,2	30,9	43,1

Considerando un work index de 16,45[kW/t], para una mezcla 1:1 de Peumo y Jaime, con un P_{80} de 170[μm] y un F_{80} de 4800[μm] se obtuvo un consumo específico de energía de 10,24[kWh/t]. Utilizando lo anterior y la Tabla 9 se obtuvo la capacidad teórica para cada molino. Esto se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Capacidad teórica.

Molino Hardinge 8'x48" [TMS/h]	Molino 5'x6' [TMS/h]	Molino 6'x5' [TMS/h]
10,07	3,02	4,21

Considerando que la capacidad de producción de los 3 molinos de bolas, se obtiene una capacidad de planta de 17,30[TMS/h].

Utilizando la misma dinámica descrita anteriormente es posible estimar la capacidad teórica actual de los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5 para su condición de operación. La modificación realizada corresponde al considerar un P_{80} de 250[μ m] para ambos, lo cual entrega un consumo específico de energía de 8,03 [kWh/t]. Al mantener constante la potencia suministrada y el work index estimado, se obtiene una capacidad de 3,85[TMS] y 5,37[TMS] para los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5 respectivamente

Comparación entre capacidad teórica y el flujo objetivo de la planta.

La comparación entre la capacidad teórica y el flujo objetivo en planta puede verse en la Tabla 11. Además, se agrega el flujo real procesado del año 2018 obtenido en 0, considerando una disponibilidad del 93% en la planta.

Tabla 11. Comparación capacidad teórica, flujo objetivo y procesado real.

Capacidad teórica [TMS/h]	Flujo objetivo [TMS/h]	Flujo real 2018 [TMS/h]
17,30	17,45	16,99

La capacidad teórica y el flujo objetivo no presentan diferencias significativas lo que implica que el objetivo de producción es alcanzable, pero la planta se exige a su máxima capacidad, lo que podría provocar la inestabilidad en ella. El flujo real de 2018 es menor a los otros dos, producto a los derrames dentro de la planta. Debido a que existen días que no ocurren derrames, este hecho demostraría, que no existiría falta de capacidad, pero si una de control, por ende problemas operacionales.

Con el objetivo actual de tratamiento, se consigue una menor producción real con respecto a las posibilidades teóricas, lo cual muestra la posibilidad que al disminuir el objetivo de producción y no utilizar la capacidad máxima, es posible aumentar la producción real debido a la disminución de las pérdidas generadas por los derrames.

Utilizando lo calculado en 0, se compara el flujo teórico con el actual procesado por los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5, esto se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparación capacidad teórica y flujo actual de los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5'.

	Molino 5'x6' [TMS/h]	Molino 6'x5' [TMS/h]
Capacidad teórica [TMS]	3,85	5,37
Flujo actual [TMS]	3,63	5,52
Diferencia teórica / actual [TMS]	0,22	-0,15

Las diferencias encontradas entre el flujo actual y la capacidad teórica de los molinos Allis Chalmers 5'x6 y 6'x5', no son significativas al considerar la gran cantidad de supuestos utilizados en la estimación.

7.1.3. Análisis del muestreo del circuito.

Los datos recolectados del circuito mostrados en 6.2, fueron ingresados en las Moly-Cop Tools, para determinar los parámetros del circuito de molienda y posteriormente realizar simulaciones de nuevos escenarios operacionales. Para esto se trabajó de manera independiente los tres molinos.

El ingreso de los datos a la planilla BallParam_Direct" y los resultados del ajuste a los modelos del circuito de molienda, para los molinos Allis Chalmers 5'x6', 6'x5' y Hardinge 8'x48" puede verse desde anexo 11.3.1 hasta el 11.3.6. En el caso del molino Hardinge, se simuló usando un largo 30% mayor al real de la sección cilíndrica, para entregar el delta potencia mencionado por (Austin & Hilton, 1992) , para compensar la sección cónica de este, debido a que las planillas Moly-Cop Tools están diseñadas para molino cilíndricos regulares. Además, no se consideró la cola etapa cleaner ya que presenta una granulometría menor a los 75[μm] y un porcentaje de sólidos de 6%, siendo ésta principalmente agua.

Resultados de granulometría, flujos máscicos y eficiencia de clasificación del molino Allis Chalmers 5'x6'.

Se muestran los flujos y resultados granulométricos obtenidos mediante el muestreo cálculo de las planillas, véase Tabla 13.

Tabla 13. Granulometría y flujos máscicos del molino Allis Chalmers 5'x6'.

	Alimentación fresca	Alimentación molino	Descarga molino	Descarga hidrociclón	Rebalse ciclón
Flujo [TMS/h]	3,63	37,37	37,37	33,74	3,63
%-#18	24,38	68,69	75,92	73,45	98,84
%-#200	7,84	5,66	8,92	5,43	41,39
D ₈₀ [μm]	4927	1811	1238	1360	246,4

Los datos permiten obtener la carga circulante del circuito, que corresponde a 930%. Por su parte el rebalse del ciclón presenta una granulometría de salida correcta, que corresponde a un P₈₀ de 246,4[μm].

La eficiencia del hidrociclón puede verse en la Figura 24, se aprecia que este presenta una baja eficiencia de clasificación debido a que presenta un corto circuito de fino superior al 50%.

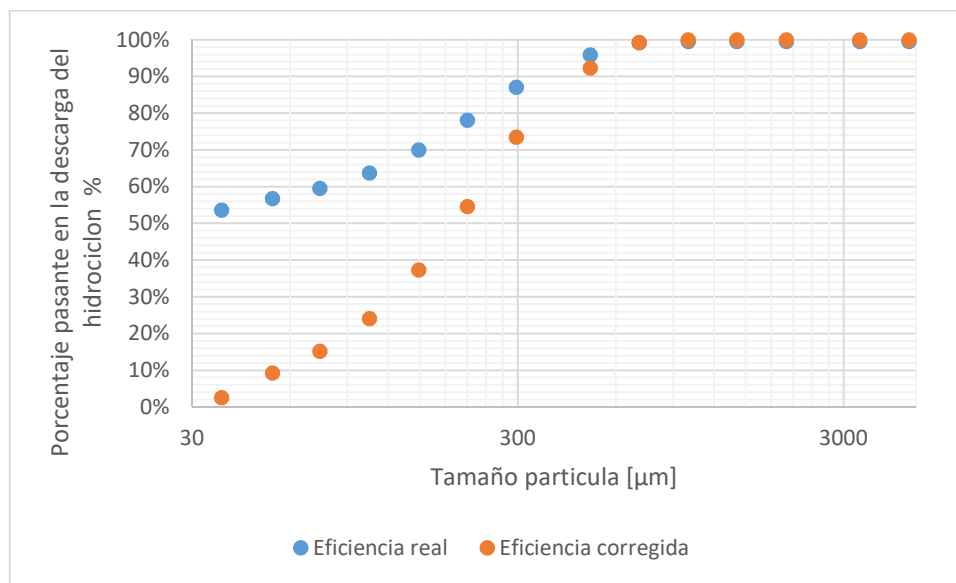


Figura 24. Curva de eficiencia del hidrociclón asociado al molino Allis Chalmers 5'x6'.

Los valores obtenidos de d₅₀ corresponden a 162,4[μm] para la curva corregida y para caso de la eficiencia real no es posible obtener el valor, debido a que este es inferior al menor tamaño de malla utilizado.

Resultados de granulometría, flujos másicos y eficiencia de clasificación del molino Allis Chalmers 6'x5'.

Se muestran los flujos y resultados granulométricos obtenidos mediante el muestreo cálculo de las planillas, véase Tabla 14.

Tabla 14. Granulometría y flujos másicos molino Allis Chalmers 6'x5'.

	Alimentación fresca	Alimentación molino	Descarga molino	Descarga hidrociclón	Rebalse hidrociclón
Flujo [TMS/h]	5,52	37,16	37,16	31,64	5,52
%-#18	25,90	56,63	66,47	61,00	92,15
%-#200	8,15	6,75	10,08	6,50	30,57
D ₈₀ [μm]	4608	2744	1842	2091	491,6

Los datos permiten obtener la carga circulante del circuito, que corresponde a 573,2%. Por su parte, el rebose el ciclón presenta un P₈₀ de 491,6[μm] siendo un valor inadecuado, ya que este debiese ser menor a 250[μm].

La eficiencia del ciclón puede verse en la Tabla 13, se aprecia que este presenta una baja eficiencia de clasificación debido a que el corto circuito de fino es superior al 50%.

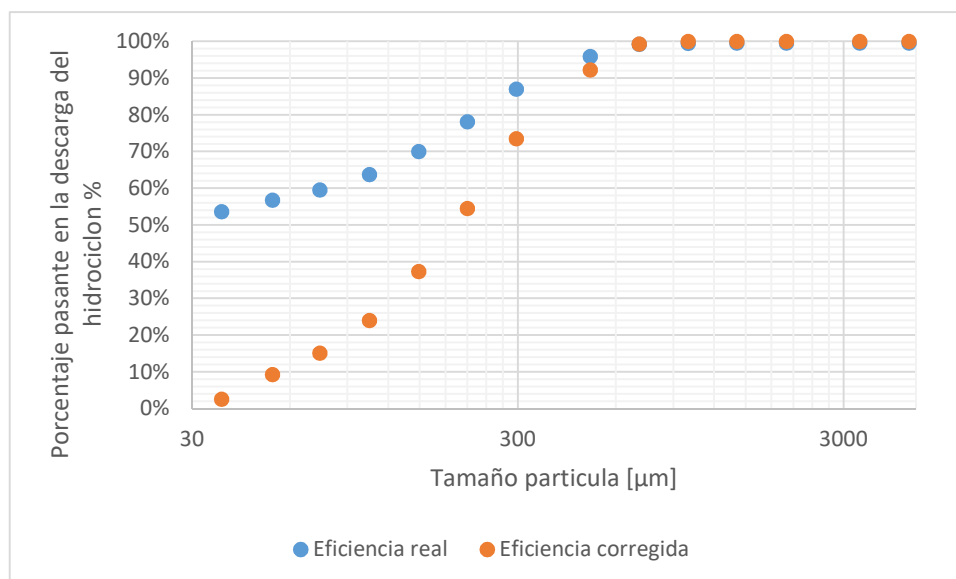


Figura 25. Curva de eficiencia del hidrociclón asociado al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Los valores obtenidos de d50 corresponden a 231,9 [μm] para la curva corregida y para caso de la eficiencia real no es posible obtener el valor, debido a que este es inferior al menor tamaño de malla utilizado.

Resultados de granulometría, flujos máscicos y eficiencia de clasificación del molino Hardinge 8'x48".

Se muestran los flujos y resultados granulométricos obtenidos mediante el muestreo cálculo de las planillas, véase Tabla 15.

Tabla 15. Granulometría y flujos máscicos del molino Allis Chalmers 6'x5'.

	Entrada lateral	Entrada molino	Descarga molino	Entrada hidrociclón	Descarga hidrociclón	Rebalse hidrociclón	Carga fresca
Flujo [TMS/h]	9,15	84,94	84,94	94,09	76,64	17,45	8,30
%-#18	95,69	76,71	84,43	85,53	82,23	100,00	25,71
%-#200	35,00	6,79	12,23	14,45	6,65	48,67	8,00
D ₈₀ [μm]	395	1243	789	731	905	189	4699

Los datos permiten obtener la carga circulante del circuito, que corresponde a 439%. Por su parte el rebalse del ciclón presenta P_{80} de 189 [μm] siendo inadecuado, ya que este no debiese ser menor a 170 [μm].

La eficiencia del hidrociclón puede verse en la Figura 24, se aprecia que este presenta una eficiencia de clasificación normal debido a que el cortocircuito de fino es menor al 40%, siendo este, el con mayor eficiencia que los hidrociclones analizados.

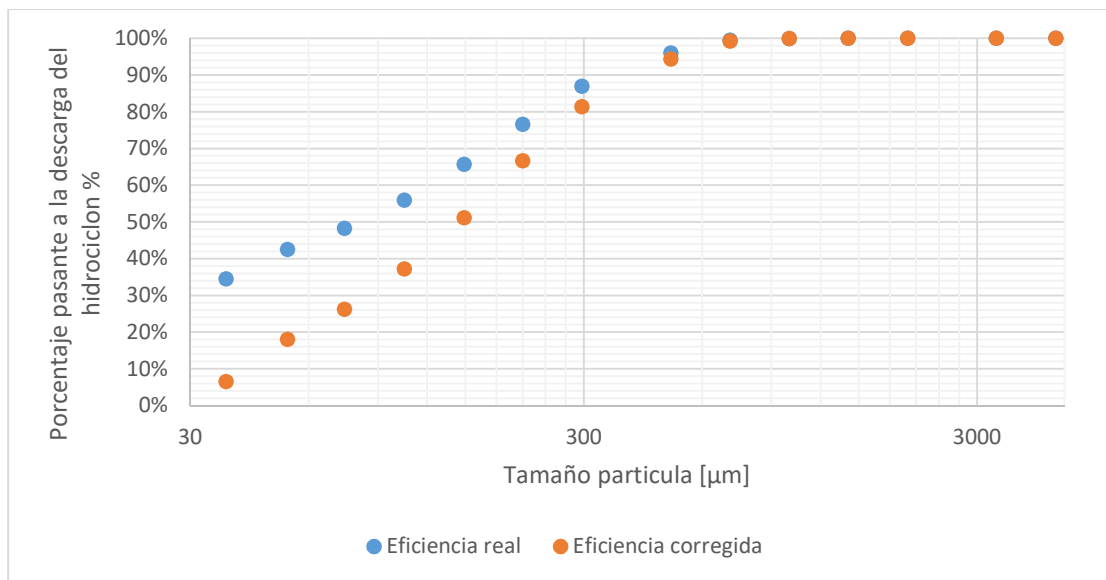


Figura 26. Curva de eficiencia del hidrociclón asociado al molino Hardinge 8'x48''.

Los valores obtenidos de d_{50} corresponden a 149 [μm] para la curva corregida y para caso de la eficiencia real es 121,9 [μm].

Capacidad actual y dependencia.

Para comprender la dinámica del circuito, es necesario conocer la respuesta individual y dependencia de modificar los flujos de alimentación. Para esto, los resultados obtenidos con anterioridad son ingresados a la planilla “BallSim_Direct” que permiten la iteración y simulación de nuevos escenarios.

Para el molino Allis Chalmers 5'x6' la relación entre el flujo de alimentación y el P_{80} , puede verse en la Figura 27.

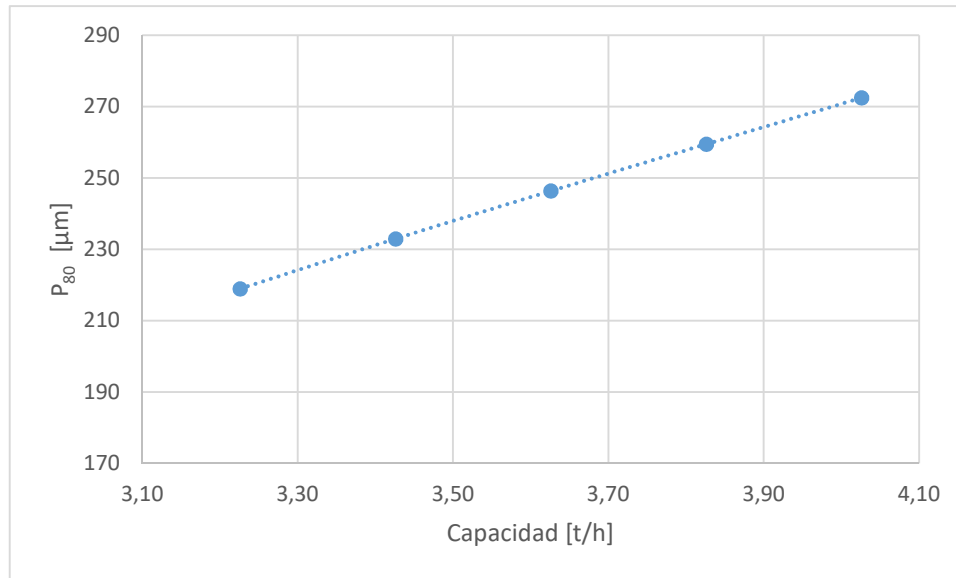


Figura 27. Respuesta del P_{80} al modificar el flujo de alimentación del molino Allis Chalmers 5'x6'.

El molino Allis Chalmers 6'x5' no cumple las condiciones necesarias para ser simulado, debido que, al momento del muestreo, este se encontraba fuera del resultado operacional esperado, por lo cual, no es posible obtener la relación entre el flujo másico y el P_{80} .

Para evaluar la respuesta del molino Hardinge 8'x48" al modificar el flujo de este o los molinos Allis Chalmers 5'x6' y/o 6'x5', requirió generar un caso base para la simulación, debido que el producto del circuito presenta un P_{80} mayor a 170 [μm], provocada por un mal funcionamiento del molino Allis Chalmers 6'x5' que tenía una granulometría superior al objetivo. Entonces se simuló considerando que la distribución granulométrica de salida del último es igual a la del molino Allis Chalmers 5'x6'. Para esto se introducen los datos a la planilla "BallSim_Dual" verificando primero el caso inicial muestreado y posteriormente se genera el caso base utilizando la distribución granulométrica de los molinos Allis Chalmers 5'x6' en el 6'x5', sus resultados pueden verse en la Figura 28.

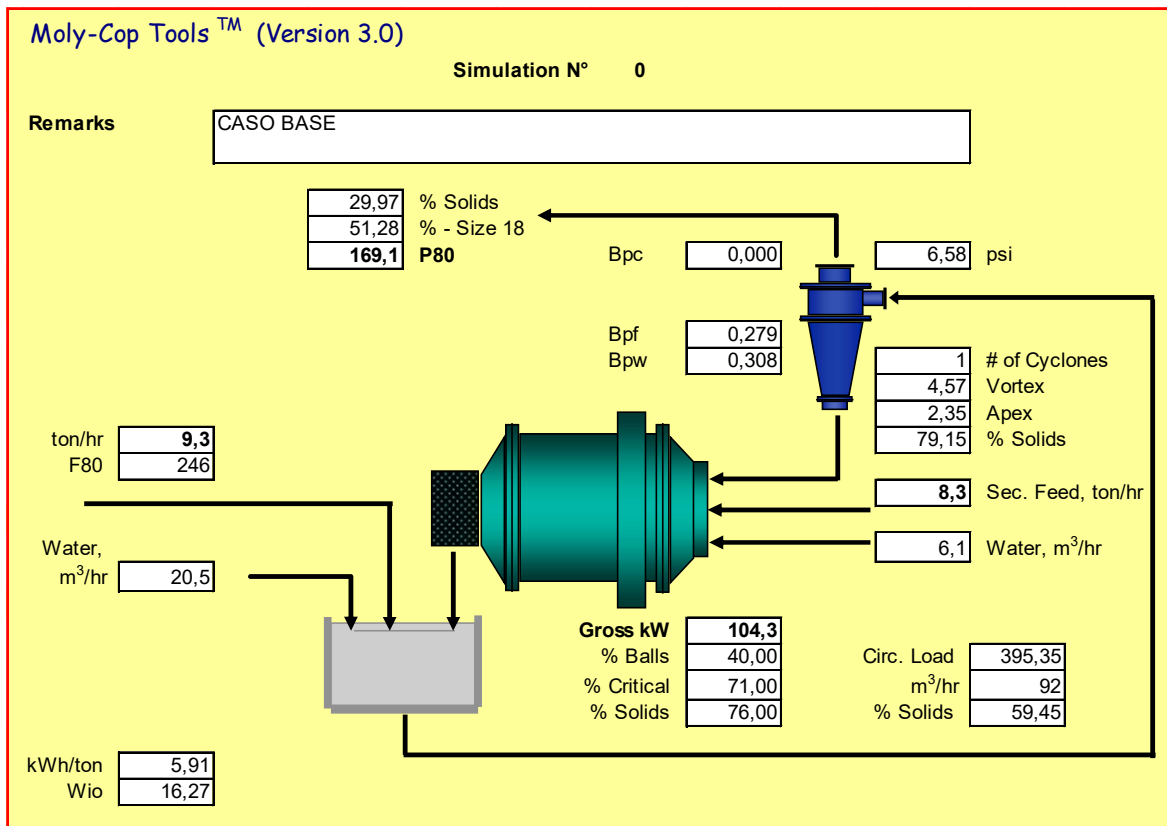


Figura 28. Caso base para el molino Hardinge 8'x48''.

La relación entre los distintos flujos que ingresan al circuito y el P_{80} , puede verse en las Figura 29 y Figura 30

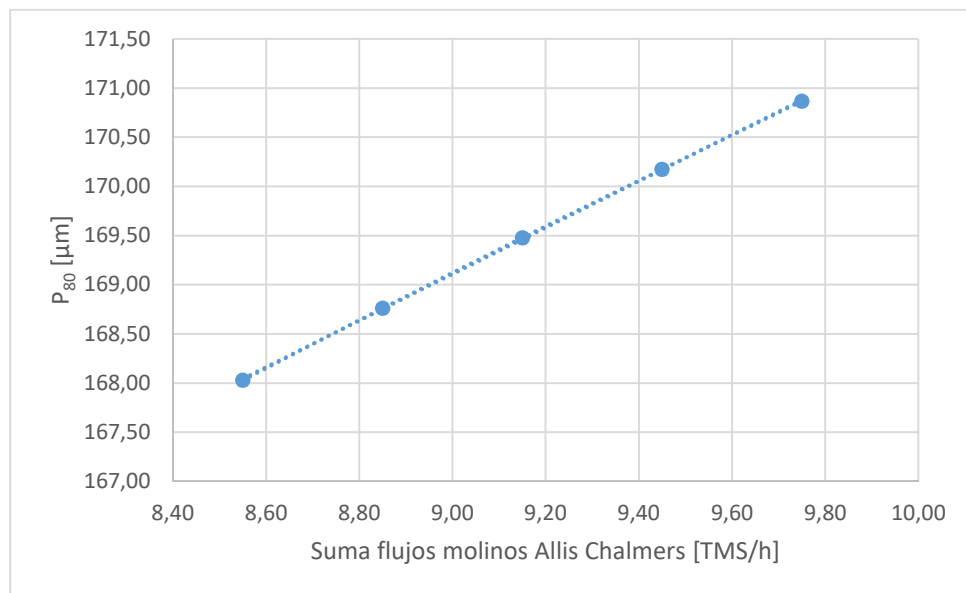


Figura 29. Respuesta del P_{80} del circuito al modificar el flujo de alimentación de los molinos Allis Chalmers.

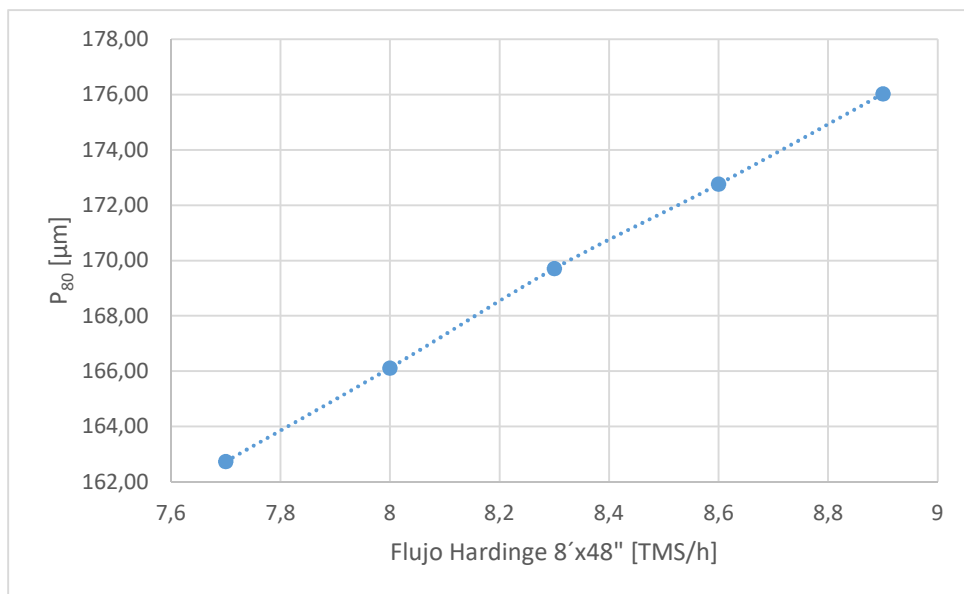


Figura 30. Respuesta del P_{80} del circuito al modificar el flujo de alimentación del molino Hardinge.

Para la Figura 29 se utilizó un flujo constante de 8,3[TMS/h] para el molino Hardinge y en el caso de la Figura 30, un flujo de 9,15[TMS/h] para la suma de los molinos Allis Chalmers. Los gráficos anteriores muestran que la dependencia del producto final es baja con respecto al flujo proveniente de los molinos Allis Chalmers, no así en el caso del molino Hardinge 8'x48". Considerando las relaciones como rectas y comparando sus pendientes, el flujo del molino Hardinge es 4,7 veces más influyente en el P_{80} final, que los molinos Allis Chalmers.

Análisis resultados molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5'.

Durante la estadía de la memoria, mediante observación en terreno, se pudo apreciar que los flujos de estos molinos presentan variabilidad en la cantidad y granulometría. Lo cual implicaría posiblemente que estos, no se encuentran en un estado pseudo estacionario, en numerosas oportunidades se observó obstruida la descarga del hidrociclón expulsando todo el mineral grueso aguas abajo, lo cual explicaría que la frecuencia de embancamiento del acondicionador, que corresponde a 3,5 días.

Para el caso puntual del muestreo el molino Allis Chalmers 5'x6', este presenta un P_{80} de 246,4 [μm] en el rebose del ciclón, considerándose un valor adecuado para el tonelaje tratado de 3,63 [TMS/h], indicando un correcto funcionamiento. Este indicador se contradice con la carga circulante obtenida, que corresponde a 930 %, lo cual muestra una mala operación e indica

problemas debido al alto valor obtenido. Por su parte el molino Allis Chalmers 6'x5' presenta una P_{80} de 491,5 $[\mu\text{m}]$ en el rebose del ciclón, siendo un valor elevado, ya que este debiese ser cercano a los 250 $[\mu\text{m}]$, para el tonelaje tratado de 5,52 [TMH/h]. La carga circulante obtenida corresponde 573 % que indica los mismos problemas que el molino Allis Chalmers 5'x6'. Para ambos molinos la eficiencia de clasificación es extremadamente baja, para las granulometrías inferiores, lo cual provoca y explica las altas cargas circulantes encontradas.

Una de las principales causas de la alta carga circulantes es que, tanto en el muestreo, como en la operación habitual, corresponde a la descarga de los hidrociclones es tipo ROPE, implicando que el espiral de aire ascendente, encargado de enviar el material fino por el rebalse del equipo sea de carácter intermitente, además provocando un exceso de material grueso en la descarga de este produciendo un efecto de arrastre del material fino. Esto puede apreciarse de mejor manera en la Figura 31.

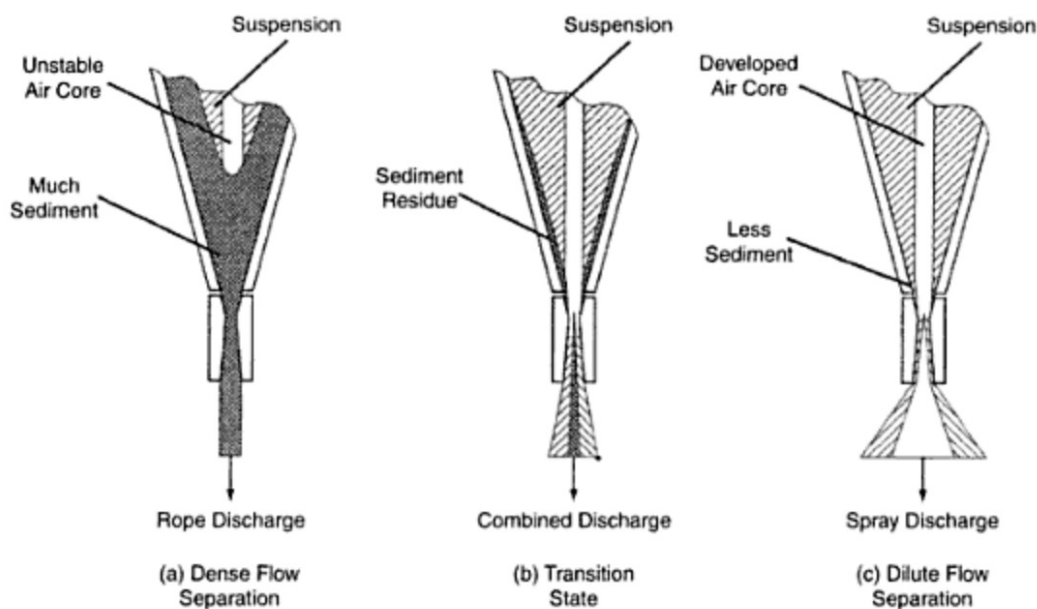


Figura 31. Tipos de descarga hidrociclón (Gupta, 2015)

Esta condición explicaría en gran medida, la gran cantidad de by-pass de finos en las descargas de los hidrociclones asociados a los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5.

La condición ROPE de estos equipos se puede explicar por los siguientes factores:

Diseño

- Dimensiones: El diseño actual tiene como resultado una presión, cercana a los 4 [PSI], de carácter baja que no alcanza los 8-12 [PSI] recomendados en la literatura (Napier, 1999), lo cual perjudica el desempeño del hidrociclón disminuyendo la estabilidad de la espiral ascendente y favoreciendo el roping.
- Relación ápex/vortex: Las relaciones entre el diámetro de la descarga y el rebalse con la literatura estas no se cumplen, teniendo 0,58 y 0,61 para los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5' respectivamente, diferente al rango de mostrado en la Tabla 1, donde se indica un rango menor. Por esto se recomienda disminuir la relación entre las variables.
- Capacidad: En ambos molinos el diámetro de los hidrociclones corresponde a 10 in, entregando una capacidad estimada de 48 m³/hora mediante la Figura 32. Al comparar esto, con la estimación del flujo requerido, considerando una carga circulante de 350% y un 45% de sólido en la entrada del hidrociclón se obtiene que, estos se encuentran sobredimensionados en 240% y 160% para los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5' respectivamente. Este sobredimensionamiento podría explicar la baja presión de entrada observada en los hidrociclones y favorecimiento de la descarga en formato ROPE.

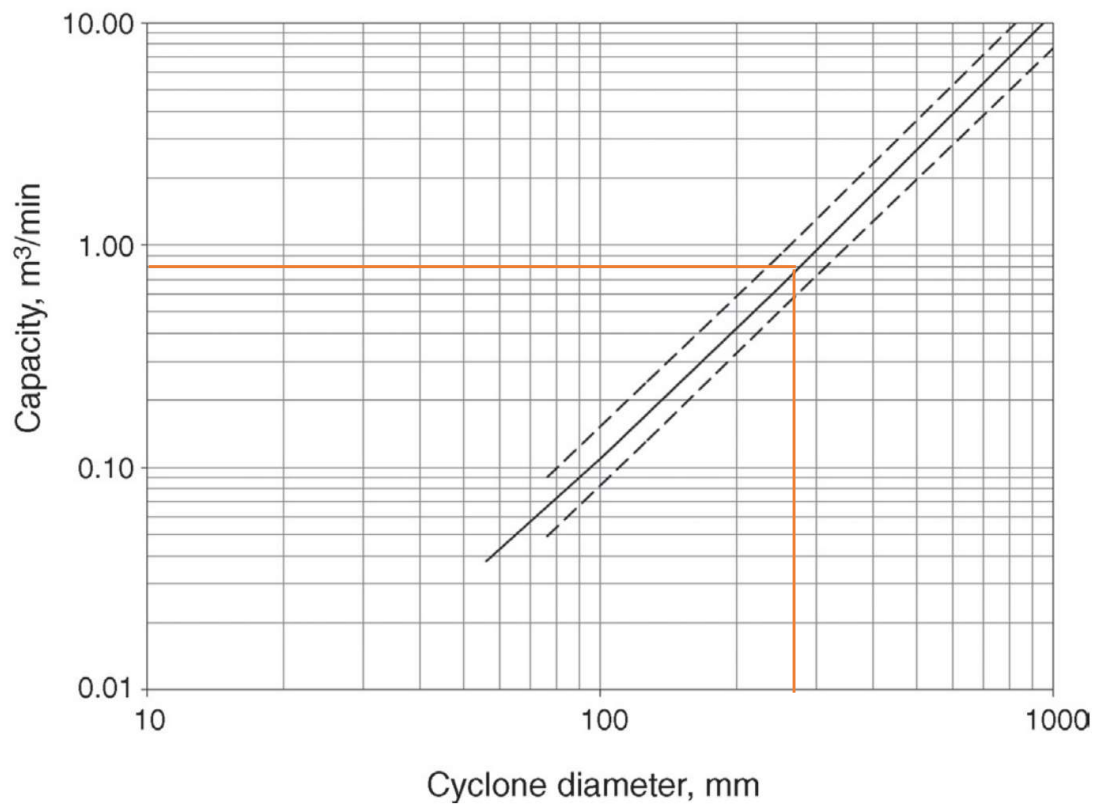


Figura 32. Capacidad hidrociclón en función del diámetro, (Gupta, 2015) (Neesse, 2003)

Operación

- **Conocimientos de los operadores:** Los operadores no presentan las competencias necesarias para operar correctamente los hidrociclones, debido a que anteriormente trabajaban con un sistema de clasificación mecánico diferente al actual y no han sido capacitados adecuadamente para el nuevo escenario. Esto fue mostrado en numerosas ocasiones donde los resultados granulométricos se alejaban del objetivo de producción y los operarios no lograban dar solución a esto, teniendo que recurrir los jefes de planta más experimentados.
- **Instrumentación y control inadecuado:** No existen mediciones del porcentaje de sólido en la entrada de la bomba, previa al hidrociclón y un rango de valores objetivos, implicando que la medición sea por estimación visual del operador. Además, los

hidrociclones no poseen manómetros en buen estado en la entrada de este, para la medición de la presión, ya que generalmente se encuentran averiados. Lo anterior implica que los operadores deben trabajar sin las dos variables principales de control.

- Alimentación al hidrociclón: En los molinos Allis Chalmers 5'x6' y 6'x5 se trabaja con un porcentaje de sólido mayor al 60% en la entrada de los hidrociclones, provocando una viscosidad elevada que dificulta la separación eficiente, teniendo como resultado una descarga tipo ROPE como se aprecia en la Figura

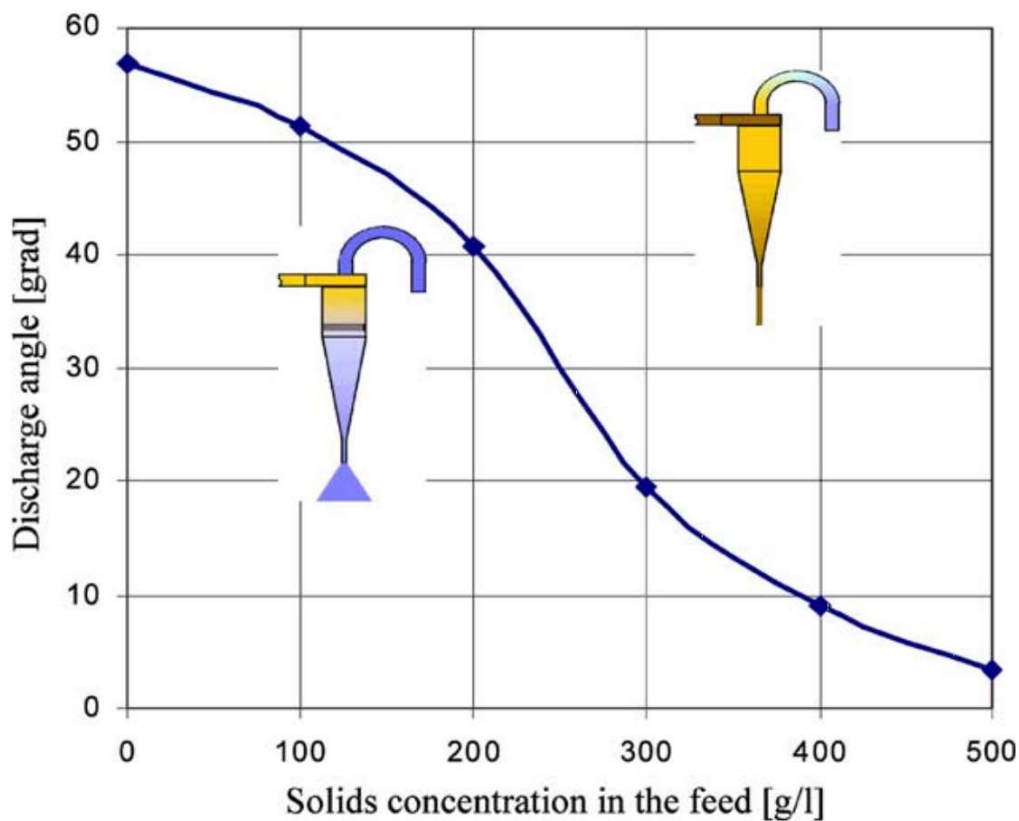


Figura 33. Tipo de descarga en función del porcentaje de sólido, (Neesse, 2003)

En función de lo expuesto anterior, es vital generar un programa de capacitación sobre el funcionamiento y operación de los hidrociclones para el personal de la planta, con el objetivo de mejorar el desempeño del circuito. Además, es necesario implementar instrumentación adecuada que permita un control eficiente del porcentaje de sólidos y la presión a la entrada del hidrociclón.

Considerando que el día muestreado, no presentó ninguno de los tipos de derrames mencionados en 0 y los resultados globales son los tradicionales, la muestra representa fielmente lo ocurrido

en el circuito, ya que estos presentan síntomas de inestabilidad aun cuando no han ocurrido incidentes y se considera un día” normal de producción”. Lo anterior está en directa relación con el balance de masa realizado, en el cual existe un nivel de derrame de 16,8[TMS/día].

Análisis resultados molino Hardinge 8’x48”.

El molino Hardinge 8’x48” presenta un comportamiento similar al observado en los otros molinos estudiados, con la excepción que su flujo no es de carácter intermitente, pero si lo es su granulometría por periodos de tiempo. Este molino presenta la complejidad de encontrarse aguas abajo de los molinos Allis Chalmers 5’x6’ y 6’x5’, por lo que éste se ve fuertemente afectado cuando estos, se alejan del objetivo operacional. A diferencia de los otros, éste presenta un gran indicador visual del mal funcionamiento, que es el embancamiento del acondicionador, el que puede ser provocado por la etapa anterior o por esta etapa.

Para el caso del muestreo se obtuvo un P_{80} en el rebalse del ciclón de 189 [μm], siendo un valor elevado. La causa probable, es que el producto del molino Allis Chalmers 6’x5’ era considerablemente más grueso que el objetivo de producción, donde el producto final de molienda debe tener un P_{80} menor a 170 [μm]. Se obtuvo una carga circulante de 435 % que es superior a la deseada de 250 % (Gupta, 2015), pero considerablemente menor a las obtenidas en los molinos Allis Chalmers 5’x6’ y 6’x5’. La eficiencia de clasificación del ciclón asociado es más adecuada, ya que presenta un bypass de finos del 35 %.

La eficiencia de clasificación no se ve afectada por los factores mencionados en 0, ya que este hidrociclón ha sido operado por al menos 10 años, por lo que el nivel de experiencia es mayor en este caso y no presenta el cambio tecnológico de los otros molinos. Además, las relaciones entre las distintas dimensiones de éste se encuentran en los rangos recomendados (Gupta, 2015). Por último, el manómetro instalado no presenta problemas de averías y permite una correcta lectura de la presión.

Cabe destacar que, aunque no se cumplió con el objetivo operacional de granulometría, la recuperación y ley de concentrado, no se encontraron fuera de los resultados operacionales tradicionales. Entonces, con datos recopilados, si bien no es posible calificar de “estado estacionario”, existe una mayor estabilidad en este molino y es posible realizar simulaciones y analizar nuevos escenarios.

7.2 Selección de variables.

Las variables de los hidrociclones no fueron consideradas para la revisión y posterior generación de propuestas, en parte debido a la mayor complejidad de su análisis y soluciones, de la misma forma por las debilidades de instrumentación y operación que fueron expuestas en 0. que escapan de los alcances de esta memoria. Además, considerando que los molinos no presentan diferencias significativas entre la capacidad actual y la estimada por los modelos de potencia., un aumento de capacidad por mejoras en la eficiencia de clasificación del hidrociclón, no será comparable con un aumento de potencia obtenido en los molinos al modificar alguna de sus variables.

Entonces para seleccionar las variables de los molinos, fue necesario identificar cuales generarían un impacto directo en la capacidad de producción y que además presentan diferencias significativas con los valores tradicionales de la industria y/o literatura.

Las variables principales de los molinos corresponden a:

- Fracción de la velocidad crítica:

La fracción de la velocidad crítica debe ser menor al 80%, según lo descrito en 3.3.2, un rango conservador y acotado es 70% a 75%. Al comparar esto con las condiciones actuales, se presenta una oportunidad de mejora, ya que, en todos los molinos se opera a una fracción de velocidad crítica menor, por lo cual esta variable, es seleccionada para ser analizada.

- Nivel de llenado.

Al comparar el nivel de llenado de los molinos que corresponde a 40 %, con el usado industrialmente, que varía entre 35% a 45% según lo descrito en 3.3.4, este presenta posibilidades de mejora. Si bien, se cumple la condición expuesta, esta no es una variable para manejar con precisión en la planta, debido a la precariedad de la medición, que es de carácter visual y, además, la recarga diaria de bolas es estándar para cada molino, sin importan el nivel de producción ni la mezcla utilizada, lo cual implica una gran incertidumbre en la medición y el control. Por lo anterior la variable no es seleccionada.

- Tamaño de bolas.

Utilizando la planilla “Media Charge_Optimal Ball size” de las Moly-cop Tools se obtiene un tamaño de bolas de 2,5 [in] y 3[in] siendo aproximado a medidas comerciales para los modelos de Allis Chalmers y Azzaroni respectivamente, las ecuaciones utilizadas pueden verse en 3.3.4.

Actualmente se utiliza bolas de 2,5[in] en todos los molinos, siendo la recomendada por el proveedor y calculada por el modelo de Allis Chalmers. Debido a lo anterior, no existe claridad de obtener una mejora de gran impacto en la capacidad de molienda, por lo cual no es seleccionada.

- Diseño del revestimiento.

Habitualmente, los revestimientos de molinos de bolas se fabrican, de fundición blanca alto cromo bajo la norma ASTM A532 cuando hay poco impacto, o de goma. Presentan además levantadores para mejorar el movimiento de la carga, asimismo de proteger el casco. Estos procuran entregar una relación adecuada entre consumo de potencia y la duración del revestimiento. Comparando lo anterior con lo instalado, se observan diferencias claras en los siguientes puntos:

- Todos los molinos son revestidos con acero alto al manganeso.
- El molino Hardinge 8'x48" no presenta levantadores y posee un diseño liso.
- Los revestimientos del molino Allis Chalmers 5'x6' presentan una vida útil de 10 años, fuera de cualquier comparación en la industria.

Queda en evidencia la oportunidad de mejora, por lo cual la variable es seleccionada para el análisis.

- Configuración del circuito:

En la mayoría de los casos en la industria, el producto de un circuito cerrado de molienda es enviado directo a flotación, no como el caso estudiado, donde los productos de los molinos Allis Chalmers caen al cajón de descarga del molino Hardinge 8'x48". Por esta razón, esta variable presenta las condiciones para ser analizada.

7.3 Análisis de variables y propuestas.

Las propuestas generadas implican en su mayoría un aumento en la potencia suministrada por el molino de bolas y en consecuencia por el motor asociado en cada uno de estos, por lo que es vital

conocer si existe potencia disponible en los equipos instalados. En la Tabla 16 puede verse la utilización de cada motor.

Tabla 16. Utilización potencia disponible

Motor molino	Potencia disponible	Potencia utilizada	Utilización
Allis Chalmers 5'x6'	90	32	36%
Allis Chalmers 6'x5'	93	41	44%
Hardinge 8'x48"	149	104	70%

Como puede apreciarse todos los motores se encuentran subutilizados y permitirían realizar modificaciones que impliquen un aumento en la demanda de potencia.

7.3.1. Configuración del circuito.

Se simuló utilizar el molino Hardinge 8'x48" en un circuito cerrado directo, mediante las planillas Moly-Cop Tools con lo obtenido en 0. Los resultados de las iteraciones pueden ser vistos en la Figura 34.

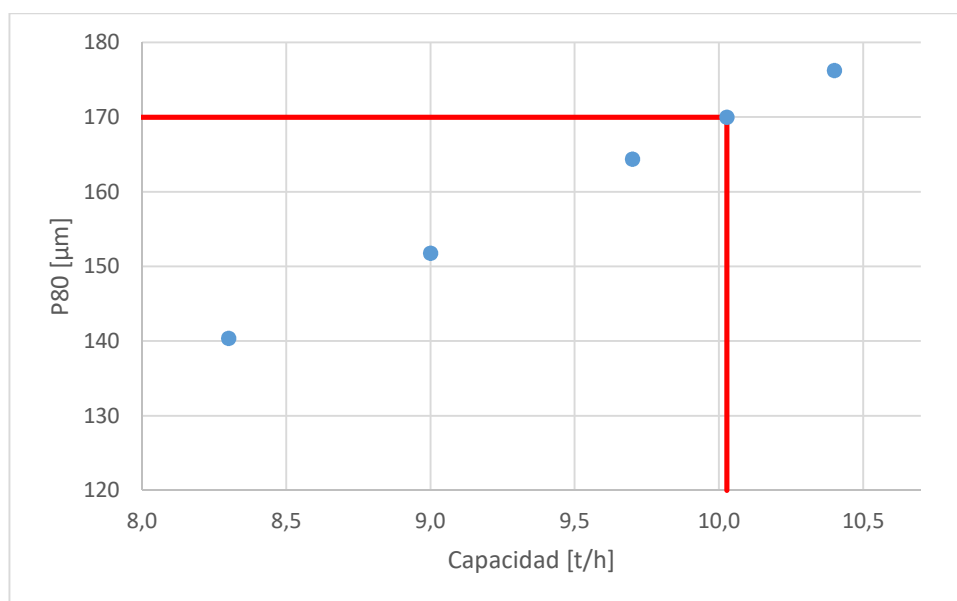


Figura 34. Capacidad del molino Hardinge 8'x48" en circuito cerrado directo simple.

Se obtiene una capacidad máxima de 10,03[TMS/h], para un P₈₀ en el rebalse del ciclón de 170 [μm]. La simulación no presenta diferencias significativas con lo estimado en 0 que corresponde

a 10,07 [TMS/h]. Con el valor obtenido y considerando las estimaciones de 0, se puede determinar una capacidad de planta de 17,26 [TMS/h] con un P_{80} de 170 [μm], que implica un aumento de 0,27[TMS/h] con respecto al flujo real durante 2018.

7.3.2. Análisis revestimientos molinos.

Molino Allis Chalmers 5'x6'

El molino Allis Chalmers 5'x6' procesa actualmente 3,8 [TMS/h], 0,2 [TMS/h] mayores que en el momento del muestreo, utilizando un sistema de revestimiento traslapado en el cilindro, como puede verse en la Figura 4 en antecedentes.

En agosto de 2018 se realizó un cambio completo de revestimientos, provocando una disminución de la capacidad en 0,44[TMS/h]. El anterior tuvo una vida útil de 10 años, disminuyendo en este periodo 1,1 [in] de espesor promedio. Se debe considerar, además, que el espesor de salida no era crítico y este aún tenía vida útil.

Por lo anterior se concluye que el revestimiento actual se encuentra sobredimensionado provocando una disminución de la capacidad de molienda. Adicionalmente el sentido de giro utilizado tiene ángulo de ataque de 90° , implicando que la cara de levante se desgaste aceleradamente y que con el paso del tiempo, el revestimiento termine liso, provocando resbalamiento de la carga y disminución de la capacidad de molienda, esto puede verse en la Figura 35 donde se aprecian las marcas del resbalamiento y el desgaste de la cara del levantador. Lo anterior podría revertirse invirtiendo el giro del molino y usando un ángulo de ataque menor.



Figura 35. Revestimiento anterior del molino Allis Chalmers 5'x6'.

Se propuso modificar el espesor y composición química del revestimiento, para aumentar la capacidad de molienda actual y disminuir su tasa de desgaste. Se debe considerar, que esperar que producto del desgaste, el molino recupere o aumente su capacidad, por el aumento del diámetro interno, es extremadamente a largo plazo lo cual implicaría pérdidas económicas significativas.

Para mejorar el diseño actual, se trabajó conjunto con el proveedor de revestimientos de la compañía y se proporcionaron las siguientes opciones, véase Figura 36 y Figura 37.

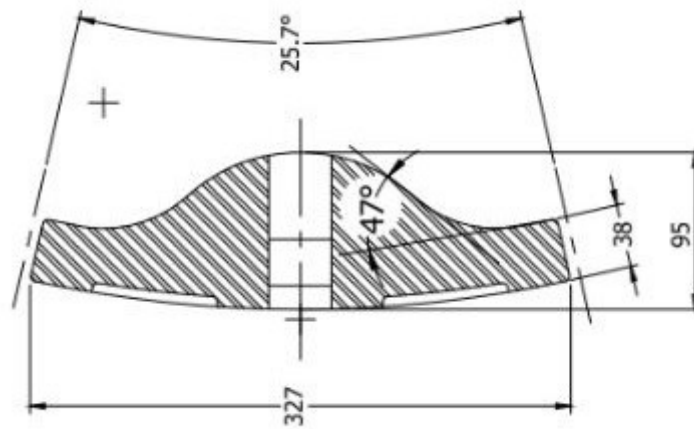


Figura 36. Propuesta 1, molino Allis Chalmers 5'x6'.

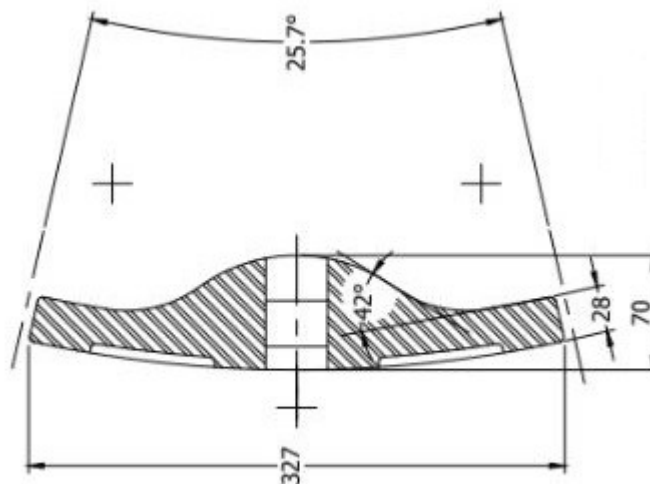


Figura 37. Propuesta 2, molino Allis Chalmers 5'x6'.

Para ambas propuestas fueron estimados los aumentos de capacidad, por el incremento del diámetro interno, utilizando lo descrito en 3.5. Se agregó además el cálculo para el espesor del revestimiento de salida, producto del cambio realizado en agosto del 2018. Debido a que los diseños corresponden mono ondas, estos fueron transformados a un espesor equivalente de una placa lisa. Adicionalmente se incorpora la estimación del aumento, mediante la simulación en Moly-Cop Tools con los resultados obtenidos en 11.3.4. Los resultados pueden verse en la Tabla 17.

Tabla 17. Capacidad en función del espesor molino Allis Chalmers 5'x6'

Revestimiento	Espesor equivalente [in]	Aumento capacidad %	Capacidad estimada [TMS/h]	Aumento capacidad [TMS/h]	Aumento capacidad [TMS/h] (*)
Propuesta 1	1,8	18%	4,48	0,68	0,69
Propuesta 2	2,2	14%	4,32	0,52	0,54
Salida	2,5	10%	4,21	0,41	0,44
Actual	3,6	0%	3,80	0,00	0,00

Se obtiene que el aumento de capacidad al utilizar el espesor de salida al momento del cambio de revestimientos de agosto de 2018 es equivalente a la pérdida de capacidad sufrida en el molino. Además, se muestra, que existe un aumento considerable al utilizar los espesores propuestos y no existen diferencias significativas entre lo estimado y lo obtenido por la simulación en Moly-Cop Tools. De concretarse una de estas propuestas, el aumento de capacidad sería mayor a las 10 [TMS/día]

A partir de los datos históricos recopilados, se estima la vida útil de los nuevos revestimientos. Para esto se considera un espesor crítico de 15[mm] para la sección de menor espesor. Las estimaciones están hechas en función de los datos del molino Allis Chalmers 6'x5' que utiliza un espesor de revestimiento similar a las propuestas, los cálculos se realizan en función de éste, ya que se conoce de mejor manera lo procesado entre un cambio de revestimiento y el otro.

La estimación se realiza utilizando una tasa de desgaste de $0,267[\mu\text{m/t}]$, considerando un factor de planta del 93% y que el tonelaje estimado, es procesado a lo largo de toda la vida útil del revestimiento. Los resultados pueden verse en la Tabla 18.

Tabla 18. Expectativa de vida útil, revestimientos molino Allis Chalmers 5'x6'

Espesor revestimiento [in]	Tiempo vida útil [años]
1,8	2,7
2,2	3,6

Los tiempos estimados son similares a la actual duración de los revestimientos de los demás molinos de la compañía, que son alrededor de 2 a 3 años de vida. Se debe considerar también que se propone cambiar la composición química del revestimiento y usar fundición blanca de alto cromo, que debería aumentar la vida útil. Según (Powell, 2006), podrían llegar a duplicar su vida útil. Los cálculos realizados muestran que es posible la recuperación del tonelaje perdido e incluso incrementar la capacidad de molienda pasada, obteniendo duraciones de revestimiento adecuadas. Se analizará en el siguiente capítulo un análisis económico del cambio de revestimiento para establecer su viabilidad comercial.

Molino Allis Chalmers 6'x5'

El molino presenta un sistema de revestimiento liso con adición de levantador, con un ángulo de ataque bajo, la duración del conjunto es aproximadamente de 2,5[años]. El espesor utilizado en estas placas corresponde a 1,5[in] y es retirado a los 15[mm]. Si bien este molino no presenta graves errores en su diseño como los otros, existe evidencia de que al final del período los levantadores son desgastados completamente, terminando en un molino liso, implicando probablemente una disminución de la capacidad de molienda. Dicha pérdida no está cuantificada debido a que no se lleva un registro del estado del levantador, el flujo procesado y la calidad del producto entregado.

Se recomendó utilizar en los próximos revestimientos la fundición blanca alto cromo para maximizar su vida útil, además de realizar revisiones periódicas de la altura del levantador y relacionarlos con la capacidad de molienda actual, ya que en caso de existir una relación clara

los levantadores puedan ser cambiados en diferentes momentos que las placas lisas del revestimiento.

Molino Hardinge 8'x48"

El molino Hardinge 8'x48" presenta un sistema de revestimiento liso, el diseño de este se muestra en la Figura 8 en resultados. El actual formato no permite un movimiento de carga adecuado, provocando el resbalamiento de esta. La evidencia de este fenómeno puede verse en la Figura 38

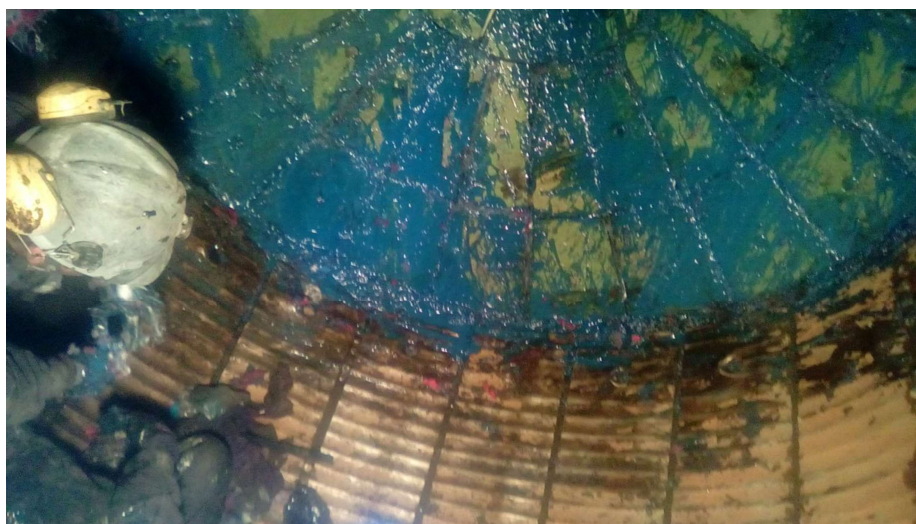


Figura 38. Resbalamiento de la carga molino Hardinge 8'x48"

Los surcos evidencian el resbalamiento de la carga, lo cual tiene los siguientes efectos perjudiciales. Primero una disminución de la vida útil de las corazas, por la mayor interacción entre éstas y las bolas. Segundo y con mayor relevancia económica, existirá un movimiento inadecuado de la carga, lo cual modifica el ángulo dinámico de ésta, implicando que la transmisión de energía sea ineficiente disminuyendo la capacidad de molienda.

Correlacionado lo anterior con lo expuesto en 3.3.1 se puede apreciar que existen diferencias significativas en el consumo de potencia y el movimiento de carga, al existir levantadores en el revestimiento. Utilizando esta información, para el molino Hardinge, que utiliza un 69 % de la fracción de la velocidad crítica, se podría estimar un aumento en el consumo de potencia de 16 %, lo que sería equivalente al aumento de capacidad. Siendo esto posible ya que el motor del molino se encuentra sobredimensionado.

Para mejorar el desempeño del molino, se propuso un diseño mono onda para evitar el resbalamiento actualmente sufrido, este puede verse en la Figura 39, con todas las dimensiones en milímetros.

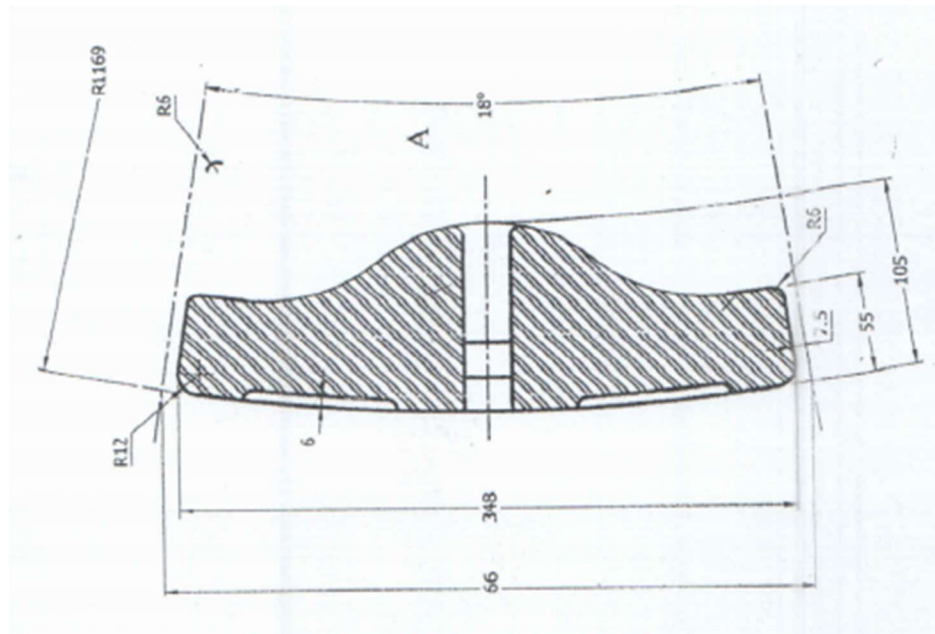


Figura 39. Propuesta revestimiento molino Hardinge 8'x48''

La propuesta al tener variaciones en su espesor fue necesario estimar un diámetro equivalente a una placa lisa, la cual corresponde a de 72 [mm]. Al comparar el espesor del revestimiento actual de 95[mm] de espesor, se deduce que la capacidad se incrementara por un aumento del diámetro interno del molino y por un mejor movimiento de carga, que disminuya el resbalamiento de esta. Se estima con el cambio en el diseño de las corazas que la capacidad de producción aumente en al menos un 5%, que es menor a la tercera parte de lo obtenido en la simulación mostrada, manteniendo una visión conservadora.

Debido a que el revestimiento propuesto, presenta un menor espesor que el actual, se propuso cambiar el material de fabricación actual que corresponde a acero al manganeso, a una fundición blanca alto cromo para contrarrestar el efecto del menor espesor.

Como existirá un aumento de tonelaje al modificar el diseño de revestimiento, se realiza un análisis económico para determinar la viabilidad de la propuesta.

7.3.3. Análisis fracción de la velocidad critica.

La fracción de la velocidad critica define en gran medida el movimiento de carga del molino de bolas, lo que se traduce, en modificar la trayectoria que poseen en la bola en su interior. Las propuestas generadas se basan en incrementar dicha variable, lo que implicara que la altura de despegue de la bola con el revestimiento aumente en el eje ordenado y a su vez que la trayectoria en el eje de las abscisas, teniendo como consecuencia que la energía asociada de la bola y la transmisión de esta, al mineral se incremente. Cabe destacar que un exceso en el aumento de la fracción de la velocidad critica, podría provocar que las bolas golpearan el revestimiento, dañando la infraestructura de este y disminuyendo el consumo de potencia del molino y a su vez la reducción del mineral.

Molino Allis Chalmers 5'x6'

El molino Allis Chalmers 5'x6' presenta una velocidad de giro de 27,3 [RPM] implicando una fracción de la velocidad critica del 74%. Debido a que este molino no presenta variador de frecuencia no es recomendable realizar cambios en la variable estudiada, esto debido a que el impacto en el aumento de capacidad será bajo, ya que esta es elevada y se corre el riesgo de que, al aumentar la velocidad de giro, las bolas impacten al revestimiento, disminuyendo la molienda y la vida útil del revestimiento.

Molino Allis Chalmers 6'x5'

La velocidad de giro definida por la empresa corresponde 23,15[RPM] y una fracción de la velocidad critica del 74%. Al revisar los indicadores se encontraron diferencias significativas en la velocidad de giro del molino y la fracción de la velocidad critica. En las mediciones realizadas se obtuvo una velocidad de giro de 21,64[RPM]. Para el caso de la fracción de la velocidad crítica se consideraba el diámetro externo y no el interno para el cálculo, por lo que implicaría una fuente de error. Utilizando el diámetro interno de 1,75[m] se obtiene una fracción de la velocidad critica del 67,7%

Se recomienda aumentar la velocidad de giro del molino a 24 [rpm], lo que corresponde a 75 % fracción de la velocidad crítica, considerando que el levitador utilizado es de baja altura y ángulo de ataque, esto en busca de aumentar la capacidad de molienda. Además, el motor del molino se encuentra sobredimensionado y permitiría este tipo de aumentos en la potencia, véase 1.1.2.

El cambio de trayectoria fue simulado mediante las Moly Cop Tools y puede verse en las Figura 40 y Figura 41.

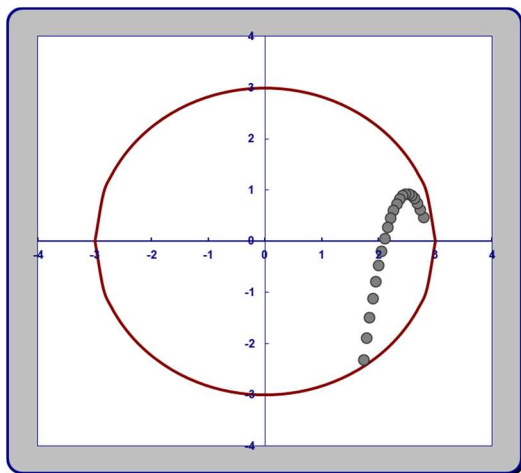


Figura 40. Trayectoria bola, molino 5'x6' al 67,8% de Fvc

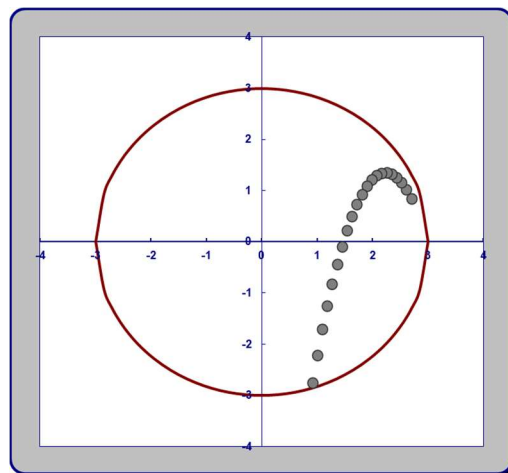


Figura 41. Trayectoria bola, molino 6'x5' al 75% de Fvc

Se observa que al modificar la fracción de la velocidad crítica, provocaría un mayor desplazamiento de las bolas en el eje de las abscisas y ordenas implicando un aumento en el consumo de potencia, además este cambio en la trayectoria no pone en riesgo la integridad del revestimiento del molino ya que las bolas continuaran golpeando la carga.

Para la estimación del aumento de capacidad se utilizaron los modelos de potencia de Bond y Hogg. Los resultados pueden verse en la Tabla 19.

Tabla 19. Estimación aumento velocidad molino Allis Chalmers 6'x5'.

	Aumento capacidad %	Aumento capacidad [TMS/h]
Modelo de Bond	9	0,50
Modelo de Hogg & Fuerstenau	11	0,61

Para el cálculo, se supone que todos los demás parámetros del modelo de potencia permanecerán constantes y considerando un flujo actual de 5,52 [t/h]. Los cálculos muestran que es posible un aumento de molienda significativo modificando la velocidad de giro del molino, manteniéndose en los parámetros tradicionales de la industria (Napier, 1999).

Debido a que el molino no presenta variador de frecuencia en el motor, el cambio de velocidad debe hacerse cambiando la dimensión en el sistema de poleas de este mismo. Actualmente se tiene una polea de 300[mm] la cual debe ser reducida hasta 270[mm] para alcanzar la velocidad deseada. Para este cambio se realiza un análisis económico en el siguiente capítulo que considera la adquisición de la polea y el tiempo de detención del molino.

Molino Hardinge 8'x48".

El molino Hardinge 8'x48" presenta una velocidad de 20,48 [RPM] que corresponde a 71,7% de la fracción de la velocidad crítica. Posee un variador de frecuencia el cual permite realizar cambios en la velocidad de giro sin dificultad. Además, el motor asociado se encuentra sobredimensionado permitiendo cambios en éste. Se propone aumentar la fracción de la velocidad crítica a 75 %, lo que implicaría pasar a una velocidad de giro de 21,42[RPM]. Para esto se debe aumentar la velocidad de transmisión desde 738[RPM] a 772[RPM]. Este cambio en la fracción de la velocidad crítica, modificará el movimiento de carga y así la trayectoria de la bola, esto puede verse en la Figura 42 y Figura 43

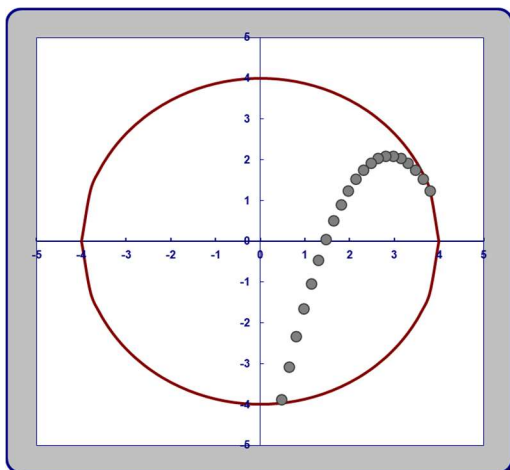


Figura 43. Trayectoria bola, molino 8'x48" al 71,7% de Fvc

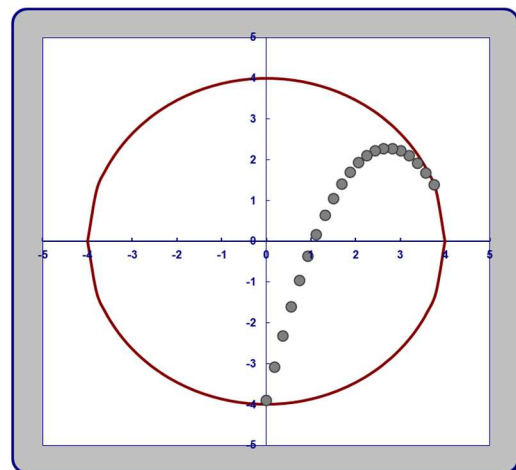


Figura 42. Trayectoria bola, molino 8'x48" al 75% de Fvc

Se observa que al modificar la fracción de la velocidad crítica, provocaría un mayor desplazamiento de las bolas en el eje de las abscisas y ordenas implicando un aumento en el consumo de potencia, además este cambio en la trayectoria no pone en riesgo la integridad del revestimiento del molino, ya que las bolas continuaran golpeando la carga.

El aumento de capacidad se muestra la simulación del efecto de aumentar la fracción de la velocidad crítica al 75%, véase la Figura 44.

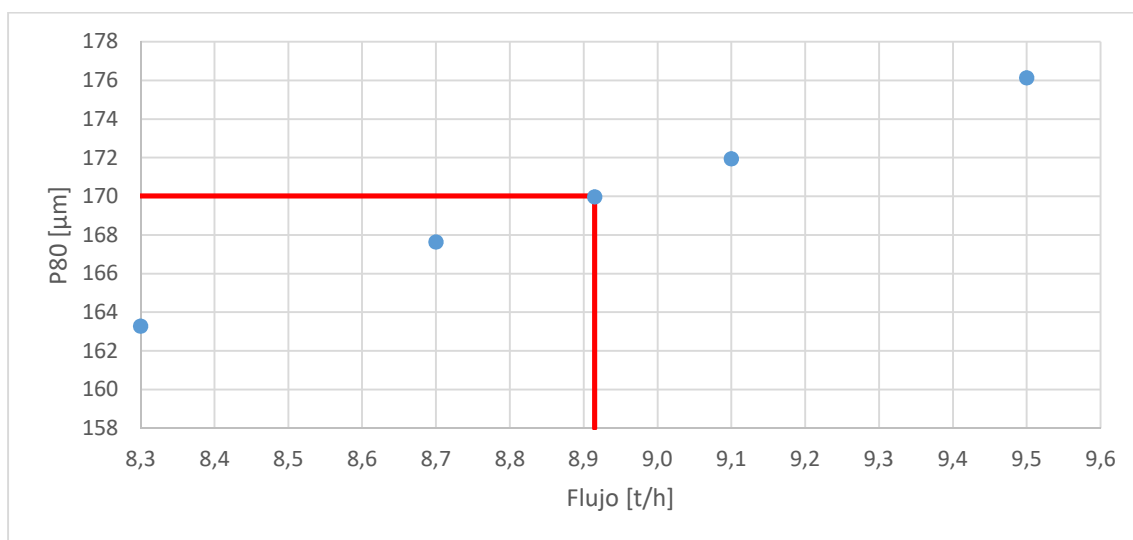


Figura 44. Simulación capacidad hardinge 8'x48" al 75% fracción de la velocidad crítica.

Se obtiene una capacidad máxima de 8,92 [TMS/h] considerando un P_{80} de 170 [μm], lo que implica un aumento de 0,62[TMS/h] con respecto a la condición actual.

Dejando constante las 8,3 [TMS/h] de la alimentación fresca del molino Hardinge 8'x48" y simulando la variación de los flujos de los molinos Allis Chalmers 5'x6'y 6'x5, se obtiene que el sistema acepta un máximo de 3[TMS/h] adicionales de partes de estos sin sobrepasar la condición límite del P_{80} . Esto se observa en el anexo 11.3.7.

7.4 Análisis económico.

Se analizaron económicamente las propuestas de cambio de revestimientos a los molinos Allis Chalmers 5'x6' y Hardinge 8'x48" y el cambio de la fracción de la velocidad crítica del molino Allis Chalmers 6'x5'. Para esto se tomaron los siguientes supuestos:

- Valor cobre: 2,7 [USD/lb]
- Valor plata: 15,32 [USD/oz]
- Ley de cabeza: 1,5%
- Ley de plata: 100 [g/t concentrado]
- Recuperación: 83,17%
- Humedad mineral: 1,98
- Ley de concentrado: 19,83%

Durante la evaluación se utilizaron los conceptos cobre pagable, plata pagable y deducción metalúrgica. La explicación y forma de cálculo de éstos puede ser vista en el anexo 11.4.

7.4.1. Propuesta por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'

Para el análisis se selecciona la propuesta N°1 del proveedor, debido a que presenta el menor incremento de la producción y así, es posible tener una visión conservadora del cambio. Dicho incremento corresponde a 0,41[TMS/h]

Ingresos por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'

Para los ingresos se considera un aumento en la producción de 269,1 [TMS/mes], al tener una disponibilidad de planta del 93 %. En la Tabla 20, puede verse el incremento de la producción pagable de cobre y plata por ENAMI.

Tabla 20. Incremento de cobre y plata pagable por el cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.

Cobre pagable [lb]	8.913,2
Plata pagable [oz]	60,6

Considerando los supuestos expuestos anteriormente y la Tabla 20, se obtienen los nuevos ingresos, véase la Tabla 21.

Tabla 21. Incrementos de ingresos por el cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.

Cobre pagable [USD]	23.174
Plata pagable [USD]	928,2
Total [USD]	24.102,6

Costos por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'

Debido a que el concentrado es procesado por ENAMI, deben considerarse los costos de la deducción metalúrgica o maquila de éste, véase la Tabla 22.

Tabla 22. Deducción metalúrgica por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.

Fusión de concentrado [USD]	2.394,0
Refinación cobre [USD]	993,8
Refinación plata [USD]	22,1
Total [USD]	3.409,9

Para los costos de adquisición, instalación y pérdida de producción producto del cambio, se reparten equitativamente en 24 meses, y se considera la vida útil mínima del nuevo revestimiento. El detalle global de los costos de traduce en los siguientes:

- El costo de bonificación de personal para la instalación se estima en 1343 [USD].
- Producto de la detención por el cambio se estima una pérdida de 51 [TMH] por evento, que es equivalente a 1.657 [USD] por evento.
- El costo de adquisición del nuevo revestimiento corresponde a 22.268 [USD].

El detalle puede verse en la Tabla 23.

Tabla 23. Costo mensual por adquisición e instalación y detención de producción por cambio revestimiento s molino Allis Chalmers 5'x6'.

Adquisición Revestimientos [USD]	927,8
Bonificación personal [USD]	56,0
Perdida producción [USD]	69,0
Total [USD]	1052,8

El costo de planta no es considerado, ya que gran parte de los gastos están cubiertos por la producción actual y de ser estimados, estos no serían de magnitudes comparables. Por su parte el costo de producción de minas corresponde 25 [USD/TMS], véase la Tabla 24 para el costo total de mina.

Tabla 24. Costo de minas mensual por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'.

Costo mina [USD]	8532,1
------------------	--------

Balance por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'

EL balance económico resumido puede verse en la siguiente tabla.

Tabla 25. Resume balance económico por cambio del revestimiento al molino Allis Chalmers 5'x6'

Ingresos adicionales [USD]	24.102,6
Costo deducción metalúrgica	3409,9
Costo adquisición, instalación y detención de producción [USD]	990,9
Costo mina [USD]	8.532,1
Utilidad [USD]	11.169,7

Se obtienen utilidades mensuales de 11.169,7 [USD], considerando la estimación más baja para el aumento de producción. Además, se obtiene un Payback de 2 meses considerando una inversión total de 23.781 [USD]. Con el balance presentado se concluye, que la propuesta es rentable y presenta una rápida recuperación de la inversión.

7.4.2. Propuesta por cambio del revestimiento al molino Hardinge 8'x48"

Para la propuesta se utiliza el aumento en la producción estimado en 0, que corresponde a 0,415[TMS/h], equivalente a un incremento del 5 %.

Ingreso por cambio del revestimiento al molino Hardinge 8'x48"

Para los ingresos se considera un aumento en la producción de 277,9 [TMS/mes], al tener una disponibilidad de planta del 93 %. En la Tabla 26, puede verse el incremento de la producción pagable de cobre y plata por ENAMI.

Tabla 26. Incremento mensual de producción por cambio de revestimiento s molino Hardinge 8'x48''.

Cobre pagable* [lb]	7113,4
Plata pagable* [oz]	48,4

Considerando los supuestos expuestos anteriormente y la Tabla 26, se obtienen los nuevos ingresos, véase la Tabla 27.

Tabla 27. Incrementos de ingresos por cambio de revestimiento s molino Hardinge 8'x48''.

Cobre pagable [USD]	19206
Plata pagable [USD]	740,8
Total [USD]	19947,1

Costos por cambio del revestimiento al molino Hardinge 8'x48''

Los costos de la deducción metalúrgica o maquila se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Deducción metalúrgica por cambio de revestimiento s molino Hardinge 8'x48''.

Fusión de concentrado [USD]	1910,6
Refinación cobre [USD]	793,1
Refinación plata [USD]	17,6
Total [USD]	2721,4

Para los costos de instalación y pérdida de producción, producto del cambio, se reparten equitativamente en 12 meses, y se considera la vida útil mínima de los nuevos revestimientos. El detalle global de los costos de traduce en lo siguiente:

- El costo de bonificación de personal para la instalación se estima en 1343 [USD].
- Producto de la detención por el cambio se estima una pérdida de 160 [TMH] por evento, que es equivalente a 5.197,6 [USD] por evento.
- El costo de adquisición del revestimiento no es considerado, ya que el cambio se realizará en el término de vida útil de las actuales. Los nuevos revestimientos presentan, un valor menor a las actuales ya que estas son 22% de menor en masa, si bien la aleación seleccionada posee

un costo mayor que la actual, este no logra compensar la disminución del precio por el menor peso.

Debido a que no se considerara el costo de adquisición y solo los costos de bonificación de personal y detención del molino, se debe considerar exclusivamente el costo incremental, producto de una mayor tasa de cambio debido a la menor vida útil estimada. La duración para estos revestimientos actuales es de 24 meses y el nuevo un mínimo de 12 meses. El detalle se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29. Costo mensual por adquisición e instalación y detención de producción por cambio revestimiento s molino Hardinge 8'x48''.

	Actual	Propuesta
Bonificación personal [USD]	56,0	111,9
Perdida producción [USD]	216,6	433,1
Total [USD]	272,5	545,1
Diferencia total [USD]	272,5	

El costo de planta no es considerado, ya que gran parte de los gastos están cubiertos por la producción actual y de ser estimados, estos no serían de magnitudes comparables. Por su parte el costo de planta corresponde 25 [USD/TMS], véase la para el costo total de mina.

Tabla 30. Costo de minas mensual por cambio de revestimiento al molino Hardinge 8'x48''.

Costo mina [USD]	6809,3
------------------	--------

Balance por cambio del revestimiento al molino Hardinge 8'x48''

El balance económico resumido puede verse en la Tabla 31.

Tabla 31. Resume balance económico cambio revestimiento al molino Hardinge 8'x48''

Ingresos adicionales [USD]	19.947,06
Costo deducción metalúrgica	2.721,40
Costo incremental instalación y detención de producción [USD]	272,53
Costo mina [USD]	6.809,26

Utilidad [USD]	10.143,87
----------------	-----------

Se obtienen utilidades mensuales de 10.143,87 [USD], considerando que el aumento de producción considerado fue conservador para el cálculo. El Payback no es relevante, ya que la inversión es nula, debido a que la adquisición de los revestimientos es obligatoria y este no genera un gasto adicional al ser de menor valor. Con balance presentado se concluye que la propuesta es altamente rentable.

7.4.3. Propuesta cambio RPM molino Allis Chalmers 6'x5'.

En la propuesta se consideró un aumento de producción del 50% estimado en 0 por el modelo de potencia de Bond, este corresponde a 0,25 [TMH/h], así es posible tener una visión conservadora del cambio, además de poder ser absorbida por el molino Hardinge 8'48" aguas abajo sin afectar el P₈₀ final, esto puede verse en 0.

Ingresos por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'

Para los ingresos se considera un aumento en la producción de 167,4 [TMS/mes], al tener una disponibilidad de planta del 93 %. En la Tabla 32, puede verse el incremento de la producción pagable de cobre y plata por ENAMI.

Tabla 32. Incremento mensual de producción por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Cobre pagable* [lb]	4.285,2
Plata pagable* [oz]	29,1

Considerando los supuestos expuestos anteriormente y la Tabla 32, se obtienen los nuevos ingresos, véase la Tabla 33.

Tabla 33. Incrementos de ingresos por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Cobre pagable [USD]	11.570
Plata pagable [USD]	446,3
Total [USD]	12.016,3

Costos por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'

Los costos de la deducción metalúrgica o maquila, puede verse en la Tabla 34.

Tabla 34. Deducción metalúrgica por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Fusión de concentrado [USD]	1.151,0
Refinación cobre [USD]	477,8
Refinación plata [USD]	10,6
Total [USD]	1.639,4

La propuesta requiere una inversión de 1.119 [USD], que corresponde a la adquisición de la polea para realizar el cambio de RPM. Para este cambio no se consideran los costos de instalación, debido a que este es realizado por la unidad de mantención de la compañía, el cual no es un costo adicional relevante. Producto de esto, se realizará una parada de 4 horas del molino, se producirá una pérdida de producción de 20 [TMH], esta es equivalente a 649,7 [USD].

El costo de planta no es considerado, ya que casi la totalidad de los gastos están cubiertos por la producción actual y de ser estimados, estos no serían de magnitudes comparables. Por su parte el costo de planta corresponde 25 [USD/TMS], véase la Tabla 35 para el costo total de mina.

Tabla 35. Costo de minas mensual por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Costo mina [USD]	4.102
------------------	-------

Balance por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'

Debido a la baja inversión realizada, el costo de adquisición y pérdida de producción son reflejados en solo un mes de producción. El balance económico resumido puede verse en la Tabla 36.

Tabla 36. Resume balance económico por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Ingresos adicionales [USD]	12016,3
Costo deducción metalúrgica	1639,4
Costo adquisición y detención de producción [USD]	1769,1

Costo mina [USD]	4102,0
Utilidad [USD]	4505,8

Se obtienen utilidades de 4.505,8 [USD] para el primer mes de producción. Además, se obtiene un Payback de 0,3 meses.

Debido a que la polea sufrirá nulo desgaste en función del tiempo, la inversión y los costos asociados serán solo en una ocasión. No considerando estos costos y siendo válido desde el segundo mes de producción ya con la propuesta instalada, se obtendrán utilidades mensuales de 6673,5 [USD].

Considerando que el aumento de producción estimado fue castigado en 50% con respecto a lo calculado, es recomendable y viable la propuesta.

7.4.4. Propuesta cambio RPM molino Hardinge 8'x48" ´.

En la propuesta se consideró un aumento de producción del 50% estimado en 0 por simulación en las Moly-Cop Tools, este corresponde a 0,31 [TMS/h], así es posible tener una visión conservadora del cambio.

Ingresos por cambio de RPM al molino Hardinge 8'x48"

Para los ingresos se considera un aumento en la producción de 167,4 [TMS/mes], al tener una disponibilidad de planta del 93 %. En la Tabla 32, puede verse el incremento de la producción pagable de cobre y plata por ENAMI.

Tabla 37. Incremento mensual de producción por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'´.

Cobre pagable* [lb]	5.313,65
Plata pagable* [oz]	36,12

Considerando los supuestos expuestos anteriormente y la Tabla 32, se obtienen los nuevos ingresos, véase la Tabla 33.

Tabla 38. Incrementos de ingresos por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'´.

Cobre pagable [USD]	14.346,85
Plata pagable [USD]	553,37

Total [USD]	14.900,21
-------------	-----------

Costos por cambio de RPM al molino Hardinge 8'x48"

Los costos de la deducción metalúrgica o maquila, puede verse en la Tabla 34.

Tabla 39. Deducción metalúrgica por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Fusión de concentrado [USD]	1.427,20
Refinación cobre [USD]	592,47
Refinación plata [USD]	13,18
Total [USD]	2.032,85

La propuesta requiere no inversión, debido a que el cambio de velocidad es efectuado desde el variador de frecuencia.

El costo de planta no es considerado, ya que casi la totalidad de los gastos están cubiertos por la producción actual y de ser estimados, estos no serían de magnitudes comparables. Por su parte el costo de planta corresponde 25 [USD/TMS], véase la Tabla 35 para el costo total de mina.

Tabla 40. Costo de minas mensual por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Costo mina [USD]	5.806,43
------------------	----------

Balance por cambio de RPM al molino Hardinge 8'x48".

Debido a la baja inversión realizada, el costo de adquisición y pérdida de producción son reflejados en solo un mes de producción. El balance económico resumido puede verse en la Tabla 36.

Tabla 41. Resume balance económico por cambio de RPM al molino Allis Chalmers 6'x5'.

Ingresos adicionales [USD]	14.900.21
Costo deducción metalúrgica	2.032.85
Costo mina [USD]	5.086.43
Utilidad [USD]	7.780.93

Se obtienen utilidades de 7.780,93 [USD] para el primer mes de producción. Considerando que el aumento de producción estimado fue castigado en 50% con respecto a lo calculado, es recomendable y viable la propuesta.

8 Resultados de propuestas.

8.1 Cambio de revestimiento molino Hardinge 8'x48''.

Los revestimientos del molino Hardinge 8'x48'' fueron cambiados por los propuestos en 0 en abril de 2019, los resultados fueron positivos y mayores a los esperados, implicando aumento de lo procesado y la eliminación de los embancamientos del acondicionador, incrementando la estabilidad de la planta.

Se debe considerar, además, que existió un cambio en lo procesado por el molino Allis Chalmers 5'x6' desde 3,63 [TMS] a 3,82 [TMS]. Este incremento es indirectamente posible por el aumento de capacidad del molino Hardinge 8'x48'', ya que el producto del molino Allis Chalmers 5'x6' cae en el cajón de descarga de este.

El aumento de producción queda demostrado en el mes de despacho a ENAMI del mes de Mayo de 2019, que considera la producción entre el 25 de Abril y el 27 de Mayo incluyéndose ambas fechas, que se detalla a continuación.

8.1.1. Comparación de la producción registrada por planta y la despachada.

Los datos reportados por la planta y el cobre fino despachado se pueden observar en el anexo 11.2. El balance entre la producción real despachada y la teórica se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42. Balance producción con propuesta concretada.

Fino recuperado [TMS]	169,17
Cobre fino despachado	163,42
Diferencia producción real / teórico [TMS]	7,75

Se puede concluir que existen diferencias significativas entre la producción despachada y la registrada, esta corresponde a -5,75 [TMS] de cobre fino, equivalentes a 465 [TMS] de mineral fresco.

8.1.2. Análisis de las diferencias reportadas por planta y fino despachado.

Para analizar las diferencias encontradas, se realiza un balance sobre el mineral derramado, esto puede ser visto en la Tabla 43.

Tabla 43. Balance mineral derramado con propuesta.

Stock inicial derrame [TMH]	200
Stock final derrame [TMH]	200
Derrame reprocesado [TMH]	335
Humedad derrame %	1,7
Derrame producido [TMS]	329
Derrame producido equivalente a mineral [TMS] (*)	392

(*) Se consideró una humedad de 1,98%, además los derrames producidos, poseen una ley mayor en 19 % a la ley de cabeza, debido a que esta mezclada con la cola de la etapa cleaner como puede verse en la Figura 2 por lo anterior se debe transformar a un mineral equivalente con la ley de planta de 1,19%.

Utilizando la información de la Tabla 43 y lo calculado anteriormente se obtiene el porcentaje de error atribuible a cada problemática. Esto puede verse en la Tabla 44.

Tabla 44. Designación de pérdidas con propuesta.

Perdidas por derrame %	84,2
Error de estimación %	15,8

El mayor porcentaje de discrepancias entre lo reportado por planta y lo despachado a ENAMI corresponde por los derrames generados siendo equivalentes 11,9[TMS/día], por su parte el error de estimación corresponde a 2,22 [TMS/día].

La situación provoca un flujo real de 411,6[TMS] en el punto de control, con la excepción, que solo 399,7[TMS] son de mineral fresco, esto puede ser visualizado en la Figura 45.

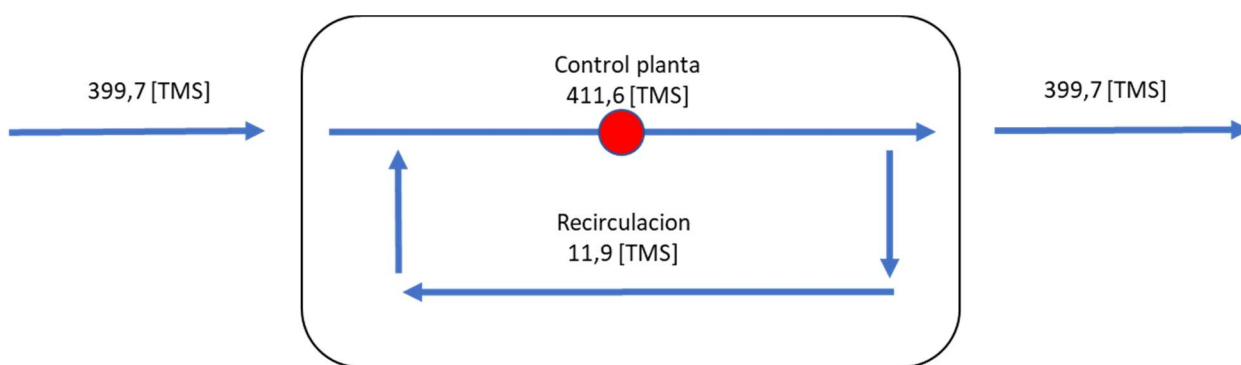


Figura 45. Recirculación por derrames con propuesta.

8.2 Resultado propuestas concretadas.

Considerando los resultados en 0 y 8.1.2 se logró un aumento de 20,5 [TMS/día] a nivel de circuito en la planta, además se logró disminuir en 4,9 [TMS/día] la recirculación provocada por el mineral derramado. El aumento logrado, puede atribuirse por el molino Allis Chalmers 5'x6' en 4,2 [TMS/día] y 16,3 [TMS/día] el efecto logrado por el cambio de revestimiento del molino Hardinge 8'x48". Entonces el impacto económico generado se estima en 22.780 [USD] de utilidades mensuales. El resumen de esto puede verse en la Tabla 45.

Tabla 45. Resumen resultados propuestas concretadas

	Antes	Después
Producción [TMS/día]	379,2	399,7
Embancamientos [Nº/día]	3,5	0
Utilidades adicionales [USD/mes]	-	22.780

9 Conclusiones

Se valida la hipótesis abordada, ya que es posible aumentar el tonelaje tratado por el circuito de molienda y clasificación, sin afectar la calidad del producto enviado a flotación, gracias a las modificaciones sugeridas en los molinos actuales, evitando el costo de adquirir nuevos equipos en la actualidad.

Se determinó la situación actual del circuito de molienda y clasificación mediante un balance másico a partir del cobre fino despachado y los resultados de flotación, lo cual corresponde a 379,2 [TMS/día] para el año 2018. Se encontró un déficit del 5,7% en el cobre fino producido, con respecto al calculado teóricamente según los registros diarios. Esta diferencia fue consecuencia del mineral derramado constantemente dentro del proceso y por una errada estimación de lo ingresado a la planta. El porcentaje atribuible a cada problemática corresponde a 77,8% y 22,2% respectivamente. A consecuencia del mineral que es derramado y luego reingresado al sistema, se provoca un error de medición de 16,8[TMS/h] en el punto de control, la cual puede ser considerada como una carga circulante global del circuito.

Para evaluar el desempeño de los molinos de bolas e hidrociclones se comparó la capacidad teórica de molienda considerando los tres molinos en circuito cerrado directo con el objetivo de producción y el flujo promedio estimado del 2018. Se observó que no existen diferencias significativas entre la capacidad teórica y el flujo objetivo de producción, no obstante, esto no ocurre para el flujo estimado del 2018, siendo menor este último. Indicando la existencia de problemas dentro de la planta, siendo estos de carácter operacional, debido a que hay días que no existen derrames de mineral.

La capacidad teórica y el flujo objetivo no presentaron diferencias significativas lo que implica que el objetivo de producción es alcanzable, pero la planta se exige a su máxima capacidad, lo que podría provocar la inestabilidad en ella. El flujo real de 2018 es menor a los otros dos, producto a los derrames dentro de la planta. Debido a que existen días que no ocurren derrames, lo que muestra que no existiría falta de capacidad, pero si una de control, por ende, problemas operacionales. Con el objetivo actual de tratamiento, se consiguió una menor producción real con respecto a las posibilidades teóricas, lo cual indica que es probable, que al disminuir el objetivo de producción y no utilizar la capacidad máxima, se podría aumentar la producción real debido a la disminución de las pérdidas generadas por los derrames.

Se comparo individualmente la capacidad teórica de los molinos con el flujo objetivo de éstos, se obtuvo que el molino Allis Chalmers 5'x 6' y el molino Allis Chalmers 6'x5' estaban dentro del rango posible. En el caso del molino Hardinge 8'x48" no es posible realizar la comparación anterior, debido a la dependencia de los molinos Allis Chalmers.

Se realizó un muestreo al circuito de molienda y clasificación, para determinar las granulometrías en cada flujo. Con esto fue posible obtener las curvas de eficiencia de clasificación, donde se encontró problemas en los hidrociclones asociados a los molinos Allis Chalmers 5'x 6' y 6'x 5'. Estos presentaron una alta carga circulante superior al 500% producto de una baja eficiencia de clasificación y un corto circuito de finos superior al 50%. Lo anterior ocurre debido al bajo conocimiento operacional e inexperiencia con estos equipos por parte del personal, sumado a la inexistencia en la medición de presión y el porcentaje de solido en la entrada del hidrociclón. Además, los hidrociclones no tienen las relaciones entre el ápex y el vortex descrita inicialmente en el marco teórico y la capacidad de estos se encontraba sobredimensionada para el flujo tratado, esto implicaba trabajar en un estado de ROPE contante, afectando la eficiencia de los equipos.

En el caso del hidrociclón asociado al molino Hardinge 8'x48", no presenta las problemáticas mencionadas anteriormente. Este presenta una carga circulante del 435% y un corto circuito de finos del 35%, siendo este último un valor común para la industria. A diferencia de otros hidrociclones, este ha permanecido en la planta por más de 10 años, teniendo como consecuencia que el personal sea experimentado en este. Además, se cumplen las relaciones entre ápex y vortex, existe un manómetro en buenas condiciones y la presión del sistema es adecuada.

Se seleccionaron las variables de diseño del revestimiento, fracción de la velocidad crítica y la configuración del circuito del molino Hardinge 8'x48" para ser analizadas y así generar las propuestas que permitieran un aumento de producción, debido a que estas presentan las mayores discrepancias con los valores típicos en la industria.

Al evaluar el diseño del revestimiento del molino Allis Chalmers 5'x 6', se encontró que el espesor estaba sobredimensionado, lo que implica una pérdida de capacidad a cambio de una vida útil exagerada, lo que provoca pérdidas económicas al ser comparado con un espesor menor. Por esto se propuso modificar el espesor y el diseño del revestimiento, lo que implicaría un aumento de producción de 0,41[TMS/h]. Otro de los diseños evaluados corresponde al del molino Hardinge 8'x48", el cual tenía un revestimiento liso que provocaba el resbalamiento de la carga, implicando una disminución en la capacidad de molienda y en la vida útil de este. Se propuso

cambiar el diseño del revestimiento a uno mono onda, lo que aumentaría la capacidad de producción en 0,415[TMS/h].

En cuanto a la fracción de la velocidad crítica se propuso modificar en los molinos Allis Chalmers 6'x 5' y Hardinge 8'x48" desde 67,8% y 71% respectivamente, hasta el 75% para ambos. Lo que implicaría un aumento de la producción de 0,25 en el caso del primero y 0,62 para el segundo. Para el caso del Molino Hardinge no requiere de inversión debido a que tiene un variador de frecuencia, no como en el caso del molino Allis Chalmers.

Finalmente, para la propuesta del cambio de configuración del molino Hardinge 8'x48" a circuito cerrado directo, se obtuvo que no existen diferencias significativas con la nueva capacidad, la estimación inicial y el flujo objetivo de producción, por lo tanto, no hay cambios relevantes en la producción al modificar el circuito. Esto se realizó mediante las Moly-Cop Tools.

Mediante evaluación económica de las propuestas generadas, se obtuvieron los siguientes beneficios:

- Cambio del revestimiento del molino Hardinge 8'x48", 10.143,9[USD/mes].
- Cambio del revestimiento del molino Allis Chalmers 5'x 6', 11.169,7[USD/mes] con un Payback de 2 meses.
- Cambio de la fracción de la velocidad crítica del molino Allis Chalmers 6'x 5', 6.673,5[USD/mes] con un Payback de 0,3 meses.

De las propuestas presentadas solo el cambio de revestimiento del molino Hardinge 8'48" fue concretada, iniciando en Abril de 2019, obteniendo un aumento de la producción de 0,68[TMS/h], lo que se tradujo en ingresos adicionales de 22.780[USD/mes].

10 Referencias

- Austin, L. &. (1994). *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*. Concepción, Chile: Cyted.
- Austin, L., & Hilton, W. &. (1992). Mill power for conical (Hardinge) type ball mills. *Minerals Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 183-192.
- Azzaronis, E. (1980). 3rd ARMCO- Chile Symposium.
- Bian, X. W. (2017). Effect of lifter and mill speed on particle behaviour, toque, and power consumption of tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation. *Minerals Engineering*, 22-35.
- Gupta, A. &. (2015). *Mineral Processing Design and Operations*. Perth, Western Australia: Elsevier.
- Hernández, S. (Julio de 2014). *Sonami*. Obtenido de www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/11.-Mediana-Mineria-en-Chile.pdf
- Napier, T. M. (1999). *Mineral Comminution Circuits, Thier Operation and Optimisation*. Hall & Jones PtyLtd, Brisbane.
- Neesse, T. (2003|). Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge. *Mineral Engineering*, 733-737.
- Powell, M. S. (2006). The Selection and Design of Mill Liners. *Advances in Comminution*, 331-376.
- Sernageomin. (2012). *Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile N°9*. Obtenido de https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/Atlas_Faenas_Mineras_09_Region5_6_RM.pdf

11 Anexos

11.1 Informe test de bond

11.1.1. Antecedentes

Se analizaron dos muestras de 10 [kg] provenientes de la mina Peumo y Don Jaime, previamente chancadas bajo 6 mallas y tratadas por separado.

11.1.2. Procedimiento

El procedimiento es idéntico para los dos minerales tratados. El ensayo fue realizado en un molino estándar de Bond de 12 x 12 pulgadas con la siguiente distribución de carga de bolas:

Tabla 46. Carga de bolas, molino bond

Cantidad de Bolas	Diámetro de Bolas [in]
25	1 ½
39	1 ¼
60	1
68	7/8
93	¾

Previamente, se realizó una caracterización granulométrica, de la muestra de alimentación al molino de Bond, con el objeto de obtener el valor del F_{80} .

El ensayo se realizó simulando una molienda en circuito cerrado, con una carga circulante de 250%. El molino se cargó con 700 cc de mineral, iniciando la molienda con 100 r.p.m., posteriormente el molino fue descargado tamizando el producto en la malla de corte (malla #140). El peso de mineral bajo la malla de corte fue reemplazado por carga fresca, reconstituyendo la carga original.

La revolución del período siguiente se calculó en función de:

- El peso del producto bajo la malla de corte, necesario para obtener una carga circulante de 250%.
- Los gramos producidos por cada revolución (G.b.p.) del período anterior.

- Este procedimiento se repitió en los siguientes períodos hasta obtener el equilibrio de la carga circulante y del G.b.p. Una vez alcanzado el equilibrio, se procedió a determinar la distribución granulométrica, en duplicado, formando un compuesto con el producto de los tres últimos períodos, con el objeto de obtener el valor del P80.

El procedimiento utilizado consistió sacar una muestra representativa del compuesto y tratarla por el analizador de partículas en húmedo.

El Índice de dureza del material se calculó según la siguiente expresión empírica:

$$Wi = \frac{44,5}{(P_1)^{0,23} \times (G.b.p)^{0,82} * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (\text{Ec. 23})$$

- W_i = Índice de dureza (kWh/tc) P_1 = Malla de corte (μm)
- G.b.p. = Gramos producidos por cada revolución
- F_{80} = Tamaño bajo el cual se encuentra el 80% de la alimentación (μm)
- P_{80} = Tamaño bajo el cual se encuentra el 80% del producto (μm)

11.1.3. Resultados

El resultado del Índice de dureza, Gbp (gr/rev) y los valores de F_{80} y P_{80} correspondientes a los análisis granulométricos de alimentación y producto, fueron los siguientes:

Tabla 47. Resultados test de Bond

Muestra	W_i [kWh/tc]	W_i [kWh/t]	Gbp [g/rev]	F_{80} [μm]	P_{80} [μm]
Don Jaime	16,7	18,4	0,78	2866	58,5
Peumo	13,2	14,5	1	2866	56,1

11.1.4. Resultados ensayo de Bond (W_i)

Muestra Don Jaime

Datos iniciales:

- Malla de corte #140, equivalente a 106 [μm].
- Masa inicial 1047,9[g].
- Porcentaje inicial -#140 igual a 5,2%.
- F₈₀ igual a 2.816[μm]

En las Tabla 48 y Tabla 49 pueden observarse los resultados del ensayo.

Tabla 48. Resultados ensayo de bond Don Jaime

	Rev	Inicial -140	Malla +140	Malla-140	Real -140	Producida -140	Gbp	CC
1	100,00	54,49	961,30	129,70	86,60	32,11	0,32	12,10
2	918,42	4,50	494,00	505,50	553,90	549,40	0,60	1,89
3	452,35	28,80	663,50	391,10	384,40	355,60	0,79	2,73
4	355,44	19,99	752,60	296,60	295,30	275,31	0,77	3,55
5	366,71	15,36	747,00	301,80	300,90	285,54	0,78	3,48
6	364,41	15,65	745,50	305,20	302,40	286,75	0,79	3,47

Tabla 49. Distribución granulométrica ensayo Don Jaime.

Alimentación		Producto	
Tamaño [μm]	Acumulado pasante %	Tamaño [μm]	Acumulado pasante %
3350	100	118,9	100
2000	49	108,0	99,8
1400	35	98,1	99,3
1000	27	89,1	97,9
710	2	81,0	95,5

500	17	73,6	91,8
300	11	66,8	86,9
212	9	60,7	81,1
150	7	55,2	75
106	5	50,1	69,2

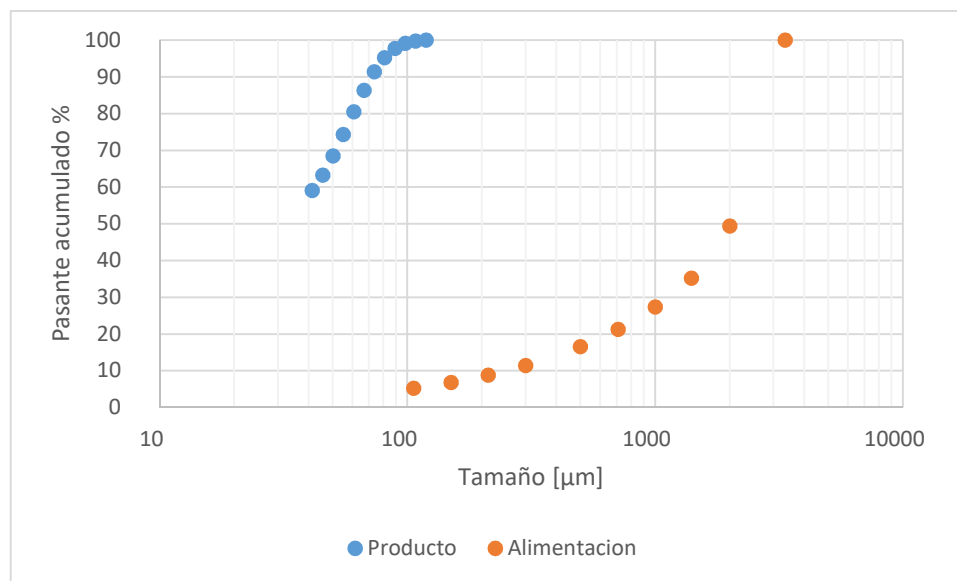


Figura 46. Distribución granulométrica resultados ensayo Don Jaime.

Finalmente se obtuvieron los siguientes valores:

- $W_i = 16,6$
- $G_{bp} = 0,78$
- $P_{80} = 1816 \text{ } [\mu\text{m}]$

4.1.1.1.1. Muestra DonPeumo:

Datos iniciales:

- Malla de corte #140, equivalente a $106 \text{ } [\mu\text{m}]$.
- Masa inicial $1053,9 \text{ [g]}$.
- Porcentaje inicial -#140 igual a $4,6\%$.
- F_{80} igual a $2866 \text{ } [\mu\text{m}]$.

En las Tabla 50 yTabla 51 pueden observarse los resultados del ensayo.

Tabla 50. Resultados ensayo de bond Peumo

	Rev	Inicial -140	Malla +140	Malla-140	Real -140	Producida -140	Gbp	CC
1,00	100,00	48,48	870,30	180,10	183,60	135,12	1,35	5,74
2,00	216,60	8,45	821,90	225,70	232,00	223,55	1,03	4,54
3,00	281,40	10,67	759,60	291,10	294,30	283,63	1,01	3,58
4,00	285,32	13,54	762,00	286,20	291,90	278,36	0,98	3,61
5,00	294,88	13,43	738,90	303,40	315,00	301,57	1,02	3,35

Tabla 51.Distribución granulométrica ensayo Peumo.

Alimentación		Producto	
Tamaño [μm]	Acumulado pasante %	Tamaño [μm]	Acumulado pasante %
3350	100	108,0	100
2000	48	98,1	99,9
1400	33	89,2	99,4
1000	25	81,0	98
710	19	73,6	95,1
500	14	66,8	90,5
300	10	60,7	84,5
212	8	55,2	77,4
150	6	50,1	70,3
106	5	45,5	63,7

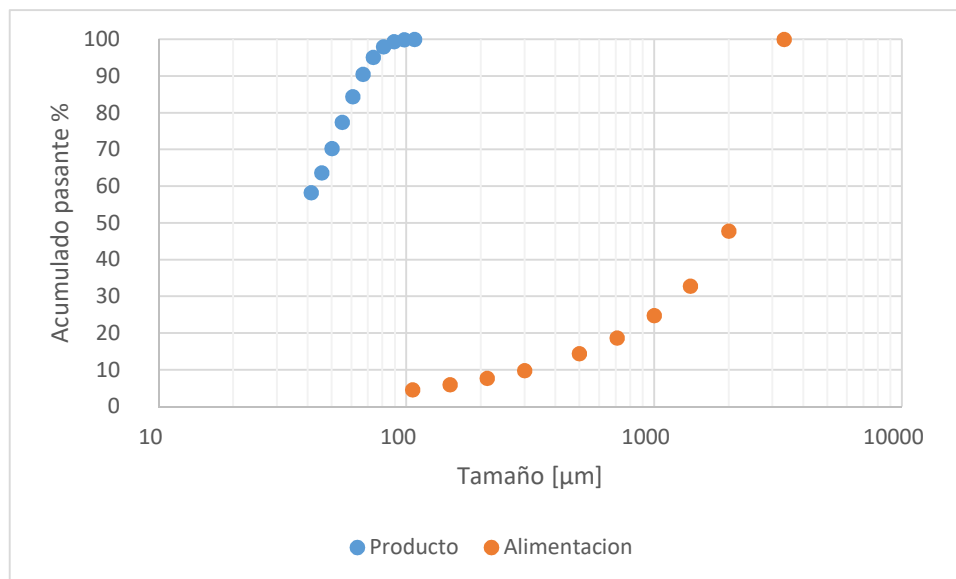


Figura 47. Distribución granulométrica resultados ensayo Peumo

Finalmente se obtuvieron los siguientes valores:

- $W_i = 13,24$
- $G_{bp} = 0,78$
- $P_{80} = 1816 \text{ } [\mu\text{m}]$

11.2 Registros históricos planta.

11.2.1. Datos de producción año 2018

- Datos reportados por planta:

Tabla 52. Datos reportados por planta.

Procesado [TMH]	149258
Humedad mineral %	1,98
Recuperación %	83,17
Ley mineral %	1,55
Cobre fino recuperado teórico [TMS]	1883,9

- Cobre fino despachado a ENAMI:

Tabla 53. Datos de cobre fino despachado.

Concentrado [TMH]	9915
Ley de concentrado %	19,83
Humedad concentrada %	9,3
Cobre fino despachado [TMS]	1782,4

- Producción minas:

Tabla 54. Balance mediante extracción de minas y stock.

Stock inicial [TMH]	2062
Stock Final [TMH]	4600
Extracción mina [TMH]	145843
Humedad mina %	4
Procesado planta [TMS]	137522

La comparación de lo reportada por planta, lo despachado y el balance por extraído desde minas puede ser visto en la Tabla 6.

11.2.2. Datos de producción Mayo 2019

- Datos reportados por planta:

Tabla 55. Producción registrada con propuesta concretada.

Procesado [TMH]	13895
Humedad mineral %	1,7
Recuperación %	82,85
Ley mineral %	1,49
Fino recuperado [TMS]	169,17

- Cobre fino despachado a ENAMI:

Tabla 56. Despachado ENAMI con propuesta concretada.

Concentrado [TMH]	792,4
-------------------	-------

Ley de concentrado %	20,62
Humedad concentrada %	9,1
Cobre fino despachado	163,42

11.3 Moly-Cop Tools

11.3.1. Ingreso de datos y ajuste en molino Allis Chalmers 5'x6'.

El ingreso de datos a la planilla puede observarse en la Figura 48 y el ajuste al modelo, se muestran en la Figura 49.

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

BALLPARAM_Direct : Simultaneous Mass Balance Closure and Grinding Parameters Estimation.

Circuit Type: **DIRECT** Sample N°: **1**

Remarks: **Base Case Example**

Mill Dimensions and Operating Conditions

Eff. Diam. ft	Eff. Length ft	Speed rpm	Charge Volume m3	Ball Charge m3	Interstitial Slurry m3	Interstital Slurry Filling %	Lift Angle (°)
4.4	6.6	74.0	40.00	40.00	100.00	29.8	29.8
							29.8
							10.0
							32

Cyclone Dimensions (inches) and Operating Pressure (psi)

Number	Diameter	Height	Inlet	Vortex	Apex	psi
1	10.0	34.8	2.28	2.99	1.81	4.00
Default Values: 30.0 2.5 3.5 1.8						

Charge Volume, m3 1.13 **Ball Charge** 5.27 **Interstitial Slurry** 0.88 **Excess** 0.00 **Apparent Density ton/m3** 5.425

Feedrate, ton/hr (dry) 3.6 **Ore Density, ton/m3** 2.70 **Ball Density, ton/m3** 7.75 **Make-up Ball Size, mm** 63.50

EXPERIMENTAL SIZE DISTRIBUTIONS

i	Mesh	Opening	Mid-Size	Fresh Feed		Mill Discharge		Cyclone Feed		Cyclone Uflow		Cyclone Oflow	
				ton/hr	% Retained	ton/hr	% Retained	ton/hr	% Retained	ton/hr	% Retained	ton/hr	% Retained
1			44901	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2			31750	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3			22451	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4			15875	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5			11225	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	5/16		7938	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	4		4760	0.77	21.28	78.72	1.15	3.42	96.58	1.28	3.79	96.21	0.00
8	6		3360	0.76	21.07	57.65	1.23	3.65	92.94	1.37	4.07	92.14	0.00
9	10		2000	0.69	19.08	38.57	1.85	5.48	87.46	2.05	5.98	86.16	0.00
10	14		1410	0.30	8.15	30.41	1.80	5.33	82.13	1.99	5.33	82.13	0.00
11	18		1000	0.22	6.03	24.38	2.09	6.20	75.93	2.32	6.20	75.93	0.00
12	25		707	0.16	4.45	19.93	3.38	10.03	65.90	3.75	10.03	65.90	0.00
13	35		500	0.05	1.12	16.59	4.45	13.20	52.70	4.90	14.51	48.85	0.07
14	50		297	0.03	0.67	12.92	7.44	22.05	30.65	8.24	22.05	30.65	0.37
15	70		210	0.06	1.73	11.19	3.47	10.29	20.36	3.84	10.29	20.36	0.46
16	100		149	0.05	1.45	9.74	2.03	6.01	14.35	2.25	6.01	14.35	0.49
17	140		105	0.04	1.06	8.68	1.13	3.35	11.00	1.25	3.35	11.00	0.40
18	200		74	0.03	0.83	7.84	0.68	2.02	8.98	0.76	2.02	8.98	0.31
19	270		53	0.02	0.68	7.16	0.46	1.35	7.62	0.51	1.35	7.62	0.22
20	400		37	0.02	0.64	6.52	0.38	1.12	6.50	0.42	1.12	6.50	0.20
21	400		0	0.24	6.52	0.00	2.19	6.50	0.00	2.43	6.50	0.00	1.08
Totals				3.63	100.00		33.74	100.00		37.37	100.00		33.74
% Solids					98.00			77.00			68.00		79.00
Slurry Density, ton/m3					2.611			1.941			1.748		1.990
Weighting Factor								1.000			1.000		1.000

Figura 48. Ingreso datos molino Allis Chalmers 5'x6'.

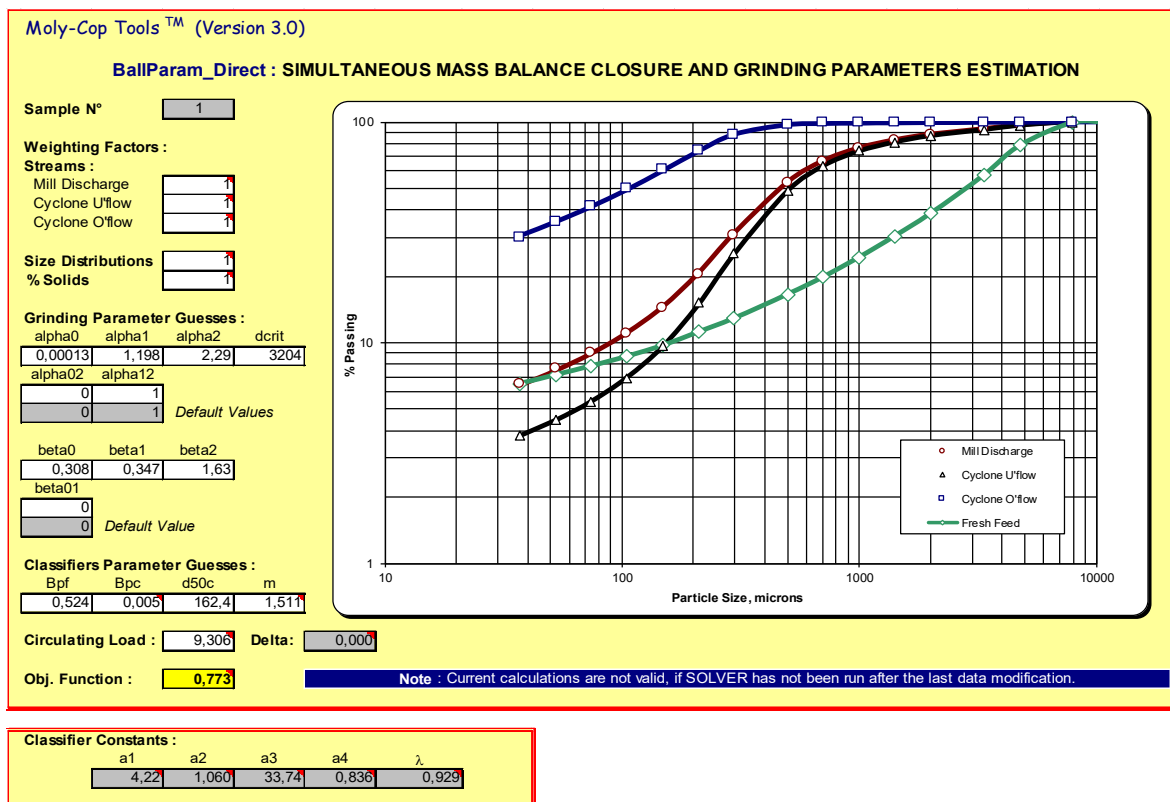


Figura 49. Ajuste de datos molino Allis Chalmers 5'x6'.

11.3.2. Ingreso de datos y ajuste en molino Allis Chalmers 6'x5'.

El ingreso de datos a la planilla puede verse en la Figura 50 y el ajuste al modelo, se muestra en la Figura 51.

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

BALLPARAM_Direct : Simultaneous Mass Balance Closure and Grinding Parameters Estimation.

Circuit Type: **DIRECT** Sample N°: **1**

Remarks: Base Case Example

Mill Dimensions and Operating Conditions

Eff. Diam. ft	5.7	Eff. Length ft	5.0	% Critical	68.0	Charge Filling %	40.00	Balls Filling %	40.00	Interstitial Slurry Filling %	100.00	Lift Angle (°)	27.4
rpm	21.73												

Cyclone Dimensions (inches) and Operating Pressure (psi)

Number	1	Diameter	10.0	Height	34.8	Inlet	1.99	Vortex	2.99	Apex	1.73	psi	4.00
Default Values:			30.0		2.5		3.5		1.8				

Charge

Volume, m3	1.47	Ball Charge	6.85	Slurry Charge	1.14	Interstitial Excess	0.00	Apparent Density, ton/m3	5.428
------------	------	-------------	------	---------------	------	---------------------	------	--------------------------	-------

Feedrate, ton/hr (dry): 5.52
Ore Density, ton/m3: 2.70
Balls Density, ton/m3: 7.75
Make-up Ball Size, mm: 63.50

32 Balls
0 Overfilling
5 Slurry
37 Net Power
10.0 % Losses
41 Gross kW

EXPERIMENTAL SIZE DISTRIBUTIONS

i	Mesh	Opening	Mid-Size	Fresh Feed			Mill Discharge			Cyclone Feed			Cyclone Ufflow			Cyclone O'flow		
				ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing
1	44901			0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
2	31750		37757	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
3	22451		26698	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
4	15875		18879	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
5	11225		13349	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
6	5/16	7938	9439	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
7	4	4760	6147	0.99	17.85	82.15	1.32	4.16	95.84	1.55	4.16	95.84	1.81	5.72	94.28	0.03	0.47	99.53
8	6	3360	3999	1.13	20.42	61.73	1.65	5.21	90.63	1.93	5.21	90.63	1.91	6.04	88.24	0.03	0.62	98.91
9	10	2000	2592	1.12	20.21	41.52	2.78	8.80	81.83	3.27	8.80	81.83	2.83	8.93	79.31	0.08	1.53	97.37
10	14	1410	1679	0.55	9.90	31.62	2.53	7.99	73.85	2.97	7.99	73.85	2.45	7.75	71.56	0.09	1.72	95.66
11	18	1000	1187	0.32	5.71	25.90	2.64	8.36	65.49	3.10	8.36	65.49	2.72	8.59	62.97	0.14	2.55	93.10
12	25	707	841	0.26	4.76	21.14	3.65	11.53	53.96	4.29	11.53	53.96	3.87	12.24	50.72	0.27	4.98	88.12
13	35	500	595	0.19	3.43	17.71	3.85	12.18	41.78	4.53	12.18	41.78	4.22	13.35	37.37	0.45	8.20	79.92
14	50	297	385	0.21	3.89	13.83	4.94	15.61	26.17	5.80	15.61	26.17	5.37	16.96	20.41	0.94	16.97	62.95
15	70	210	250	0.10	1.87	11.96	2.09	6.60	19.56	2.45	6.60	19.56	2.07	6.54	13.87	0.60	10.81	52.14
16	100	149	177	0.08	1.49	10.48	1.39	4.38	15.18	1.63	4.38	15.18	1.21	3.81	10.06	0.49	8.95	43.18
17	140	105	125	0.07	1.24	9.24	0.92	2.91	12.27	1.08	2.91	12.27	0.70	2.21	7.85	0.38	6.95	36.23
18	200	74	88	0.06	1.09	8.15	0.66	2.07	10.19	0.77	2.07	10.19	0.44	1.41	6.44	0.31	5.55	30.68
19	270	53	63	0.05	0.84	7.31	0.48	1.53	8.66	0.57	1.53	8.66	0.30	0.96	5.48	0.24	4.29	26.39
20	400	37	44	0.04	0.74	6.57	0.42	1.32	7.34	0.49	1.32	7.34	0.23	0.72	4.76	0.22	4.07	22.32
21	400	0	19	0.36	6.57	0.00	2.32	7.34	0.00	2.73	7.34	0.00	1.51	4.76	0.00	1.23	22.32	0.00
Totals				5.52	100.00		31.64	100.00		37.16	100.00		31.64	100.00		5.52	100.00	
% Solids						98.00			77.00			68.00			80.00			45.00
Slurry Density, ton/m3						2.611			1.941			1.749			2.015			1.395
Weighting Factor									1.000			1.000			1.000			1.000

Figura 50. Ingreso datos molino Allis Chalmers 6'x5'.

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

BALLPARAM_Direct : Simultaneous Mass Balance Closure and Grinding Parameters Estimation.

Circuit Type: **DIRECT** Sample N°: **1**

Remarks: Base Case Example

Mill Dimensions and Operating Conditions

Eff. Diam. ft	5.7	Eff. Length ft	5.0	% Critical	68.0	Charge Filling %	40.00	Balls Filling %	40.00	Interstitial Slurry Filling %	100.00	Lift Angle (°)	27.4
rpm	21.73												

Cyclone Dimensions (inches) and Operating Pressure (psi)

Number	1	Diameter	10.0	Height	34.8	Inlet	1.99	Vortex	2.99	Apex	1.73	psi	4.00
Default Values:			30.0		2.5		3.5		1.8				

Charge

Volume, m3	1.47	Ball Charge	6.85	Slurry Charge	1.14	Interstitial Excess	0.00	Apparent Density, ton/m3	5.428
------------	------	-------------	------	---------------	------	---------------------	------	--------------------------	-------

Feedrate, ton/hr (dry): 5.52
Ore Density, ton/m3: 2.70
Balls Density, ton/m3: 7.75
Make-up Ball Size, mm: 63.50

32 Balls
0 Overfilling
5 Slurry
37 Net Power
10.0 % Losses
41 Gross kW

EXPERIMENTAL SIZE DISTRIBUTIONS

i	Mesh	Opening	Mid-Size	Fresh Feed			Mill Discharge			Cyclone Feed			Cyclone Ufflow			Cyclone O'flow		
				ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing
1	44901			0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
2	31750		37757	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
3	22451		26698	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
4	15875		18879	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
5	11225		13349	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
6	5/16	7938	9439	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
7	4	4760	6147	0.99	17.85	82.15	1.32	4.16	95.84	1.55	4.16	95.84	1.81	5.72	94.28	0.03	0.47	99.53
8	6	3360	3999	1.13	20.42	61.73	1.65	5.21	90.63	1.93	5.21	90.63	1.91	6.04	88.24	0.03	0.62	98.91
9	10	2000	2592	1.12	20.21	41.52	2.78	8.80	81.83	3.27	8.80	81.83	2.83	8.93	79.31	0.08	1.53	97.37
10	14	1410	1679	0.55	9.90	31.62	2.53	7.99	73.85	2.97	7.99	73.85	2.45	7.75	71.56	0.09	1.72	95.66
11	18	1000	1187	0.32	5.71	25.90	2.64	8.36	65.49	3.10	8.36	65.49	2.72	8.59	62.97	0.14	2.55	93.10
12	25	707	841	0.26	4.76	21.14	3.65	11.53	53.96	4.29	11.53	53.96	3.87	12.24	50.72	0.27	4.98	88.12
13	35	500	595	0.19	3.43	17.71	3.85	12.18	41.78	4.53	12.18	41.78	4.22	13.35	37.37	0.45	8.20	79.92
14	50	297	385	0.21	3.89	13.83	4.94	15.61	26.17	5.80	15.61	26.17	5.37	16.96	20.41	0.94	16.97	62.95
15	70	210	250	0.10	1.87	11.96	2.09	6.60	19.56	2.45	6.60	19.56	2.07	6.54	13.87	0.60	10.81	52.14
16	100	149	177	0.08	1.49	10.48	1.39	4.38	15.18	1.63	4.38	15.18	1.21	3.81	10.06	0.49	8.95	43.18
17	140	105	125	0.07	1.24	9.24	0.92	2.91	12.27	1.08	2.91	12.27	0.70	2.21	7.85	0.38	6.95	36.23
18	200	74	88	0.06	1.09	8.15	0.66	2.07	10.19	0.77	2.07	10.19	0.44	1.41	6.44	0.31	5.55	30.68
19	270	53	63	0.05	0.84	7.31	0.48	1.53	8.66	0.57	1.53	8.66	0.30	0.96	5.48	0.24	4.29	26.39
20	400	37	44	0.04	0.74	6.57	0.42	1.32	7.34	0.49	1.32	7.34	0.23	0.72	4.76	0.22	4.07	22.32
21	400	0	19	0.36	6.57	0.00	2.32	7.34	0.00	2.73	7.34	0.00	1.51	4.76	0.00	1.23	22.32	0.00
Totals				5.52	100.00		31.64	100.00		37.16	100.00		31.64	100.00		5.52	100.00	
% Solids						98.00			77.00			68.00			80.00			45.00
Slurry Density, ton/m3						2.611			1.941			1.749			2.015			1.395
Weighting Factor									1.000			1.000			1.000			1.000

Figura 51. Ajuste de datos molino Allis Chalmers 6'x5'.

11.3.3. Ingreso de datos y ajuste en molino Hardinge 8'x48".

El ingreso de datos a la planilla puede verse en la Figura 52 y el ajuste al modelo, puede verse en la Figura 53.

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

BALLPARAM_Dual : Simultaneous Mass Balance Closure and Grinding Parameters Estimation.

Circuit Type: **DUAL** Sample N°: **1**

Remarks: **Base Case Example**

Mill Dimensions and Operating Conditions

Eff. Diam. ft	7.4	Eff. Length ft	5.2	Speed rpm	20.05	Charge Volume, m³	2.51	Ball Charge Weight, tons	11.67	Slurry Charge	1.93	Apparent Density ton/m³	5.417
% Critical Filling	71.0	Charge Filling %	40.00	Interstitial Slurry Filling %	100.00	Interstital Angle, (°)	35.8	Overfilling	0	Slurry	13	% Losses	10.0
Net Power	90	Gross kW	104										

Cyclone Dimensions and Operating Pressure (psi)

Number	1	Diameter	15.0	Height	49.2	Inlet	2.47	Vortex	4.57	Apex	2.44	psi	7.00
Default Values:			45.0				3.8		5.3		2.0		

Feedrate to Sump, ton/hr (dry): 9.2
On Density, ton/m³: 2.70
Balls Density, ton/m³: 7.75
Make-up Ball Size, mm: 63.50

Feedrate to Mill: 8.3 ton/hr (dry)
Mill Feed/Total Feed: 47.6 %

EXPERIMENTAL SIZE DISTRIBUTIONS

i	Mesh	Opening	Fresh Feed		Mill Discharge		Cyclone Feed		Cyclone Uflow		Cyclone O'flow		Secondary Feed	
			ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing	ton/hr	% Retained	% Passing
1	44901				100.00			100.00			100.00			100.00
2	31750	37757	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
3	22451	26986	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
4	15875	18879	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
5	11225	13349	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
6	7938	9439	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
7	4760	6147	0.03	0.30	99.70	2.14	2.51	97.40	2.16	2.30	97.70	2.52	3.29	96.71
8	3360	3999	0.04	0.40	99.30	2.12	2.50	94.90	2.16	2.30	95.40	2.80	3.39	93.32
9	2000	2592	0.09	0.94	98.35	2.70	3.18	91.80	2.79	2.97	92.44	3.15	4.10	89.21
10	1410	1679	0.10	1.05	97.30	2.29	2.69	89.11	2.38	2.53	89.90	2.83	3.70	85.52
11	1000	1187	0.15	1.61	95.69	2.54	2.99	86.12	2.69	2.86	87.05	2.89	3.77	81.75
12	707	841	0.30	3.25	92.46	4.29	5.05	81.06	4.59	4.88	82.17	4.47	5.63	75.33
13	500	595	0.52	5.73	86.73	7.20	8.48	72.58	7.73	8.21	73.96	7.23	9.43	66.49
14	297	385	1.30	14.25	72.48	19.65	23.14	49.44	20.96	22.28	51.68	19.15	24.98	41.51
15	210	250	1.06	11.55	60.93	13.45	15.83	33.61	14.50	15.41	36.27	12.79	16.68	24.82
16	100	106	0.96	10.73	50.21	9.20	10.63	22.75	10.18	10.82	25.45	7.94	10.36	14.46
17	140	105	0.78	8.52	41.69	5.34	6.29	15.40	6.12	6.51	18.94	3.92	5.12	9.35
18	200	74	0.61	6.69	35.00	3.25	3.83	12.60	3.86	4.11	14.83	1.97	2.58	6.77
19	270	53	0.46	5.03	29.97	2.10	2.48	10.14	2.56	2.72	12.11	1.09	1.42	5.35
20	400	37	0.44	4.68	25.29	1.64	1.93	8.25	2.07	2.20	9.91	0.68	0.89	4.46
21	-400	0	19	2.31	25.29	0.00	7.01	8.25	0.00	9.32	9.91	3.42	4.46	6.24
Totals			8.15	100.00		84.94	100.00		94.09	100.00		76.64	100.00	
% Solids					39.00			76.00			60.00		80.00	
Slurry Density, ton/m³					1.325			1.918			1.607		2.015	
Weighting Factor					1.000			1.000			1.000		1.000	

Figura 52. Ingreso datos molino Hardinge 8'x48''.

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

BallParam_Dual : SIMULTANEOUS MASS BALANCE CLOSURE AND GRINDING PARAMETERS ESTIMATION

Sample N°: **1**

Weighting Factors :

Streams :

Mill Discharge: **1**

Cyclone Uflow: **1**

Cyclone O'flow: **1**

Size Distributions

% Solids: **1**

Grinding Parameter Guesses :

alpha0: **0.00096** alpha1: **0.981213** alpha2: **2.5** dcrit: **3338.539**

alpha02: **0** alpha12: **0** Default Values

beta0: **0.225018** beta1: **0.25** beta2: **4**

beta01: **0** Default Value

Classifiers Parameter Guesses :

Bpf: **0.299** Bpc: **0.000** d50c: **121.9** m: **1.235**

Circulating Load : **4.392** **Delta:** **0.000**

Obj. Function : **1,996**

Note : Current calculations are not valid, if ITERATE and SOLVER has not been run after the last data modification.

Classifier Constants :

a1: **4.73** a2: **1.774** a3: **37.74** a4: **0.300** λ: **0.900**

Figure 53: Ajuste de datos molino Hardinge 8'x48''.

Figura 53. Ajuste de datos molino Hardinge 8'x48''.

11.3.4. Resultados parámetros de modelación molino Allis Chalmers 5'x6'.

Los parámetros obtenidos para la modelación de molienda y el hidrociclón pueden verse desde la Tabla 65 hasta la Tabla 68. Tabla 65. Parámetros molienda, molino 8'x48".

Tabla 57. Parámetros molienda, molino 5'x6'.

alpha01	alpha02	alpha11	alpha12	alpha2	Dcrit
0,00013	0,0	1,198	1,000	2,29	3204

Tabla 58. Función fractura, molino 5'x6'.

Beta00	Beta01	Beta1	Beta2
0,308	0,0	0,35	1,63

Tabla 59. Parámetros clasificación, molino 5'x6'.

a1	a2	a3	a4	λ
4,22	1,060	33,74	0,836	0,929

Tabla 60. Constantes clasificación, molino 5'x6'.

Bpf	Bpc	d _{50c}	m
0,524	0,005	162,4	1,511

11.3.5. Resultados parámetros de modelación molino Allis Chalmers 6'x5'.

Los parámetros obtenidos para la modelación del molino y ciclón pueden verse desde la Tabla 65 hasta la Tabla 68. Tabla 65. Parámetros molienda, molino 8'x48".

Tabla 61. Parámetros molienda, molino 6'x5'.

alpha01	alpha02	alpha11	alpha12	alpha2	Dcrit
0,00013	0,000	1,198	1,000	2,29	3204

Tabla 62. Función fractura, molino 6'x5'.

Beta00	Beta01	Beta1	Beta2
0,308	0,000	0,35	1,63

Tabla 63. Parámetros clasificación, molino 6'x5'.

a1	a2	a3	a4	λ
4,218	1,060	33,744	0,836	0,929

Tabla 64. Constantes clasificación, molino 6'x5'.

Bpf	Bpc	d _{50c}	m
0,524	0,005	162,4	1,511

11.3.6. Resultados parámetros de modelación molino Allis Chalmers 8'x48".

Los parámetros obtenidos para la modelación del molino y ciclón pueden verse desde la Tabla 65 hasta la Tabla 68. Tabla 65. Parámetros molienda, molino 8'x48".

Tabla 65. Parámetros molienda, molino 8'x48".

alpha01	alpha02	alpha11	alpha12	alpha2	Dcrit
0,00096	0,000	0,981	1,000	2,50	3339

Tabla 66. Función fractura, molino 8'x48".

Beta00	Beta01	Beta1	Beta2
0,225	0,000	0,25	4,00

Tabla 67. Parámetros clasificación, molino 8'x48''.

a1	a2	a3	a4	λ
4,731	1,774	37,737	0,300	0,900

Tabla 68. Constantes clasificación, molino 8'x48''.

Bpf	Bpc	d _{50c}	m
0,299	0,000	121,9	1,235

11.3.7. Simulación: Aumento fracción de la velocidad crítica del molino Hardinge 8'x48"

Moly-Cop Tools™ (Version 3.0)

BALLSIM : Conventional Closed Circuit Grinding Simulator

Circuit Type: **DUAL FEED** (see Flowsheet) Simulation N°: **0**

Remarks: **CASO BASE**

Mill Dimensions and Operating Conditions

Eff. Diam. ft	Eff. Length ft	Speed % Critical	Charge Filling, %	Balls Filling, %	App. Dens. ton/m3	Interstitial Slurry, %	Lift Angle, (°)
7,4	5,2	75,0	40,00	40,00	5,42	100,0	35,8
rpm		21,18					

Cyclone Dimensions (inches) and Operating Conditions

Number	Diameter	Height	Inlet	Vortex	Apex
1	15,0	49,2	2,47	4,57	2,51
Suggested Default Values:		45,0	3,8	5,3	2,6

% Solids O'flow: 30,0
% Solids U'flow: 79,2
% Solids Mill Discharge: 76,0

Circulating Load: 4,186 (Guess)
 4,186 (Actual)
 0,000 (Delta)

Ore Density, ton/m3: 2,70
Balls Density, ton/m3: 7,75

Simulation results are not valid until the **Iterate** button has been clicked.

Main Simulated Outputs

P80	170,0
Wio	16,24
% Fines MD	8,81
Q	111
Bpf	0,291
Cycl. Psi	8,4
Total Water	28,8

Arbiter's Flow #: 1,34

Feedrate to Sump, ton/hr (dry): 12,4
Moisture in Feedrate to Sump, %: 61,0

Feedrate to Ball Mill, ton/hr (dry): 8,3
Moisture in Feedrate to Ball Mill, %: 2,0

Feed Size Distribution

i	Mesh	Opening	Mid-Size	ton/hr	% Retained	% Passing
1	1,05	44901				100,00
2	0,742	31750	37757	0,00	0,00	100,00
3	0,525	22451	26698	0,00	0,00	100,00
4	0,371	15875	18879	0,00	0,00	100,00
5	3	11225	13349	0,00	0,00	100,00
6	4	7938	9439	0,00	0,00	100,00
7	6	4760	6147	0,02	0,17	99,83
8	8	3360	3999	0,02	0,18	99,65
9	10	2000	2592	0,03	0,25	99,40
10	14	1410	1679	0,03	0,24	99,16
11	20	1000	1187	0,04	0,32	98,84
12	28	707	841	0,06	0,46	98,38
13	35	500	595	0,14	1,10	97,27
14	48	297	385	1,15	9,34	87,93
15	65	210	250	1,75	14,16	73,77
16	100	149	177	1,67	13,50	60,27
17	150	105	125	1,33	10,80	49,48
18	200	74	88	1,00	8,09	41,38
19	270	53	63	0,73	5,90	35,49
20	400	37	44	0,61	4,95	30,54
21	-400	0	19	3,77	30,54	0,00

Secondary Feed

ton/hr	% Passing
0,00	100,00
0,00	100,00
0,00	100,00
0,00	100,00
0,00	100,00
0,00	100,00
0,00	100,00
1,59	80,88
1,70	60,41
1,63	40,80
0,77	31,52
0,48	25,71
0,39	20,95
0,29	17,43
0,32	13,56
0,15	11,71
0,12	10,21
0,10	9,01
0,08	8,00
0,07	7,17
0,07	6,35
0,53	0,00

Make-up Ball Size, mm: 63,5 **2,50** inches

Selection Function Parameters :

alpha0	alpha1	alpha2	dcrit
0,001319	0,93196268	2,5	3700
0,00131906	<<< 0,01	5000 >>>	3700,12178
0,650	<<< 0,65	0,78 >>>	0,780

Defaults

Expanded Form :

alpha02	alpha12
0	1
0	1

Suggested Default Values

Breakage Function Parameters :

beta0	beta1	beta2
0,21866983	0,25	4

Expanded Form :

beta01
0
0

Suggested Default Value

Classifier Constants :

a1	a2	a3	a4	λ	Bpc
4,69	1,800	37,45	0,303	0,906	0,000
9,411	1,447	57,239	0,630	0,950	0,000

Suggested Default Values

Figura 54. Simulación: Aumento fracción de la velocidad crítica, molino Hardinge 8'x48"

11.4 Formas de cálculo para el balance económico.

EL cobre pagable corresponde a:

$$Cu_{pagable} = C * \frac{(L\% - 1\%)}{100} \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

- C= concentrado producido, [TMS]
- L= Ley de cobre, %
- $Cu_{pagable}$ = Cobre fino pagable, [TMS]

La plata pagable corresponde a:

$$Au_{pagable} = C * L_{Au} * 0,8 \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

- C= Concentrado producido, [TMS]
- L_{Au} = Ley de plata, [%]

Los costos de deducción metalúrgica o maquila son:

- Fusión: Corresponde a 111,5[USD] por tonelada de concentrado.
- Refinación de cobre: Corresponde a 0,1115[USD] por libra de cobre pagable.
- Refinación de plata: Corresponde a 0,365[USD] por onza de plata pagable.