

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**VARIABLES OPERACIONALES Y SU INFLUENCIA EN LA OPERACIÓN, PRO
OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA MOLIENDA SAG**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

MANUEL ALEJANDRO SILVA BALOCCHI

**PROFESOR GUÍA:
ALDO CASALI BACELLI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
GONZALO MONTES ATENAS
PATRICIA LARA RAMÍREZ**

**SANTIAGO DE CHILE
2013**

RESUMEN

Los procesos de conminución, en particular la molienda, constituyen una de las operaciones de mayor relevancia en el procesamiento de minerales, tanto por su importancia para las etapas de concentración posteriores como por el costo asociado a la cantidad de energía consumida.

Actualmente, el recurso energético se ha transformado en la principal preocupación, debido a su alto precio y a la escasez del suministro a nivel nacional. Lo anterior ha repercutido sobremanera en la industria del cobre, requiriéndose de costos operacionales cada vez mayores para satisfacer las altas demandas productivas que rigen actualmente. En dicho escenario, la optimización de la molienda, que consume el mayor porcentaje de la energía de la planta de procesos, adquiere un rol fundamental.

El siguiente trabajo se enfoca en el estudio de los circuitos de molienda SAG, los de mayor aceptación actualmente, para el desarrollo de una herramienta predictiva orientada a la optimización energética y productiva del molino Semiautógeno. Se diseñan 3 modelos predictivos: uno para la potencia consumida por el molino SAG, otro para su consumo específico de energía y un tercero para el tonelaje de alimentación fresca al circuito de molienda. El desarrollo de dichos modelos y su validación, se basa en información operacional de 4 circuitos correspondientes a 3 faenas nacionales de molienda SAG que procesan minerales de cobre.

La metodología empleada consiste, en primera instancia, en la identificación de correlaciones entre las variables claves del circuito de molienda SAG, a través del análisis de la faena con mayor cantidad de información disponible (DB.M1). Posteriormente, se evalúa si las tendencias más relevantes evidenciadas para esta base de datos, se dan también para los demás circuitos de molienda considerados. Lo anterior permite descartar o validar la existencia de comportamientos de tipo genérico, que permitan el desarrollo de una o varias herramientas predictivas.

La metodología empleada permite obtener 3 modelos que consideran como variable de entrada principal a la granulometría presente en la alimentación fresca, en particular el porcentaje retenido +1” -6”. Los modelos estiman satisfactoriamente el valor de las variables modeladas, siendo el de potencia consumida el de mayor calidad predictiva, con un error promedio de 3,7%, mientras que el modelo para el consumo específico de energía del molino SAG registra el peor ajuste, con un error de 6,8%, considerado aun aceptable. El mayor error asociado a este último modelo reside en la falta de representatividad de los datos de tonelaje de alimentación fresca utilizados para su construcción, en los cuales se identifica la existencia de un sesgo debido a perturbaciones externas.

Los 3 modelos obtenidos constituyen un aporte inédito, al considerar como variable de entrada la granulometría de alimentación fresca, parámetro que hasta el momento no había sido incluido en modelos de esta naturaleza. Se recomienda seguir perfeccionando el actual trabajo, adicionando al mismo mayor cantidad de datos reales y actualizados que permitan mejorar la calidad predictiva de los modelos desarrollados.

ABSTRACT

Comminution, particularly milling, is the most important operation in mineral processing, both for its relevance to the downstream processes as well as for the cost associated with the energy consumption.

Currently, the energy resource has become a major concern due to its high price and its nationwide shortage. This has a great impact on the copper industry, requiring major operational costs to satisfy the currently high production demands. In this scenario, the optimization of milling, which consumes the highest percentage of the power consumed in a processing plant, acquires a fundamental role.

The following work is focused on the study of SAG milling circuits, currently the most widely accepted, for the development of a predictive tool aimed to optimize energy consumption and production of a SAG mill. Three predictive models are designed: one for the power draw by the SAG mill, another for its specific energy consumption and a third for the tonnage of fresh ore fed to the milling circuit. The development of these models and their validation, are based on operational information from 4 SAG grinding circuits corresponding to 3 Chilean copper concentration plants.

The methodology consists in, first, to identify correlations between the main variables of a SAG milling circuit, through the analysis of the operation with the greater amount of information available (DB.M1). Then, to evaluate the most relevant trends, to see if they are repeated in other milling plants considered. This allows us to validate or rule out generic type behaviors, which allow the development of a predictive tool.

The methodology allows to obtain three models that consider as primary input variable to the size distribution of the fresh feed, particularly the percentage +1 "-6". The models successfully estimate the value of the variables modeled, being the power consumed the one with the best predictive quality, with an average error of 3,7 %, while the model for the specific energy consumption of the SAG mill recorded the worst performance, with an error of 6,8 %, still considered acceptable. The largest error associated with this latest model is the lack of representativeness of the fresh feed tonnage data used in its construction, in which it identifies the existence of a bias due to external shocks.

The obtained models constitute an unprecedented contribution, considering as a variable input the size distribution of fresh feed, parameter which, until now, had not been included in models of this nature. It is recommended to further develop the current work, adding to it more real and updated data that allow to improve the predictive quality of the developed models.

AGRADECIMIENTOS

El primero de los agradecimientos va a mis padres; a mi mamá, Erika, por ser simplemente la motivación más grande que puede haber en mi vida, por inculcarme su gran fuerza y espíritu de superación. A mi papá, Manuel, mi tocayo, amigo y sin duda alguna el mejor profesor que he tenido y que tendré jamás. Los consejos más sabios que he tenido, han provenido siempre de él, un hombre ingenioso y que siempre he dicho, debió haber sido INJENIERO. Esta memoria y el esfuerzo dedicado a la misma, son fruto del amor hacia mis Padres.

A mis hermanos, en particular a Erika, mi hermana mayor, de quién siempre sentí su especial preocupación por mí, durante este trabajo; siempre atenta y transmitiendo su curiosidad y deseos de éxito.

A mi profesor guía Aldo Casali, por sorprenderme como profesor guía, por su alto grado de compromiso, por su comprensión y por estar siempre y de alguna manera al lado mío. Un académico cómo pocos y un apoyo fundamental en esta memoria. A él, por haberme hecho reprobar el primer ramo de la carrera, porque este significó el punto de quiebre más fuerte durante mi paso por la universidad y porque el mismo hecho me enseñó a seguir perseverando y encontrar mis áreas preferentes.

A la empresa de ingeniería y consultoría Hatch, por confiar en mí para desarrollar este trabajo, pero también por permitirme conocer a gente tan especial. Agradecer a Patricia Lara, quién fue la que sin dudarlo me dio la oportunidad de desarrollar mi memoria para Hatch. Al único y gran Pato Chavez, un verdadero capo y sin duda alguna un apoyo durante este proceso. Agradecer al equipo de procesos de Hatch, por escuchar mis lamentos y alegrías. A todas esas personas de la compañía de quienes siempre sentí un interés por ayudarme: al lucho, al Ricardo y a mi compa Eladio. Cómo olvidarme del gran “Cris” una persona que conocí al final, pero que sin duda alguna se transformó en casi un hermano.

A mis grandes amigos de la vida: Alvaro, por todas esas tertulias y por ayudarme con el Abstract; al Nico un gran yunta. A mis amigos del departamento de minas: a Marco, a pancho, a chicha y al pancho rojas. A Juanita, la secretaria más bella, cariñosa y comprensiva que he conocido, por escuchar cada uno de mis condoros y darme sus sabios consejos de madre.

Agradecer a ritalín, por incrementar mi capacidad cognitiva y rendimiento a niveles superiores cuando más lo necesité en este trabajo de título. Al cine, mi gran pasión, por enseñarme a ver las cosas distintas.

Finalmente quiero dar gracias a los errores, a los fracasos, alegrías, tristezas, enojos, injusticias, religiones, verdades y mentiras de la vida en general, que me han enseñado a conocer y a priorizar las cosas que realmente importan. GRACIAS TOTALES.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación del trabajo	2
1.2.	Objetivos	2
1.2.1.	Objetivos Generales	2
1.2.2.	Objetivos Específicos	2
2.	Revisión Bibliográfica	3
2.1.	Introducción	3
2.2.	Antecedentes Generales	4
2.2.1.	Molienda convencional	4
2.2.2.	Molienda SAG	5
2.2.3.	Molinos SAG	9
2.2.4.	Configuraciones de Molienda SAG	14
2.2.5.	Consumo de potencia del molino SAG	15
2.3.	Análisis Bibliográfico de la SAG Conference 2011	17
2.3.1.	Granulometría	18
2.3.2.	Índices de conminución	29
2.3.3.	Identificación de problemas operacionales - Medidas Preventivas y Correctivas	36
2.3.4.	Parámetros estructurales en los equipos de molienda	40
2.3.5.	Aspectos generales en circuitos de molienda SAG	45
2.4.	Selección de variables operacionales a estudiar	52
2.4.1.	Granulometría	52
2.4.2.	Condiciones operacionales del molino SAG	55
2.4.2.1.	Fracción de llenado con bolas del molino SAG	55
2.4.2.2.	Porcentaje de la velocidad crítica a la que opera el molino SAG	55
2.4.2.3.	Concentración de sólidos en peso alimentada al molino SAG	56
2.4.3.	Pebbles en el circuito de molienda	56
2.4.4.	Características estructurales del Molino SAG	57
	Resumen: Variables operacionales consideradas	57
3.	Metodología	58
3.1.	Selección de variables a estudiar y consideraciones	58
3.2.	Datos Operacionales	59
3.3.	Correlaciones entre parámetros operacionales	60
3.4.	Desarrollo de Modelos	63

4.	Análisis de Datos Operacionales	67
4.1.	Caracterización de la Base de Datos	67
4.2.	Limpieza de Datos	70
4.3.	Análisis de Datos Operacionales	76
4.3.1.	Consideraciones previas.....	76
4.3.2.	Consumo de potencia y específico de energía del Molino SAG	80
4.3.3.	Presión en los Descansos del Molino SAG.....	86
4.3.4.	Granulometría del producto final del circuito de molienda	88
4.3.5.	Pebbles	90
4.3.6.	Presión en los descansos del molino SAG	98
4.3.7.	Relación entre rangos granulométricos	100
5.	Construcción de modelos predictivos	102
5.1.	Bases de datos adicionales.....	103
5.2.	Modelo de Potencia Consumida por el molino SAG	104
5.2.1.	Determinación de la pendiente para el Modelo de Potencia Consumida	110
5.2.2.	Determinación del coeficiente de posición para el Modelo de Potencia Consumida	112
5.2.3.	Validación del Modelo de Potencia Consumida.....	117
5.3.	Modelo de Consumo Específico de Energía del molino SAG	119
5.3.1.	Validación del modelo de Consumo Específico de Energía del molino SAG	124
5.4.	Modelo adicional para el tonelaje de alimentación fresca	126
6.	Formas de uso para los modelos desarrollados.....	133
6.1.	Modelo para el Consumo Específico de Energía del molino SAG	133
6.1.1.	Dimensionamiento	133
6.1.2.	Control de la operación.....	134
6.2.	Modelo para el Consumo de Potencia del molino SAG	136
6.2.1.	Dimensionamiento	136
6.2.2.	Modelamiento.....	139
6.3.	Modelo para el tonelaje de alimentación fresca	140
7.	Conclusiones y Recomendaciones	142
7.1.	Conclusiones.....	142
7.2.	Recomendaciones	144

Referencias Bibliográficas	146
Anexos.....	149
Anexo A.1: Estadísticas Operacionales para DB.M1	150
Anexo A.2: Bases de Datos adicionales.....	157
1. Datos aportados por DB.M2.....	157
2. Datos aportados por DB.M3.....	157
3. Datos aportados por DB.M4.....	158
Anexo A.3: Descripción del lugar de Trabajo	159
1. Historia	159
2. Propietarios	159
3. Ubicación.....	159
4. Servicios.....	160
5. Estadísticas de Entrega de Servicio	161
6. Estructura Organizacional de Hatch.....	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección transversal del molino Hardinge Hadsell.	6
Figura 2. Suma de la potencia total instalada para los molinos AG/SAG de todo el mundo.....	7
Figura 3. Potencia instalada en distintos períodos por tipo de mineral	8
Figura 4. Componentes básicas de un molino SAG.....	10
Figura 5. Sección transversal de un molino SAG; identificación de las zonas de fractura.....	11
Figura 6. Patrones de movimiento de la carga, en un tambor rotatorio horizontal.....	11
Figura 7. Bosquejo de los lifters de un molino SAG, indicando su ángulo de ataque “ θ ”.....	12
Figura 8. Efecto de la velocidad en el movimiento de la carga.....	13
Figura 9. Circuitos de molienda SAG (a) y SAC (b).....	14
Figura 10. Circuitos de molienda DSAG (a) y SABC-A (b).	14
Figura 11. Configuración de molienda SAG tipo SABC-B.....	15
Figura 12. P_{80} del molino SAG N°2 de la planta en función de su consumo de potencia.....	19
Figura 13. Granulometría del producto del molino SAG en función de su tonelaje de alimentación.	20
Figura 14. Circuito de molienda SAG, SABC-A, con la caracterización del T_{80} para este caso.....	21
Figura 15. Reducción de la magnitud del T_{80} (mm) en el tiempo.....	22
Figura 16. Consumo específico de energía (kWh/t) del circuito en el tiempo.....	23
Figura 17. Variación del tonelaje de alimentación del molino SAG en el tiempo.....	25
Figura 18. Tonelaje de alimentación al molino SAG y granulometría final del circuito en el tiempo.....	27
Figura 19. Tonelaje del molino SAG en función del P_{80} en la alimentación.	28
Figura 20. Tonelaje del molino SAG en función de la fracción retenida de tamaño crítico.....	28
Figura 21. Consumo específico de energía del molino SAG en función del DWi (kWh/m ³).	31
Figura 22. DWi (kWh/m ³) del mineral en función de la ley de Cu en el yacimiento.....	32
Figura 23. Comportamiento del modelo SMCC y PTI de Metso durante los años 2006 – 2007.....	33
Figura 24. Correlación simple entre el Ball Work Index (BWi) y la ley de cobre del yacimiento.	34
Figura 25. Comportamiento de los modelos SMCC y PTI de Metso durante los años 2007 – 2008.....	34
Figura 26. Comportamiento de los modelos SMCC corregido y PTI de Metso	35
Figura 27. Granulometría del Overflow en función del tiempo de uso de los liners del molino.	40
Figura 28. Carga circulante del circuito durante el tiempo de uso de los lifters del molino SAG.....	42
Figura 29. Capacidad de tratamiento del molino SAG en función de su nivel de llenado total.	43
Figura 30. Target Weight del molino SAG en función a la alimentación del Run of Pile.	43
Figura 31. BWi (kWh/t) en función de la capacidad de tratamiento del molino SAG.....	44
Figura 32. Capacidad del molino SAG en función del consumo específico de energía.....	44
Figura 33. Resultados experimentales obtenidos para la operación de LKAB, durante el estudio.	46
Figura 34. Curvas de correlación entre parámetros del molino SAG, a distintos N/Nc (%) del mismo.	47
Figura 35. Curvas de correlación para el material grueso en la alimentación del molino SAG.	48
Figura 36. Curva de valores críticos a distintos porcentajes de la velocidad crítica (N/Nc).	48
Figura 37. Nivel de llenado del molino SAG al que se alcanzan los valores peaks vs N/Nc (%).	49
Figura 38. Capacidad de tratamiento de los molinos AG/SAG vs su consumo específico de energía.....	50
Figura 39. Granulometría del producto en función del consumo específico de energía.....	50
Figura 40. OWi del circuito global vs el consumo específico de energía para partículas bajo 150 μ m.	51
Figura 41. Tonelaje de Pebbles evacuados del molino SAG en el tiempo (año 2012)	71
Figura 42. Porcentaje de pebbles evacuados del molino SAG, respecto a la alimentación fresca.....	71
Figura 43. Porcentaje de granulometría fina en el tiempo; caracterización de datos duplicados.	72
Figura 44. Tonelaje de alimentación fresca en el tiempo	74
Figura 45. Potencia consumida por el molino SAG, para los datos sucios y los limpios.....	75
Figura 46. Presión medida en los descansos del molino SAG, en el tiempo.....	77

Figura 47. Caracterización del nivel de la presión en los descansos del molino SAG, en el tiempo.....	77
Figura 48. Caracterización del nivel de la presión en los descansos del molino SAG, en el tiempo.....	78
Figura 49. Potencia consumida por el molino SAG en función de la presión en los descansos	79
Figura 50. Potencia consumida por el molino SAG en función del % -1".....	81
Figura 51. Potencia consumida por el molino SAG en función del % +1" -6"	82
Figura 52. Potencia consumida por el molino SAG en función del % +6"	84
Figura 53. Consumo específico de energía del molino SAG en función del % -1"	85
Figura 54. Consumo específico de energía del molino SAG en función del % +1" -6"	85
Figura 55. Presión en los descansos del molino SAG en función del % -1".....	86
Figura 56. Presión en los descansos del molino SAG en función del % +1" -6"	87
Figura 57. Porcentaje sobre 100# en el producto final en función del CEE.SAG (kWh/t).....	89
Figura 58. % de pebbles evacuados en función del % +1" -6"	92
Figura 59. Esquema de la recirculación de pebbles al molino SAG y los flujos asociados.	93
Figura 60. Tonelaje de alimentación fresca en función del tonelaje de pebbles recirculados.	93
Figura 61. CEE.SAG (kWh/t) en función del porcentaje de pebbles recirculados	95
Figura 62. Potencia consumida por el molino SAG en función del % de pebbles recirculados	96
Figura 63. Granulometría final del circuito y P° SAG en función de la velocidad del molino SAG.....	99
Figura 64. Presión en los descansos del molino SAG en función de la concentración de sólidos.	99
Figura 65. Granulometría presente en la alimentación fresca, para los tres rangos de tamaño.	100
Figura 66. Granulometría fina en función de la intermedia, presentes en la alimentación fresca.	101
Figura 67. Pc SAG (kW) en función del % +1" -6", para las distintas bases de datos.....	105
Figura 68. Pc SAG (kW) en función del % -1", para las distintas bases de datos.	105
Figura 69. Potencia normalizada (Pcp) en función del % +1" -6" presente en la alimentación fresca.	107
Figura 70. Potencia normalizada (Pcp) en función del % -1" presente en la alimentación fresca.....	107
Figura 71. Granulometría fina en función de la intermedia, para las bases de datos.	109
Figura 72. Esquema para el proceso de determinación de la pendiente universal "m".....	111
Figura 73. Coeficiente de posición en función del Jb (%) del molino SAG, para cada base de datos.	113
Figura 74. n Real versus n Modelado en función de N/Nc (%) y Jb (%).	114
Figura 75. n Real versus n Modelado en función de N/Nc(%), Jb(%) y Cp(%).	116
Figura 76. Potencia normalizada en función del % +1" -6" (Experimental, Modelado)	117
Figura 77. Potencia normalizada en función del % -1" (Experimental, Modelado)	117
Figura 78. Consumo específico de energía en función del % +1" -6".	119
Figura 79. Coeficiente de posición n en función del Jb (%) para cada base de datos.	121
Figura 80. n Real versus n Modelado con el modelo vibariable en función de N/Nc (%) y Jb (%).	122
Figura 81. n Real versus n Modelado con el modelo trivariable, en función de N/Nc(%), Jb(%) y Cp(%).	123
Figura 82. Consumo específico de energía en función del % -1" +6" (DB.M1 y DB.M2)	124
Figura 83. Consumo específico de energía en función del % -1" +6" (DB.M3 y DB.M4)	124
Figura 84. Alimentación fresca en función del % +1" -6" (DB.M1 y DB.M2).....	127
Figura 85. Alimentación fresca en función del % +1"-6" (DB.M3 y DB.M4).....	128
Figura 86. Alimentación fresca en función del % +1"-6", para la base de datos DB.M3.	130
Figura 87. Alimentación fresca en función del % -1", para la base de datos DB.M3	130
Figura 88. Tonelaje de alimentación fresca en función del % +1" -6", para cada caso.....	131
Figura 89. Esquema de un pre-chancado y sus flujos asociados.....	135

Figuras de Anexo A.1

Figura A1- 1. Alimentación fresca en el tiempo, para los datos originales y los datos limpios.	150
Figura A1- 2. Pebbles Recirculados al molino SAG en el tiempo, para los datos originales y los limpios..	150
Figura A1- 3. Granulometría fina en el tiempo, para los datos originales y los limpios	151
Figura A1- 4. Granulometría intermedia en el tiempo, para los datos originales y los limpios.....	151
Figura A1- 5. Granulometría gruesa en el tiempo, para los datos originales y los limpios.....	151
Figura A1- 6. Pebbles evacuados del molino SAG en el tiempo, para los datos originales y los limpios...	152
Figura A1- 7. Potencia consumida por el molino SAG en el tiempo.	152
Figura A1- 8. Potencia consumida por el molino de Bolas N°1, para los datos originales y los limpios ..	152
Figura A1- 9. Potencia consumida por el molino de Bolas N°2, para los datos originales y los limpios.	153
Figura A1- 10. Velocidad de rotación del molino SAG en el tiempo; datos originales y los limpios.....	153
Figura A1- 11. Presión en los descansos del molino SAG, para los datos originales y los limpios.....	153

Figuras de Anexo A.3

Figura A3- 1. Organigrama de áreas de Hatch	162
Figura A3- 2. Organigrama Hatch-Divisiones	162
Figura A3- 3. Organigrama Hatch Global.....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Molinos SAG de mayor envergadura operando actualmente.....	7
Tabla 2. Escenarios operacionales y medidas para estaciones en una sola etapa (Single Stage) AG/SAG..	38
Tabla 3. Pares de parámetros a relacionar, sobre la base de datos obtenida.	57
Tabla 4. Características de los molinos en la planta de Molienda considerada.	67
Tabla 5. Variables operacionales medidas y reportadas en la Base de Datos.	68
Tabla 6. Detalle de los rangos granulométricos con los que se caracteriza la alimentación fresca.	69
Tabla 7. Rangos operacionales definidos para las principales variables a estudiar.....	75
Tabla 8. Principales variables en el estudio del Pc SAG (kW) vs granulometría.	80
Tabla 9. Incidencia de la recirculación de pebbles en la granulometría de alimentación al molino SAG....	97
Tabla 10. Caracterización de las bases de datos adicionadas al estudio.	103
Tabla 11. Condiciones operacionales definidas para el molino SAG en cada base de datos.....	104
Tabla 12. Parámetros de las líneas de regresión para Pc SAG vs granulometría, en cada base de datos.	106
Tabla 13. Parámetros de las líneas de regresión, para Pcp vs granulometría, en cada base de datos.....	108
Tabla 14. Pendiente definida para el modelo y los coeficientes de posición derivados de esta.....	112
Tabla 15. Error del modelo de potencia, evaluado para cada base de datos considerada.	118
Tabla 16. Magnitudes de las pendientes y coeficientes de correlación para el estudio de CEE.SAG.....	120
Tabla 17. Pendiente genérica y coeficientes de posición asociados, para cada base de datos.....	121
Tabla 18. Error del modelo de consumo específico de energía, para cada base de datos.....	125
Tabla 19. Error del modelo de tonelaje de alimentación fresca, calculado para cada base de datos.....	128
Tabla 20. Parámetros de las líneas de regresión, para Gsf en función del % +1” -6” del mismo.	132

Tablas de Anexo A.1

Tabla A1- 1. Estadísticas operacionales quincenales de DB.M1, para 12 variables.....	154
Tabla A1- 2. Estadísticas operacionales quincenales de DB.M1, para variables de hidrociclones.	155
Tabla A1- 3. Simbología para la lista de variables descritas en las estadísticas quincenales.....	156

Tablas de Anexo A.2

Tabla A2- 1. Datos operacionales asociados a DB.M2.	157
Tabla A2- 2. Datos operacionales asociados a DB.M3.	158
Tabla A2- 3. Datos operacionales asociados a DB.M2.	158

1. INTRODUCCIÓN

La liberación de las especies mineralógicas, desde la roca que las contiene, constituye el hito de mayor relevancia práctica dentro de toda la ruta de procesamiento de minerales. Los procesos de conminución, caracterizados por una etapa de chancado y otra posterior de molienda, son los encargados de reducir de tamaño el mineral con tal de generar el grado de liberación requerido por las etapas de concentración posteriores. De acuerdo al perfil granulométrico del mineral proveniente desde la mina, con colpas de hasta un metro de diámetro, el rol y la envergadura de los equipos se vuelve fundamental, considerando que las partículas deben ser reducidas alrededor de 6000 veces su tamaño original. Debido a lo anterior, los procesos de conminución terminan demandando la principal inversión de capital, incidiendo fuertemente en los costos unitarios del proceso metalúrgico, determinando la capacidad máxima de tratamiento para la planta e influyendo en la rentabilidad de la operación.

La molienda registra el consumo de la mayor parte de la energía de toda la planta de procesamiento, debido a lo cual su optimización se ha transformado en el objetivo principal durante los últimos años, considerando además el alto costo de la energía actualmente. A esto se suma la escasez del suministro energético a nivel nacional, lo que conlleva a una utilización sustentable y controlada del recurso natural (energía).

De manera casi antagónica al consumo sustentable de la energía, se haya el contexto actual de la minería nacional, la que se enfrenta a dos hechos cruciales: el envejecimiento de los yacimientos de cobre existentes y la creciente demanda productiva. Los yacimientos de cobre en Chile han visto disminuida la ley media del mineral de manera acelerada en el tiempo, debido a lo cual las medidas han sido: incrementar desmesuradamente la producción de sus faenas y con ello también el tamaño de los distintos equipos involucrados, tendiendo al gigantismo de los mismos.

Actualmente los circuitos de molienda, para la mayoría de los minerales, se rigen por las configuraciones de tipo SAG, en donde el molino Semiautógeno constituye el equipo de mayor relevancia, debido a su gigantesca capacidad de tratamiento, pero también a su alto consumo energético, el mayor de entre todos los equipos en la planta de molienda, transformándolo en el principal objeto de estudio.

El presente trabajo busca entregar una herramienta de tipo predictiva, orientada preferentemente a la optimización del perfil energético en el molino SAG, para minerales de cobre. Se espera adicionar a dicha herramienta, variables trascendentales que no han sido consideradas anteriormente dentro la creación de modelos predictivos como el que se desea, generando de esta manera un aporte innovador dentro del área de la conminución y en particular de la molienda SAG.

1.1. Motivación del trabajo

El año 2011 se celebró en Vancouver, Canadá, el congreso “SAG Conference 2011”, en el que se reúnen especialistas e investigadores del área de la conminución, en particular de la molienda SAG, a discutir acerca de innovación y aplicación de nuevas tecnologías asociadas a este ámbito.

En el marco de este evento y de los estudios dados a conocer en el mismo, nace la necesidad de seguir una línea de investigación paralela, con el fin de analizar las variables operacionales de mayor influencia dentro de la molienda SAG y las tendencias más fuertes que se han descubierto en torno a la mismas, con tal de generar una herramienta útil orientada a la molienda Semiautógena. Sumado a lo anterior se haya el contexto actual de la minería y en particular de la molienda, caracterizado por costos de la energía cada vez más altos, a partir de lo cual se busca generar un aporte orientado preferentemente al consumo energético óptimo en la molienda SAG, acorde con las actuales demandas productivas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

- Análisis de las variables operacionales trascendentales del circuito de molienda SAG, orientado a la creación de una herramienta predictiva focalizada en la optimización del consumo energético del molino SAG.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Uso del análisis bibliográfico desarrollado sobre la “SAG Conference 2011” y otras referencias, con el fin de identificar variables cruciales del circuito de molienda SAG y de orientar el estudio de estas sobre una o varias bases de datos.
- Adquisición de información actualizada, correspondiente a estadísticas operacionales de plantas de molienda SAG en operación.
- Determinación de correlaciones y comportamientos útiles, entre las variables operacionales fundamentales del circuito de molienda SAG, orientados a la optimización energética y productiva del circuito de molienda que se esté analizado.
- Identificación de comportamientos de carácter genérico, válidos para un grupo de faenas distintas, a partir de los cuales sea posible el desarrollo de una herramienta predictiva, orientada preferentemente a la optimización del consumo energético del molino SAG.
- Consideración de variables cruciales que no han sido incluidas anteriormente en modelos predictivos similares al que se desea obtener.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introducción

La ruta del procesamiento de minerales se encuentra constituida por una serie de etapas consecutivas, que se resumen en dos grandes fases: una primera denominada conminución, de carácter físico, dirigida a la reducción del tamaño de la roca proveniente desde la mina y posteriormente una segunda denominada concentración, orientada a la separación selectiva del mineral.

La configuración típica en la etapa de conminución, comprende una primera parte denominada chancado, la que puede desarrollarse en una, dos, tres y hasta cuatro etapas. Esta se encarga de reducir de tamaño el mineral proveniente directamente desde la mina, luego de la tronadura. Posteriormente se encuentra la molienda, que corresponde a la segunda y última parte de los procesos de conminución; su objetivo es determinar el tamaño final del mineral que será enviado a los procesos de concentración posteriores. Constituye por ende, uno de los hitos de mayor relevancia dentro de todo el proceso metalúrgico, por cuanto determinará el éxito de cualquiera de las etapas posteriores de separación y al mismo tiempo la facilidad y el costo asociado a la consolidación de dichos procesos.

La principal ventaja del chancado respecto a los procesos no convencionales (molienda Autógena y molienda Semiautógena) reside en su menor consumo energético, debido a que logra una mayor eficiencia respecto a la aplicación de energía en comparación a la molienda, cuyos mecanismos de fractura presentan una significativa pérdida de energía generada por la interacción entre los medios de molienda que utiliza y los revestimientos del equipo. Es debido a esto que una primera etapa de chancado, a pesar del desarrollo de nuevas tecnologías y a larga data de su implementación, no ha podido ser erradicada; además los equipos de molienda aun no son capaces de procesar mineral con granulometría tan grande como la proveniente desde la mina.

El molino SAG cuenta con capacidad para procesar mineral que se encuentra bajo un amplio rango granulométrico, pudiendo llevar a cabo un chancado de tipo secundario y terciario de manera simultánea en el mismo equipo. Es debido a esto que las configuraciones de molienda SAG han podido reducir el número de fases de chancado que poseen las configuraciones convencionales; sin embargo, dicha reducción se ve compensada con la aparición de etapas de chancado adicionales asociadas a la molienda SAG, tales como el chancado de pebbles o la posible implementación de una etapa de pre-chancado, procesos inexistentes en la molienda convencional.

La calidad del producto final que se obtiene de la planta de molienda, está definida por su granulometría, representada comúnmente en el P_{80} (tamaño bajo el cual se encuentra el 80% de la población de partículas de una muestra) del Overflow, correspondiente al flujo bajo tamaño que el clasificador en la salida del circuito de molienda (el Hidrociclón), envía como producto final hacia la concentración.

Si a la planta se le llegase a demandar un producto de calidad superior, entonces la granulometría que se le exige al producto final debiese disminuir, lo que estaría demandando, por parte del circuito, de un mayor consumo energético asociado a una operación de conminución más acotada.

Si bien se puede llegar a consolidar un alto grado de control sobre la operación, la variabilidad natural que presenta el mineral constituye un factor tanto o más trascendental que cualquiera de las demás variables en el circuito de molienda, afectando trascendentalmente el perfil energético/productivo de la operación. Esta variabilidad se encuentra caracterizada por dos factores fundamentales del mineral: su dureza y su perfil granulométrico. Finalmente la reducción de tamaño y la molienda en particular, se transforman en sucesos trascendentales dentro de la ruta de procesamiento del mineral post tronadura, tanto desde el punto de vista económico como operacional.

2.2. Antecedentes Generales

2.2.1. Molienda convencional

A través de la molienda, la segunda parte de los procesos de conminución, posterior al chancado, se consolida la reducción de tamaño de las partículas que forman parte del mineral. En este proceso se utilizan grandes equipos giratorios, cilíndricos o cilindro-cónicos, denominados molinos, quienes, con la ayuda de medios de molienda (barras o bolas de acero) adicionados en su interior, llevan a cabo la conminución del mineral alimentado a la planta.

Los circuitos de molienda más comunes en la actualidad obedecen a 3 configuraciones de amplio uso. Uno es el circuito de molienda convencional unitario, constituido únicamente por un molino de bolas de gran capacidad, capaz de satisfacer la demanda productiva de toda la planta de procesamiento. La principal característica de esta configuración, es ser muy eficiente en cuanto a la calidad del producto final obtenido, por lo cual debe operar en circuito cerrado directo, con hidrociclones que sean capaces de clasificar, posterior a la molienda, el producto final con la granulometría requerida. Este tipo de circuitos debe contar con molinos de grandes dimensiones, de hasta 28 pies de diámetro por 41 pies de largo, para hacer frente al amplio rango granulométrico proveniente de la etapa de chancado previa.

La segunda configuración, el diagrama clásico de molienda que se ha usado durante muchos años, corresponde a la Molienda Convencional en dos etapas. Esta modalidad comprende una primera etapa de molienda desarrollada por un molino de barras, el que desarrolla un trabajo selectivo, al moler preferentemente las colpas de mayor tamaño en desmedro del material más fino. Posteriormente el producto pasa a un proceso de molienda con molinos de bolas, que constituye la molienda secundaria, en un esquema cerrado inverso, de manera de clasificar con hidrociclones el producto molido y enviar el material que ya cumple con la granulometría demandada como producto final. Lamentablemente este esquema, debido a los problemas asociados al molino de barras, al desarrollo de nuevas tecnologías y la expansión de la molienda SAG, ha visto limitado cada vez más su uso^[1].

A pesar de la reconocida ineficiencia energética de los molinos de Bolas para el proceso de fractura, la implementación de estos equipos, operando en circuito cerrado con clasificadores hidráulicos (hidrociclones), ha sido la alternativa tecnológica tradicionalmente seleccionada para la molienda fina de minerales, sea esta en etapas únicas o múltiples, asociados con molinos de barras, molinos Autógenos (AG) o Semiautógenos (SAG).

La tercera y última configuración corresponde al circuito de molienda SAG, actualmente el de mayor aceptación y uso en el procesamiento de minerales. Esta configuración se explica en profundidad a continuación.

2.2.2. Molienda SAG

La molienda convencional tiene asociada un alto costo operacional, caracterizado por el consumo de acero de los medios de molienda y de los revestimientos del equipo. Las tasas de desgaste incrementales y los costos operacionales asociados, llevaron a la industria minera a buscar nuevas metodologías que hicieran frente a este aspecto. En respuesta a ello surgió la idea de reducir e incluso evitar el uso de los medios de molienda de acero al interior de los molinos, llegando con ello al desarrollo de grandes equipos, similares a los convencionales, que pudiesen ocupar las mismas colpas de mineral como remplazo a las bolas de acero originales. De esta manera se empezaron a desarrollar los denominados molinos Semiautógenos (SAG), en donde el uso de medios de molienda de acero se reduce ampliamente, y los molinos Autógenos (AG), en donde la conminución es desarrollada únicamente por el mismo mineral.

La idea de que los minerales puedan reducirse de tamaño a sí mismos surgió de los investigadores y técnicos del área de la conminución, tras el advenimiento de los molinos rotatorios en 1880. El primer molino AG operó en Sudáfrica y se dio a conocer en una publicación del “*American Institute of Mining, Metallurgic and Petroleum Engineers*”, el año 1908. Este molino sólo utilizaba colpas de mineral de 8” de diámetro como medio de molienda^[2].

La primera versión comercial de un molino AG fue denominada *Hardinge Hadsell* y fue construida en el año 1932 por Harlowe Hardinge^[3]. Una imagen de la sección transversal del equipo se puede observar en la Figura 1. El molino contaba con dimensiones de 24 pies de diámetro por 3 pies de largo y a pesar de haber funcionado de manera satisfactoria para minerales blandos, su diseño no fue óptimo para el tratamiento de minerales más duros, los que hacían que el molino tendiera a sobre llenarse y los procesos de fractura perdieran eficiencia^[3].

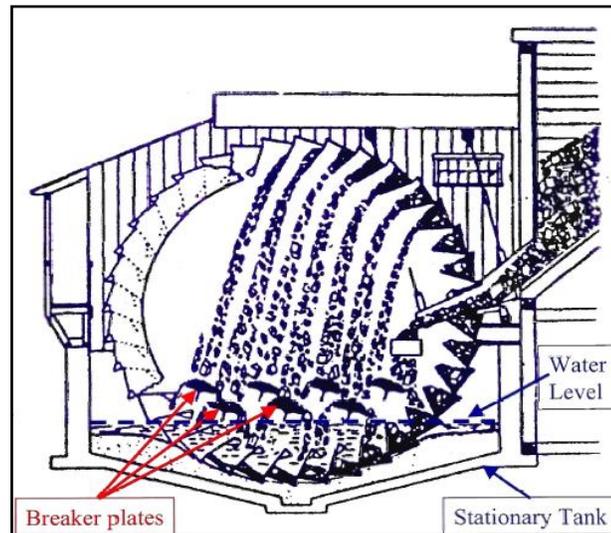


Figura 1. Sección transversal del molino Hardinge Hadsell.

Los molinos SAG corresponden a una variante del molino AG en donde se adiciona una carga de bolas de acero como medios de molienda, considerablemente inferior a la utilizada en los molinos de bolas, la que oscila normalmente entre un 5 y un 19%. Los molinos SAG se han utilizado preferentemente en las plantas de procesamiento de oro, cobre y platino con usos también en zinc, plomo y níquel. La molienda Semiautógena en Chile comenzó a operar durante 1981, fecha en que la compañía Minera *Disputada de las Condes* puso en funcionamiento el primer molino SAG, de 28 pies de diámetro por 14 pies de largo y 5200 kW de potencia instalada, en Los Bronces^[2].

De acuerdo al estado actual de la tecnología de molienda, si se toman las precauciones necesarias durante el diseño, la gran mayoría de las menas minerales se adaptan al procesamiento tanto por molienda SAG como convencional. La selección de una u otra alternativa, en la mayoría de los casos, depende de las consideraciones económicas, preferentemente sobre las técnicas. De acuerdo a lo anteriormente mencionado los argumentos que abalan el crecimiento en la utilización de molinos SAG corresponden a su mayor capacidad de tratamiento y el menor número de etapas y reciclos involucrados (menor cantidad de equipos y personal, mayor simplicidad en el diseño del circuito, etc.).

Otro aspecto que ha favorecido la selección de las configuraciones de molienda SAG, corresponde a los altos niveles de productividad demandados, consecuencia de las cada vez menores leyes medias presentes en los yacimientos actuales; asociado a este hecho, los molinos SAG son capaces de tratar el mineral que se obtiene como producto del chancado primario, descartando con ello las etapas y equipos asociados al chancado secundario y terciario. A pesar de que la molienda SAG implica un ahorro del costo de capital en un proyecto, producto de la menor cantidad de equipos considerados durante el chancado, se ha podido constatar que las diferencias en el consumo específico de energía, medido en “kWh/t procesada”, de esta tecnología respecto a la molienda convencional, no son significativas^[2].

A nivel mundial los molinos SAG más grandes que se encuentran operando, se describen en la siguiente tabla (Jones y Fresko, 2011)^[4]:

Tabla 1. Molinos SAG de mayor envergadura operando actualmente.

D (pies)	L (pies)	Potencia instalada (kW)	Proveedor	País
40	36	28000	CITIC	Australia
40	27	23980	Metso	Panamá
40	26	23860	FLSmith	Chile

La potencia instalada, respecto a los molinos SAG, ha visto incrementada su magnitud en los últimos años de manera considerablemente alta. La Figura 2 muestra un gráfico que representa el incremento en la suma total de la potencia instalada en los equipos de molienda SAG/AG de todo el mundo, durante períodos de 5 años, desde 1981 hasta el 2010^[4].

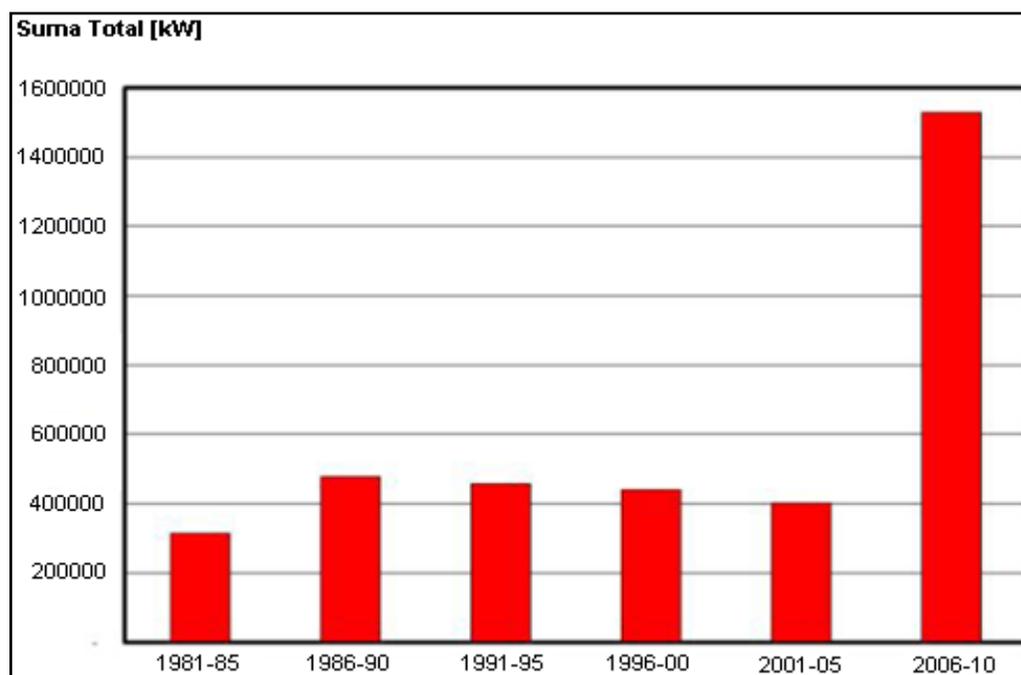


Figura 2. Suma de la potencia total instalada para los molinos AG/SAG de todo el mundo (Jones y Fresko, 2011)^[4].

Los circuitos de molienda que utilizan grandes equipos AG o SAG ofrecen múltiples beneficios, como por ejemplo, tener la capacidad de procesar mayores volúmenes de mineral, lo que dada la contingencia se transforma en un factor preferencial frente a la molienda convencional. Otro aspecto trascendental, comentado anteriormente, es que los molinos SAG están diseñados para procesar el producto del chancado primario. De esta manera las etapas habituales de chancado secundario y terciario son llevadas a cabo por este equipo, ahorrando los costos operacionales y de capital asociados a estas dos fases.

La experiencia muestra que una línea de molienda SAG requerirá un menor costo de capital que una línea de molienda convencional, en particular para molinos de gran capacidad. El costo de capital de un circuito de molienda SAG corresponde aproximadamente a un 85% del costo de capital de un circuito convencional, en el rango de capacidades de 50000 t/d.

La aplicación de la molienda SAG se ha concentrado preferentemente sobre los minerales de cobre. Debido a la dureza y a los grandes tonelajes demandados por las bajas leyes en los yacimientos de este metal, es preciso trabajar con equipos capaces de ajustarse a crecientes demandas productivas y a minerales de distinta dureza. La Figura 3 muestra la tendencia que han presentado los distintos metales hacia la utilización de molinos SAG/AG para su explotación, mediante la suma total de la potencia instalada para estos equipos en todo el mundo^[4].

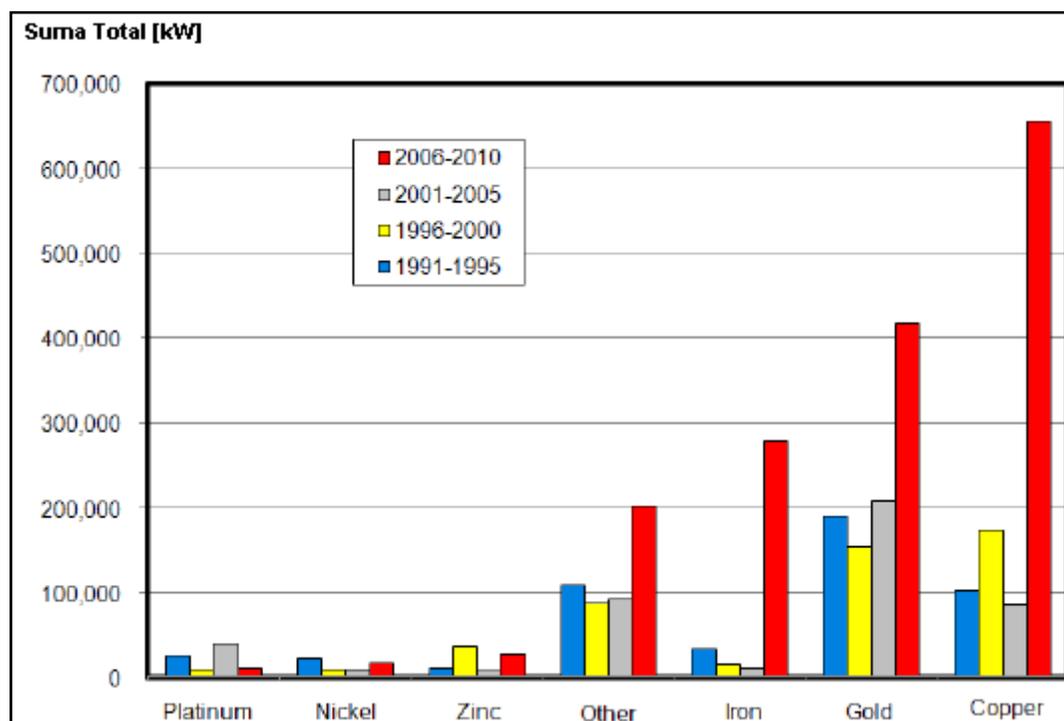


Figura 3. Potencia instalada en distintos períodos por tipo de mineral (Jones y Fresko, 2011)^[4].

El hecho de recurrir a menores porcentajes en los medios de molienda de bolas, conlleva a la utilización de colpas de mayor tamaño en la alimentación del molino SAG. El intercambio que se genera al remplazar las bolas de acero, con una densidad aproximada de $7,8 \text{ g/cm}^3$, por colpas de mineral, cuya densidad es de alrededor de $2,7 \text{ g/cm}^3$, conlleva a una disminución de la carga en los medios de molienda en alrededor de un 62%. Para mantener la misma carga y así no deteriorar el perfil de la conminución, se requiere de un incremento en el diámetro “ d ” de las colpas de mineral que remplazarán a las bolas de acero en su rol moledor, lo que queda evidenciado por medio de la siguiente ecuación:

$$m = \alpha_v * \rho_s * d^3 \quad (1)$$

La Ecuación 1 representa la masa, m (g), de una partícula de acuerdo a su diámetro, d (cm), su factor de forma en volumen, α_v , y su densidad, ρ_s (g/cm^3).

De esta manera gran parte de la energía se pierde por la interacción entre las colpas y el movimiento giratorio de las mismas. Ello conlleva a que el consumo energético de los molinos SAG sea exagerado y se incremente cada vez más producto de las tendencias anteriormente comentadas (mayores tonelajes de alimentación).

2.2.3. Molinos SAG

Los molinos SAG son equipos de gran envergadura, con dimensiones de hasta 40 pies por 25 pies (diámetro por largo) y con potencias instaladas de hasta 28000 kW, capaces de tratar altos tonelajes de alimentación y diseñados, por lo general, con parrillas de descarga y un trommel en la salida, implemento diseñado para la pre-clasificación del mineral descargado. El mineral se recibe directamente desde la etapa de chancado primario (con un tamaño máximo que oscila por lo general en torno a las 8”) y se mezcla con agua y otro tipo de reactivos si así se desea (cal, por ejemplo). El material es reducido de tamaño por la acción conjunta del impacto generado por las mismas colpas de mineral, más las bolas de acero alimentadas al molino, las que poseen un tamaño aproximado entre 4” a 6”. Dado el tamaño y la forma del molino, las bolas de acero se precipitan en caída libre, generando un efecto conjunto de chancado y molienda más efectivo, con menor consumo de energía, ahorrando las etapas de chancado secundario o terciario que en el caso de la molienda convencional son requeridas.

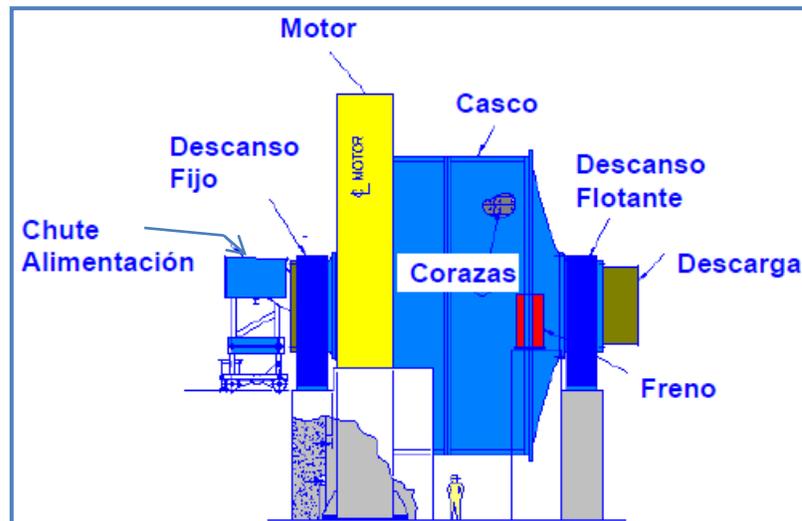


Figura 4. Componentes básicos de un molino SAG.

En la molienda SAG existe un problema característico, asociado a la formación de material indeseado dentro del proceso: los pebbles. El molino SAG genera en su interior una fracción de tamaño “crítico” de partículas, con una granulometría que se encuentra usualmente entre 1” y 3”, denominada pebbles. Esta fracción de mineral, que se produce por el astillamiento y la abrasión de colpas con tamaños superiores a las 3”, presenta una alta resistencia a la molienda, por lo que su conminución debe ser desarrollada de manera aislada en un chancador de Pebbles, usualmente de tipo “cónico de cabeza corta”, para así evitar la sobre carga del molino SAG con este material de tamaño crítico. Para el tratamiento de los pebbles, la descarga del molino SAG debe ser clasificada en dos o tres fracciones de tamaños, con la ayuda de harneros y/o el trommel de descarga.

Los molinos SAG suelen descargar el material molido a través de parrillas, las que cumplen el rol de una malla selectiva, previo a la salida del equipo, con el fin de acotar la granulometría del producto y así impedir el paso de colpas de mayor tamaño que no han sido molidas satisfactoriamente. La estructura del molino debe ser tal que permita el movimiento ascendente de los medios de molienda (colpas y bolas de acero), para que estos puedan caer sobre la carga de mineral que ingresa y así generar la conminución. La mecánica de fractura del molino SAG se caracteriza por dos sucesos: una fractura por impacto y otra por abrasión. La primera, de mucha mayor energía, es la encargada de conminuir las colpas de mayor tamaño, hasta un rango acotado o granulometría intermedia, mientras que la segunda es la que genera la población de partículas de menor tamaño o granulometría más fina.

Los mecanismos de fractura detallados se dan en distintas regiones del molino y la carga interna, según se aprecia en la Figura 5^[2].

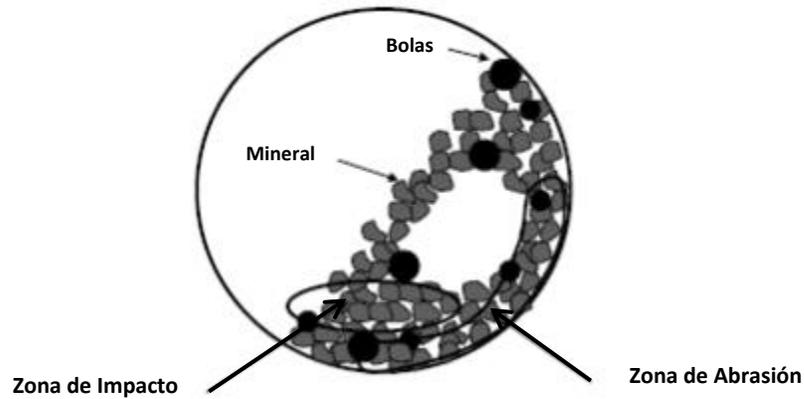


Figura 5. Sección transversal de un molino SAG; identificación de las zonas de fractura.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el movimiento de la carga es ascendente y se caracteriza por una acción de volteo. El giro del molino, que en la Figura 5 se encuentra en dirección contrarreloj, hace que la carga ascienda por el lado derecho, hasta alcanzar un punto de máxima altura, luego del cual desciende y vuelve a caer. Dependiendo de la velocidad de giro a la que opera el molino, la disposición de las bolas y la estructura interna del equipo, la caída del mineral se puede dar por desmoronamiento sobre la carga o bien por caída libre. Usualmente se les denomina, a estas dos formas de caída, movimiento de “cascada” y de “catarata”, respectivamente. Visto de lado, el sistema completo de la carga interna adquiere una forma similar a la de un riñón (ver Figura 6), en cuyo extremo inferior izquierdo puede identificarse una zona de movimiento caótico denominada “pie de la carga”, donde se disipa la energía restante de la caída para que la carga nuevamente ascienda.

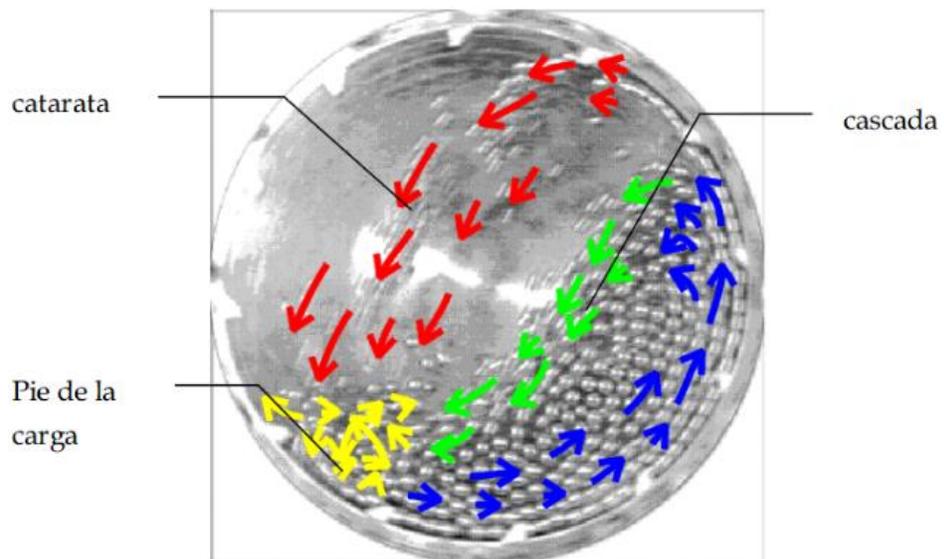


Figura 6. Patrones de movimiento de la carga, en un tambor rotatorio horizontal.

Para que la carga pueda ascender de manera eficiente y no resbale en los contornos del molino, es esencial que éste cuente en su revestimiento interno con relieves o accesorios que faciliten el ascenso del material. Estos resaltes o relieves que se adicionan a los revestimientos internos del molino se denominan “lifters” o levantadores. Los principales parámetros que caracterizan a los lifters y que influyen en el movimiento de la carga, corresponden a su altura y ángulo de ataque^[2]. El ángulo de ataque se mide entre la cara frontal de los mismos y la base de la carcasa, como se indica en la siguiente figura:



Figura 7. Bosquejo de los lifters de un molino SAG, indicando su ángulo de ataque “θ”.

Otro factor esencial en la trayectoria y el movimiento de la carga, corresponde a la velocidad de operación del molino SAG. Cada molino está caracterizado por su propia velocidad crítica, la que determina la condición de equilibrio de las partículas al interior y hace que la carga se centrifugue. Esto se obtiene al igualar las fuerzas centrífuga y gravitacional de las partículas en el sistema. La velocidad crítica, N_c (rpm), dependerá de las dimensiones del molino, según la siguiente ecuación, donde D (m) corresponde al diámetro del equipo y ω_c (1/s) a su velocidad angular crítica.

$$N_c = \frac{\omega_c}{2 * \pi} = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (2)$$

Es usualmente utilizado en la práctica el término “Porcentaje de velocidad crítica”, $N/N_c(\%)$, para caracterizar la velocidad a la que opera un determinado molino. Esta velocidad influye fuertemente en el tipo de movimiento que tendrá la carga (catarata o cascada), puesto que de acuerdo al balance de fuerzas podrá ascender de manera preferente para caer e impactar tal como se desea o bien, si se sobrepasa un determinado límite en la velocidad, esta puede seguir la trayectoria del molino, sin resbalar ni tampoco descender de los revestimientos internos, adicionándose a estos de manera permanente y estática (carga centrifugándose).

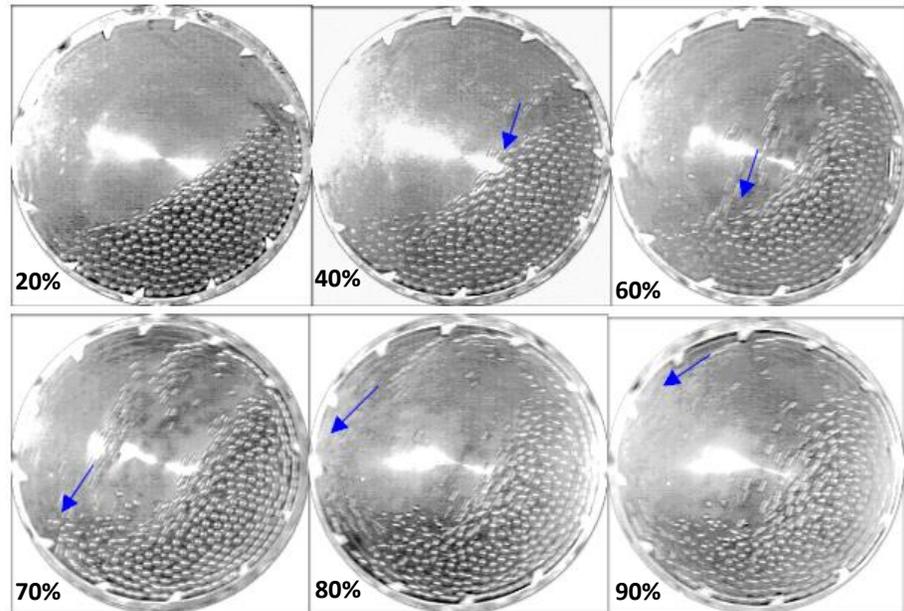


Figura 8. Efecto de la velocidad en el movimiento de la carga, a distintos porcentajes de velocidad crítica.

En la Figura 8 se puede apreciar la evolución en el movimiento de la carga de acuerdo a los distintos niveles del porcentaje de la velocidad crítica a la que se opera (esquina inferior izquierda de cada recuadro), considerando un ángulo de ataque de los lifters del 90% para cada caso^[2]. De acuerdo a ello se puede observar lo siguiente:

1. El movimiento de la carga al cual se da su desmoronamiento, corresponde a un bajo nivel del porcentaje de velocidad crítica (40% aproximadamente), en cuyo caso el ángulo de ataque de los lifters no tiene mayor incidencia dentro del perfil de movimiento del sistema interno.
2. A medida que se incrementa la velocidad de operación, las bolas que están en contacto con los revestimientos y levantadores del equipo, son proyectadas hacia arriba, descendiendo posteriormente en caída libre y generando el impacto y trayectorias deseadas. El más representativo de los recuadros corresponde al que se opera a un 70% de N_c , siendo éste un valor cercano al utilizado habitualmente en la industria.
3. Si la velocidad es suficientemente alta, la trayectoria de las bolas sigue el movimiento giratorio del molino de manera extrema, haciendo que la caída libre se dé en los revestimientos del molino y no en el “pie”, que es donde se encuentra la carga. Lo anterior se puede observar en el recuadro en el que se opera a un 90% de N_c .

2.2.4. Configuraciones de Molienda SAG

Las configuraciones de molienda SAG más comunes corresponden a las siguientes:

- **SAG:** circuito con molino SemiAutógeno, Figura 9, (a).
- **SAC:** circuito con molino SAG y un chancador de pebbles, Figura 9, (b).
- **DSAG:** circuito formado por un molino SAG, seguido de un circuito secundario de molinos de bolas con recirculación directa de pebbles al molino SAG, Figura 10, (a).
- **SABC-A:** circuito constituido por un molino SAG, seguido de un circuito secundario de molinos de bolas, con chancado de pebbles recirculados al molino SAG, Figura 10, (b).
- **SABC-B:** circuito con la misma configuración del SABC-A, sólo que acá los pebbles chancados son enviados a la alimentación del molino de bolas secundario, Figura 11.

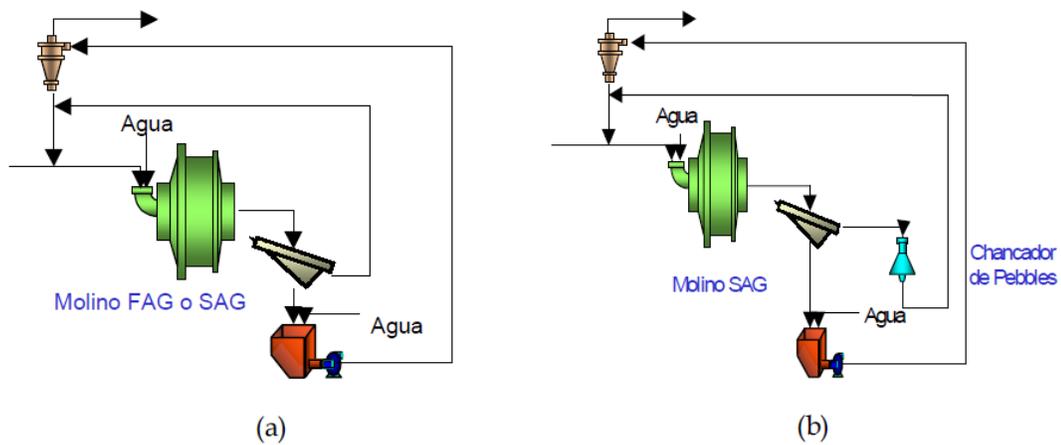


Figura 9. Circuitos de molienda SAG (a) y SAC (b)^[2].

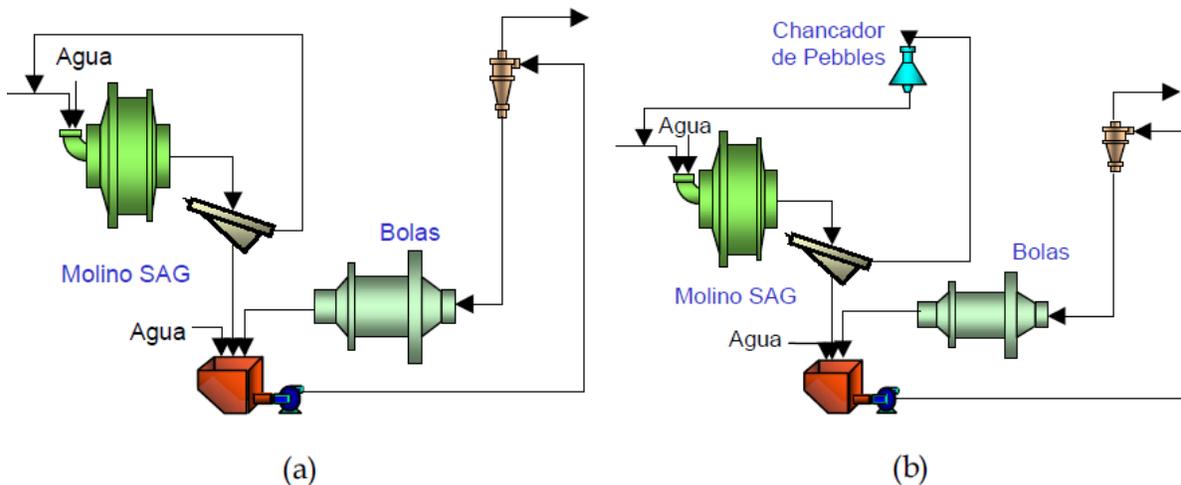


Figura 10. Circuitos de molienda DSAG (a) y SABC-A (b)^[2].

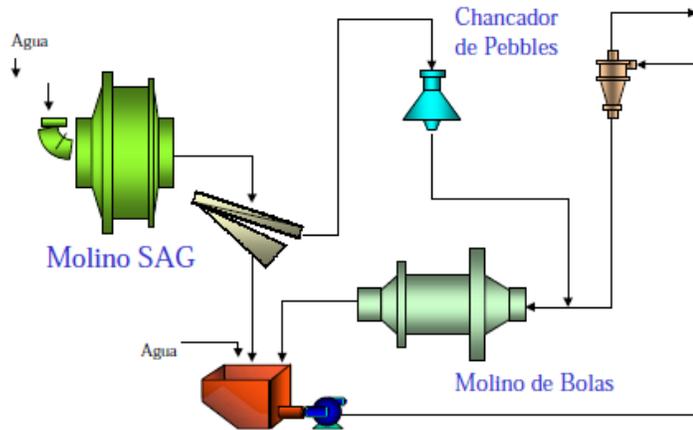


Figura 11. Configuración de molienda SAG tipo SABC-B^[2].

2.2.5. Consumo de potencia del molino SAG

El perfil energético del molino SAG queda determinado por el consumo de potencia del equipo. En dicho consumo de potencia influirán de manera trascendental el torque desarrollado por el sistema interno completo (mineral, agua y medios de molienda) y la velocidad de rotación del equipo. A partir de las consideraciones mecánicas del molino, es posible estimar de manera preliminar una forma para el consumo de potencia (Ecuación 3).

$$Potencia = Torque * Velocidad de Rotación = \tau * N \quad (3)$$

En base a lo anterior es posible dar con distintos modelos que estiman la potencia consumida por el molino SAG en base a sus dimensiones y otras variables que influyen en la carga interna que alcanza el molino, entre estas, la fracción de llenado total del equipo. A continuación se presentan dos modelos distintos, para estimar el consumo de potencia del molino SAG.

Modelo N°1 de Potencia consumida por el molino SAG, Pc SAG (kW):

$$Pc \text{ SAG} = 10,6 * (D^{2,5} * L) * J * (1 - 1,03 * J) * \frac{N}{Nc} * \rho_{apc} * \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10*\frac{N}{Nc})}}\right) \quad (4)$$

Modelo N°2 de Potencia consumida por el molino SAG, Pc SAG (kW):

$$Pc \text{ SAG} = 2,208 * (D^{2,5} * L) * \rho_{apc} * \frac{N}{Nc} \quad (5)$$

Donde:

D: diámetro del molino (sin considerar revestimientos internos), (m)

L: largo efectivo del molino (sin considerar revestimientos internos), (m)

N/N_c: fracción de la velocidad crítica a la que opera el molino, (fracción)

ρ_{apc} : densidad de la carga interna del molino (agua, mineral y bolas de acero), (t/m³)

J: fracción de llenado total del molino, (fracción)

La densidad de la carga interna del molino, corresponde a una ponderación entre la masa de acero de las bolas, la masa de mineral y la masa de agua que se haya en su interior, de acuerdo al volumen efectivo ocupado por cada uno de estos componentes. Una expresión que representa dicha densidad, es la que se da a conocer a continuación:

$$\rho_{apc} = \frac{Jb * \rho_a * (1 - \varepsilon) + Jc * \rho_c * (1 - \varepsilon) + J * \varepsilon * \rho_p}{J} \quad (6)$$

Donde:

J_b: fracción de llenado con bolas de acero en el molino SAG, (fracción).

J_c: fracción de llenado con colpas de mineral en el molino SAG, (fracción).

J: fracción de llenado total del molino SAG (J_b+J_c), (fracción)

ε : porosidad de las colpas de mineral y las bolas de acero, asumiendo que son iguales, (fracción)

ρ_a : densidad de las bolas de acero utilizadas, (t/m³)

ρ_p : densidad de la pulpa alimentada al molino SAG, (t/m³)

ρ_c : densidad de las colpas de mineral alimentadas al molino SAG, (t/m³)

A pesar de las diferencias en forma de las dos ecuaciones anteriores, tanto en la primera (Ecuación de Bond adaptada por Austin et al)^[5], como en la segunda (Ecuación adaptada de la Universidad de Utah, EEUU)^[11] es posible evidenciar que el factor en el que se hallan las dimensiones del molino SAG, correspondiente a “ $D^{2.5} * L$ ”, se mantiene constante. Lo anterior proviene de una ponderación entre el volumen del molino y su velocidad crítica; es debido a ello que este factor se repite de la misma forma dentro de todos los modelos de potencia consumida existentes, pues las consideraciones mecánicas son las mismas.

Las variables que se observan en las dos ecuaciones presentadas anteriormente y en todas las existentes para la estimación de la potencia consumida por el molino SAG, son siempre las mismas, lo único que cambia es el orden y la forma de los miembros, además de la presencia de constantes de distinta magnitud, debido a las consideraciones para el desarrollo del modelo en cada caso. De acuerdo a estas formas y las evidenciadas en todos los modelos actuales, no es posible encontrar parámetros o variables vinculadas a características exclusivas del mineral, como por ejemplo su granulometría o su dureza. Aquello sin duda alguna adiciona a estos modelos un grado considerable de incertidumbre, respecto a lo cual su uso como herramienta predictiva se ve acotado considerablemente.

Si bien el uso de estos modelos se encuentra orientado principalmente al dimensionamiento de molinos SAG, aun el hecho de considerarlos para este ámbito hace que la incertidumbre asociada a no tomar en cuenta características del mineral, como por ejemplo la granulometría, se transmita de alguna manera hacia las dimensiones del futuro molino a utilizar. Se vuelve interesante proponer, respecto a estos modelos, alguna modificación que sí considere características tales como la granulometría de alimentación en el mineral, respecto de la cual los estudios actuales avalan su amplia influencia en el perfil energético/productivo del molino SAG. Con ello sería posible consolidar una herramienta mucho más eficaz, no sólo para el dimensionamiento de equipos (molinos SAG) si no que además para la estimación de la potencia consumida por los mismos.

2.3. Análisis Bibliográfico de la SAG Conference 2011

En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica desarrollada sobre los trabajos de investigación expuestos en la “SAG Conference 2011”. En este congreso, desarrollado en la ciudad de Vancouver, Canadá, se reúnen especialistas de todo el mundo para dar a conocer investigaciones desarrolladas principalmente en torno a la molienda SAG, pero también respecto a otras tecnologías y temáticas vinculadas al área de la conminución. Además es la instancia para discutir respecto a tecnologías alternativas, como la constituye actualmente la molienda con Rodillos a Alta Presión o HPGR (High Pressure Grinding Rolls), tecnología ampliamente analizada durante este congreso.

La molienda con rodillos a alta presión (HPGR) se muestra cada vez como una alternativa más atractiva frente a lo que constituye la molienda SAG, en vista de dos factores principales:

1. La dureza del mineral, que cuando incrementa de manera inesperada (variabilidad del mineral) repercute de manera negativa en el rendimiento de los equipos y por ende en el del circuito de molienda global.
2. Los altos costos operacionales asociados al consumo energético de la molienda SAG.

La idea de esta parte del Capítulo 2 es generar una antesala al trabajo que se busca desarrollar en esta memoria. La revisión de la información constituida por todas las publicaciones de la “SAG Conference 2011”, se encuentra focalizada en la identificación de los parámetros más importantes que afectan en el funcionamiento de los circuitos de molienda SAG. Además y con igual grado de importancia se busca caracterizar, a partir de esta misma fuente, de qué forma se correlacionan los distintos parámetros seleccionados, con el fin de obtener un preámbulo de lo que se desea estudiar, qué es lo que probablemente debería encontrarse (tendencias) y cuáles son los parámetros que se deberían correlacionar de manera preferente.

2.3.1. Granulometría

Es sabido que la granulometría influye fuertemente en el rendimiento de cualquier circuito de molienda. La variabilidad en ésta puede generar problemas en el funcionamiento regular del circuito, así como también influenciar mejoras y optimizar de manera considerable los distintos procesos involucrados en la molienda.

Una granulometría del chancado primario más gruesa que la esperada, suele ocasionar problemas en la capacidad de tratamiento del molino SAG y entonces en la del circuito completo. Es a partir de este hecho que, por ejemplo, conociendo cómo se comporta la capacidad de tratamiento del circuito de molienda en torno a la granulometría de su alimentación fresca, se puede determinar el valor óptimo de ésta con tal de cumplir con las demandas productivas para la planta de procesamiento. Esto claramente requerirá de medidas adicionales y por lo tanto mayores costos operacionales y de capital.

Por ejemplo, si se trata de la granulometría del Stockpile (Pila o Stock que reserva el producto del chancado primario), con el fin de reducirla, previo a su ingreso en la planta de molienda SAG, lo más probable es que se deba implementar una etapa posterior de pre-chancado, la que repercute con costos operacionales y de capital adicionales (costo de adquisición del chancador y las correas, consumo energético de ambos, etc).

De acuerdo a lo comentado en el párrafo anterior Maleki-Moghaddam, Yahyaei y Basini (Maleki-Moghaddam, Yahyaei y Banisi, 2011)^[6] estudiaron la relación entre las variables “tonelaje alimentado a la planta” y “granulometría de alimentación al molino SAG”, con el fin de evidenciar alguna correlación. La única variante que influye y no menormente para este caso de estudio, corresponde a las condiciones en que se desarrolla la molienda para la faena analizada: la mina de hierro Gol-E-Gohar, ubicada en Irán, desarrolla una molienda en seco, lo que constituye un hecho sumamente anormal en comparación a la práctica habitual, caracterizada por una molienda en húmedo.

Se sabe que para la molienda en seco, el consumo de energía se incrementa en alrededor de un 30% en comparación a la molienda en húmedo, producto de que la fractura del mineral en condiciones húmedas es mucho mejor que en condiciones secas. Más allá de esta diferencia, el comportamiento del circuito y de sus variables no debería distanciarse por mucho de la molienda SAG convencional.

Para la mina Gol-E-Gohar se desarrollaron nubes de dispersión relacionando la granulometría del producto del molino SAG, caracterizada por el P_{80} , con la potencia consumida por el mismo equipo. La relación que se pudo encontrar se presenta en el gráfico de la Figura 12.

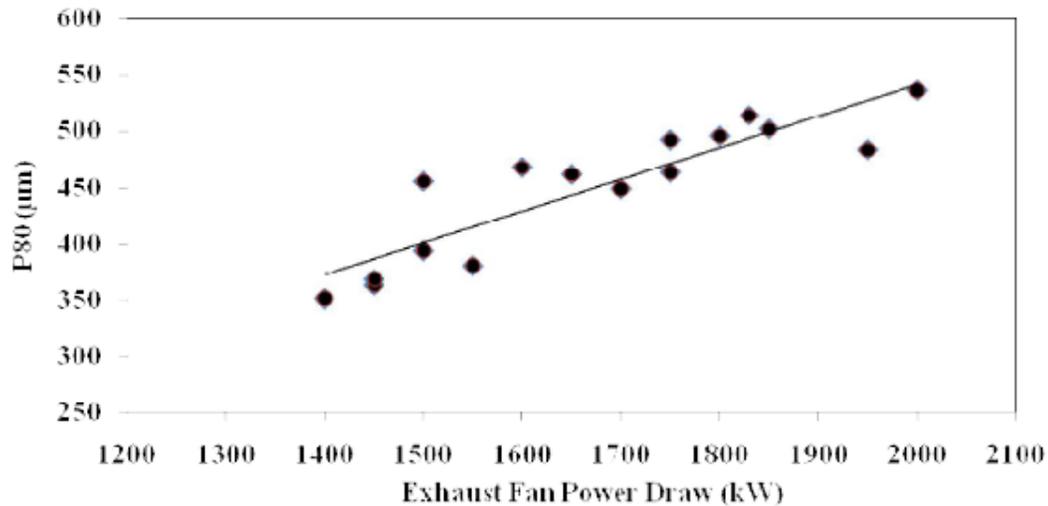


Figura 12. P_{80} del molino SAG N°2 de la planta en función de su consumo de potencia.

Se puede apreciar la fuerte relación que existe entre la granulometría del producto del molino SAG con el incremento en el consumo de potencia por parte del mismo. A partir de la tendencia evidenciada en la figura anterior, fue posible encontrar una relación lineal entre estos dos parámetros, la que se utilizó para estimar el consumo de potencia requerido con tal de alcanzar la granulometría del producto demandada para el circuito. Esta relación se representa por medio de la Ecuación 7:

$$P_{80} = 0.2818 * P_{Ex} - 22.08 \quad (7)$$

A partir de las demandas granulométricas del producto en la salida del molino SAG y la ecuación propuesta, se podría determinar cuál es la potencia requerida por parte del equipo para cumplir con dichas exigencias. A pesar de esta tendencia, el comportamiento evidenciado en la Figura 12 constituye una consecuencia de otro hecho: al trabajar el molino a potencias mayores, la cantidad de material que sale del mismo se incrementa. Paralelo a este hecho, cuando el volumen de partículas que abandona el molino aumenta, también lo hace su tasa de alimentación con el fin de mantener la potencia a un mismo valor fijado por la operación.

De esta manera se incrementa la cantidad de mineral que abandona el molino a medida que la potencia del mismo adquiere valores mayores, haciendo que la tasa de alimentación se incremente de manera paralela. Por otra parte, dado que las propiedades de ruptura se mantienen constantes, el hecho de abandonar el molino en un tiempo menor al requerido para la molienda del mineral, hace que las partículas no alcancen la granulometría requerida, adquiriendo en su salida un perfil más grueso al esperado.

De manera análoga a lo anterior, en este estudio se procedió a relacionar la granulometría del producto del molino SAG (P_{80}) con la alimentación fresca al circuito en t/h. Los puntos asemejan una recta por medio de la cual es posible construir una relación lineal, similar a la de la Ecuación 7:

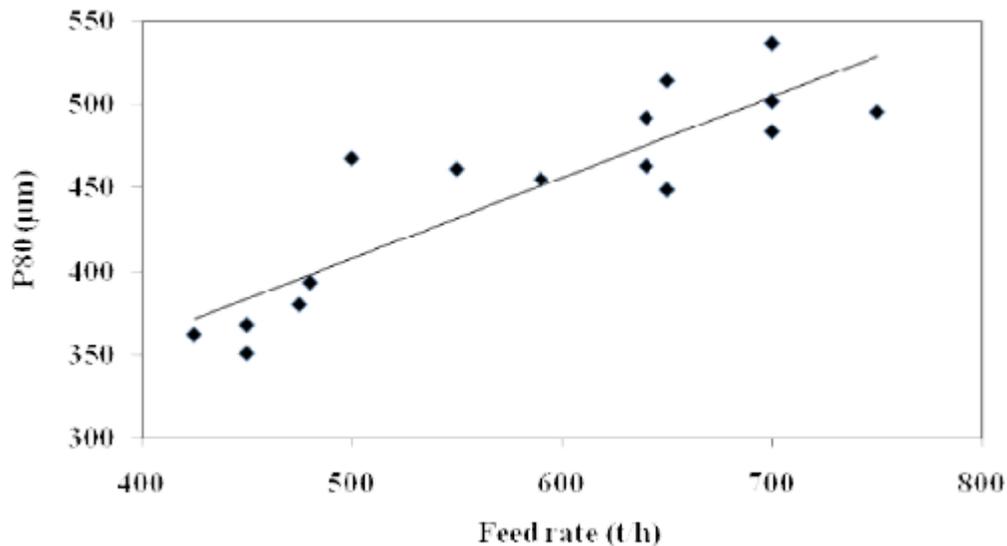


Figura 13. Granulometría del producto del molino SAG en función de su tonelaje de alimentación.

La ecuación que describe este comportamiento, donde F corresponde a la tasa de alimentación, queda expresada de la siguiente forma:

$$P_{80} = 0.4827 * F + 166.57 \quad (8)$$

Para este caso en particular, la granulometría del producto exigida a la planta era de 450 μm , lo cual demandó una potencia, a partir del modelo construido, situada entre 1650 y 1750 kW. Por otra parte, la tasa de alimentación que se ajustó a estas condiciones operacionales fue de 580 t/h, constituyendo la capacidad de tratamiento fijada para la planta.

Para las dos regresiones desarrolladas, la granulometría está representada por medio del P_{80} del molino SAG y se vincula tanto con el tonelaje de alimentación como con el consumo de potencia del mismo equipo. Se identifica de esta manera el uso de 3 parámetros fundamentales para las correlaciones desarrolladas: tonelaje, granulometría del producto y potencia consumida.

Así como el P_{80} del molino SAG es un parámetro de control trascendental dentro del circuito de molienda, existe también otro índice que influye de fuertemente en la operación. Este índice corresponde al T_{80} y se define como el tamaño de transferencia. Corresponde, en las configuraciones de molienda SAG, a la granulometría de alimentación al circuito de molienda de bolas. A modo de ejemplo, en el caso de una configuración tipo SABC-A, la granulometría en la descarga del harnero del molino SAG, correspondería a la alimentación de lo que constituye el circuito de molienda secundario o de bolas (circuito cerrado inverso).

Este flujo de mineral tendrá una granulometría asociada que se caracteriza con el T_{80} (tamaño de transferencia), correspondiente al tamaño bajo al cual se halla el 80% de las partículas del mismo flujo.

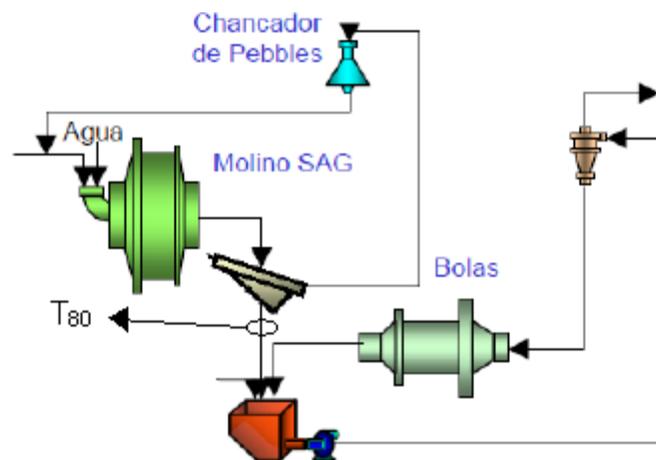


Figura 14. Circuito de molienda SAG, SABC-A, con la caracterización del T_{80} para este caso.

Suele ser un parámetro de gran importancia, ya que es el que determina el reparto de la carga de trabajo entre el molino SAG y el o los molinos de Bolas. En el caso de una operación dada, si el T_{80} se hace más grueso, a un mismo tonelaje de alimentación, el molino SAG se encontraría desarrollando una molienda menos eficiente, generando una granulometría más gruesa en el producto, por lo que los requerimientos de potencia del equipo deberían estar disminuyendo. Sin embargo, al traspasar mayor cantidad de gruesos al producto que recibe el molino de bolas, éste último necesariamente debe desarrollar una labor más compleja y por ende consumir una mayor cantidad de energía para consolidar la misma calidad granulométrica requerida en el producto final.

A partir de lo anterior, la demanda de potencia consumida por parte del molino de Bolas se incrementa en comparación a la operación en su estado original. Finalmente el consumo específico de energía del circuito se debería mantener más o menos constante, puesto que lo único que se obtuvo en el escenario anterior, fue un cambio en la distribución de la carga de trabajo entre los dos equipos principales.

Lo más importante de observar, es la posibilidad de manipular este parámetro, el T_{80} , con el fin de modificar las condiciones operacionales de los equipos de manera aislada y así desarrollar un control localizado de la operación de molienda.

Para modificar la granulometría del producto del molino SAG, es común incrementar el porcentaje de llenado con bolas, J_b (%), del mismo. Otra opción suele ser la implementación de bolas más pequeñas en el molino de Bolas, generando con ello una mayor área superficial disponible para la fractura de partículas. Ambas medidas fueron llevadas a cabo durante un estudio en la planta de Oro de la mina Kinross Paracatu (Santos Junior, Gomes, Gomides, Pignaton y Phillips, 2011)^[7] para evaluar el perfil operacional resultante.

La implementación de estas acciones, en el mediano y corto plazo, generó una disminución del T_{80} del molino SAG, lo cual permitió una reducción del consumo de potencia por parte del molino de bolas, tal como se había mencionado anteriormente. Estas medidas fueron llevadas a cabo a partir de enero del 2010, con un monitoreo de los distintos parámetros de la operación, en particular del T_{80} , cuya evolución en el tiempo se puede apreciar en la Figura 15.

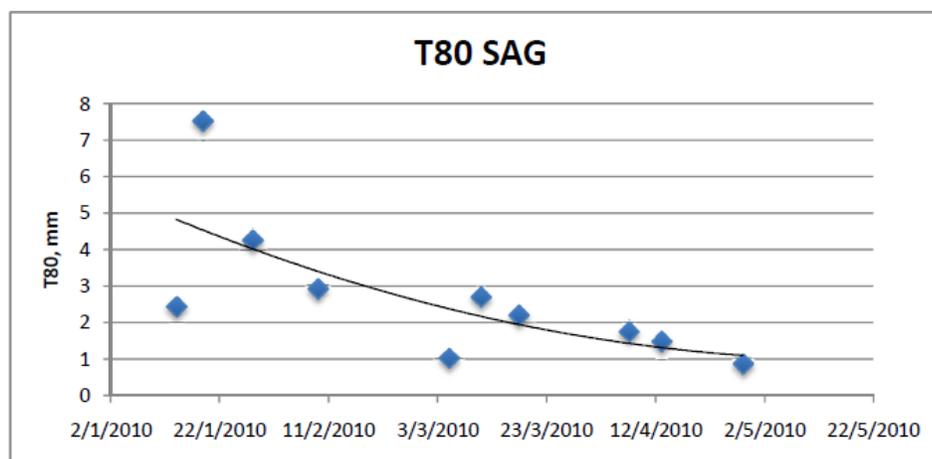


Figura 15. Reducción de la magnitud del T_{80} (mm) en el tiempo.

Con las medidas implementadas, la granulometría final del circuito de molienda de la planta disminuyó de 160 μm a 110 μm , generando un incremento de la recuperación metalúrgica durante el proceso de flotación posterior, de un 50 a un 70%.

Originalmente la planta se encontraba trabajando por debajo del tonelaje nominal, correspondiente a 5087 t/h, por lo que las medidas se encontraban orientadas en particular hacia la consolidación de un mayor rendimiento productivo.

Para afrontar problemas asociados a capacidades de tratamiento decreciente, existen medidas clásicas que rinden buenos resultados, entre las cuales se describen las siguientes dos (Royston, 2011)^[8] que también fueron desarrolladas en la planta de la mina Kinross Paracatu:

1. **Aumentar el tamaño de las bolas en el molino SAG:** el problema de esta medida es que no siempre suele ofrecer los resultados esperados, por cuanto existe una fracción de mineral de tamaño menor que es incapaz de molerse con bolas de mayor envergadura y que por ende repercute de manera negativa en la conminución.
2. **Incrementar la interacción mineral-bolas:** esto se puede llegar a concretar con un incremento en la velocidad de operación del molino SAG y/o aumentando la fracción de llenado con bolas dentro del mismo.

Las medidas indicadas anteriormente ayudaron a mejorar el rendimiento productivo del circuito, incrementando su capacidad de tratamiento desde 3200 t/h a 3912 t/h, es decir, en un 22,3%. Producto de los cambios desarrollados el consumo específico de energía del circuito de molienda, CEE (kWh/t), también experimentó una mejora sustancial, pasando inicialmente de 26 kWh/t a valores finales de 20,5 kWh/t, como se puede apreciar en la Figura 16.

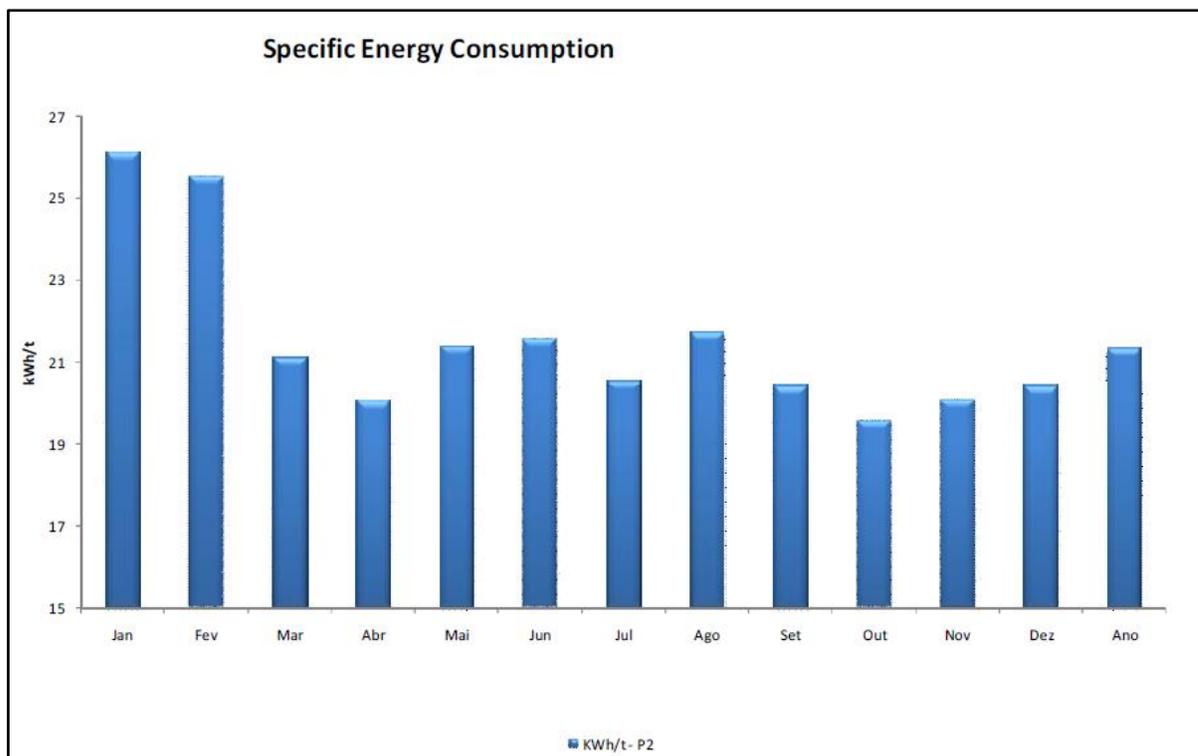


Figura 16. Consumo específico de energía (kWh/t) del circuito en el tiempo.

De esta manera, variables como el porcentaje de llenado con bolas del molino SAG, así como el tamaño de estos medios de molienda en los molinos de bolas, pueden influenciar mejoras tanto en las componentes del circuito de manera separada, así como en su perfil global de funcionamiento. El incremento en el nivel de llenado con bolas del molino SAG sugiere, frente a las mejoras obtenidas, un costo de capital y operacional superior al del escenario original, asociado a un mayor consumo de aceros de molienda.

Referido a lo anterior, a pesar de que muchas de las medidas sugeridas para la optimización de un circuito de molienda suelen dar resultados favorables, es necesario desarrollar un análisis costo/beneficio a la par con la implementación de cualquiera de éstas, sobre todo si involucran un costo de capital y/u operacional adicional, para saber si los beneficios que se están generando o que se proyectan, compensan los costos asociados.

Por ejemplo, respecto a lo comentado en el párrafo anterior, si se utiliza un nivel de llenado con bolas demasiado pequeño para el molino SAG, se puede comprometer negativamente la eficiencia de la molienda, mientras que niveles de llenado exagerados generan un producto indeseado y un consumo de acero y desgaste de los revestimientos mucho mayor (Yan Yang, Chao Yang y Liguó Tian, 2011)^[9].

En cuanto a la granulometría como parámetro de control, existen una serie de medidas que se pueden implementar en una planta para generar un determinado grado de manipulación sobre esta variable; una que está muy en boga en la optimización de líneas de molienda SAG corresponde al Pre-chancado.

Como es sabido, la particularidad de los circuitos de molienda SAG corresponde a la de evitar etapas de chancado secundario y terciario; sin embargo, con el paso del tiempo se ha observado como la variabilidad del mineral, en particular en la granulometría de alimentación al molino SAG, afecta de manera profunda el funcionamiento del equipo y del circuito. De esta forma el pre-chancado se presenta como una especie de chancado secundario selectivo, que busca disminuir la fracción de mineral alimentado al molino SAG, que se encuentra en el rango de tamaño crítico, entre 1” y 3” y que por ende presenta una velocidad de molienda mucho menor a la del resto del mineral.

Castillo y Bissue (Castillo y Bissue, 2011)^[10] realizaron un estudio en la mina de Cobre-Oro Phoenix, ubicada en el estado de Nevada (USA), con el objetivo de enfrentar la alta dureza del mineral, que estaba comprometiendo negativamente el rendimiento del circuito de molienda. El estudio se basó en muestras extraídas desde la misma planta en operación y simulaciones desarrolladas de manera paralela.

Las medidas tomadas sobre la planta correspondieron, en primera instancia, a un incremento en el nivel de llenado de bolas del molino SAG, una disminución en el nivel de llenado total del mismo, incrementos en la granulometría de alimentación al equipo y una mayor abertura en sus parrillas de descarga. Con las medidas implementadas, se pudieron observar pequeñas variaciones que en definitiva no aportaron con mejoras significativas al rendimiento del circuito.

Posteriormente el grupo de investigación concluyó que la granulometría de alimentación al molino SAG constituía un factor preponderante en la capacidad de tratamiento del equipo y del circuito de molienda global. De esta manera se desarrolló una campaña orientada al estudio de una etapa de pre-chancado como alternativa. A partir de esta implementación los resultados fueron considerablemente favorables, obteniéndose incrementos de hasta un 7% en la capacidad de tratamiento del circuito de molienda.

Lo anterior se puede ver reflejado a través del gráfico de la Figura 17, que representa el comportamiento del tonelaje en el tiempo, en particular a partir de la implementación del pre-chancado, durante Junio del 2010:

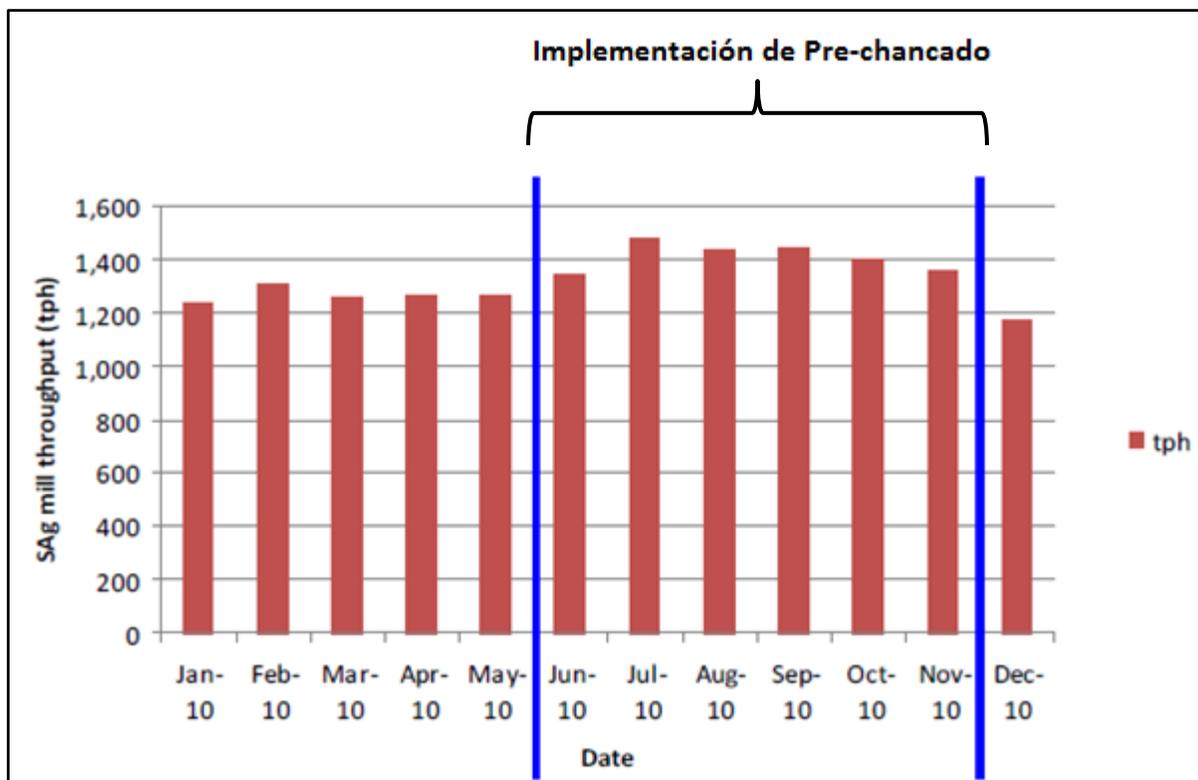


Figura 17. Variación del tonelaje de alimentación del molino SAG en el tiempo.

De esta manera la etapa de pre-chancado se muestra como una alternativa sumamente beneficiosa, que ayuda a mejorar el perfil granulométrico y por tanto el tonelaje alimentado al molino SAG. Por otra parte una etapa de pre-chancado genera una distribución de tamaños en la alimentación más uniforme y al mismo tiempo ayuda a reducir significativamente la segregación de tamaños asociada al Stockpile (Robichaud, Fournier, Sylvestre, Runnels y Allaire, 2011)^[11], lo que ofrece mejoras particularmente en el funcionamiento del molino SAG.

Si sólo se modifican variables operacionales localizadas en un equipo dentro del circuito de molienda, como por ejemplo el porcentaje de la velocidad crítica al que opera el molino SAG, N/N_c (%), es probable que la operación se lleve a cabo de manera más rápida y finalmente se pueda consolidar una mayor tasa de alimentación al molino, sin embargo, si ello no va acompañado de la implementación de un cambio externo que complementa esta acción (adición de mayor porcentaje de bolas al molino SAG o una etapa de pre-chancado, por ejemplo), seguramente la granulometría se verá perjudicada, haciéndose considerablemente más gruesa al del caso original, disminuyendo con ello la calidad del producto final y afectando negativamente en los procesos de concentración posteriores.

Dado lo anterior, se vuelve complejo implementar una política dirigida a la mejora de alguno de los aspectos de la planta (granulometría, tonelaje, potencia consumida, etc.) manteniendo la calidad requerida en el producto final, sin tener que incurrir en mayores costos operacionales o en una mayor inversión. Esto se encuentra íntimamente vinculado con la granulometría. Actualmente muchas plantas han tendido a focalizar sus preferencias hacia incrementos en el tonelaje, perdiendo cuidado en la calidad del producto final y entonces en las demandas granulométricas exigidas por los procesos de concentración posteriores.

Lo comentado en el párrafo anterior se puede corroborar a través de un estudio desarrollado a la planta de molienda de la mina subterránea Goldex, de la compañía Agnico-Eagle Mine (AEM) (Robichaud, Fournier, Sylvestre, Runnels y Allaire, 2011)^[11].

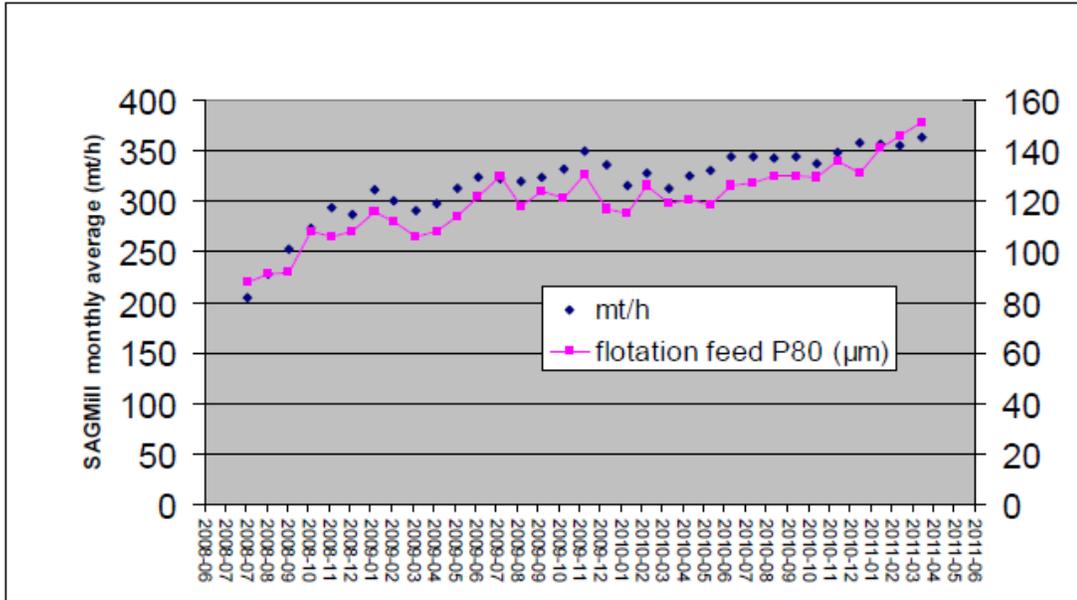


Figura 18. Tonelaje de alimentación al molino SAG y granulometría final del circuito en el tiempo.

Se puede observar, a partir de la Figura 18, cómo el tonelaje de alimentación (eje “Y”, izquierdo) se va incrementando en el tiempo, mientras la granulometría final (eje “Y”, derecho) del circuito de molienda, que en este caso corresponde a una configuración tipo D-SAG, se va deteriorando. A pesar de que este caso corresponde al de un mineral de Oro, la tendencia es la misma en prácticamente todas las plantas: si se mantienen las condiciones operacionales de manera tal de sólo incrementar el tonelaje de alimentación al molino SAG, entonces necesariamente la granulometría del producto final se verá deteriorada.

Si bien resulta conveniente manipular la granulometría alimentada al molino SAG con tal de hacerla más fina y así mejorar el perfil de funcionamiento del equipo, esto es algo que debe testearse según el caso correspondiente, tal como se describe a continuación.

Al igual que en los estudios anteriormente descritos, Machado, Mendonça, Fonseca y Rosa (2011)^[12] realizaron una comparación entre la granulometría y el tonelaje de alimentación al molino SAG, para una planta de oro-cobre. Se puede observar en la Figura 19 cómo, a medida que el F_{80} (granulometría del flujo de alimentación) del molino se reduce, la capacidad de tratamiento del equipo se va incrementando hasta alcanzar un punto máximo, luego del cual empieza a decrecer. Este límite se da a un F_{80} de 4”.

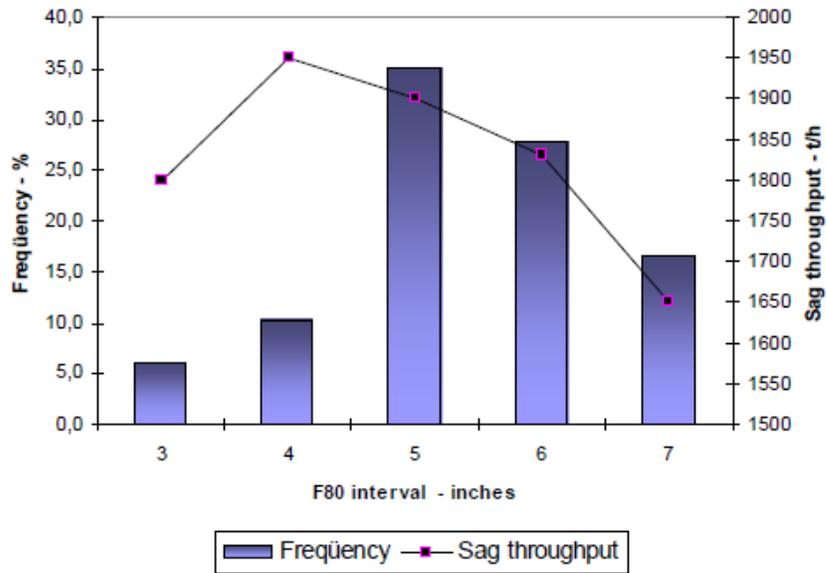


Figura 19. Tonelaje del molino SAG en función del P_{80} en la alimentación.

Si bien el gráfico de la Figura 19 corresponde a lo que ocurre en la práctica habitual de molienda, la gran peculiaridad en el caso de estudio se pudo evidenciar al graficar el porcentaje retenido en la fracción de tamaño crítico (entre 1” y 3”) de la alimentación al molino SAG, con el tonelaje procesado por el equipo, como se aprecia en la Figura 20.

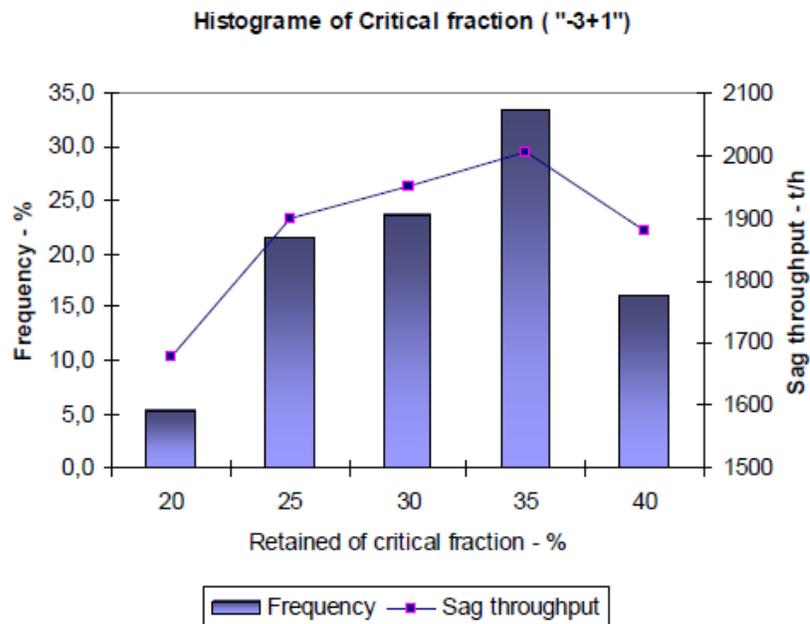


Figura 20. Tonelaje del molino SAG en función de la fracción retenida de tamaño crítico en la alimentación al molino SAG.

A partir del gráfico anterior se puede apreciar que los mayores tonelajes de tratamiento alcanzados por el molino se lograron cuando hubo una mayor fracción de tamaño crítico retenida en la alimentación al molino SAG. La explicación que se maneja para tan anormal comportamiento no es del todo clara y escapa a lo que ofrece la práctica habitual, ya que se sabe que este rango granulométrico es el que presenta la menor velocidad de fractura dentro del molino.

Quizá lo más importante de destacar a partir del estudio anterior, es cómo la tendencia común hacia la eliminación o la reducción de la fracción de tamaño crítico alimentada al molino SAG se ve fuertemente cuestionada. Lo anterior, a pesar de paradójico, se fundamenta en el hecho de que cada circuito de molienda se encuentra sometido a una variedad de condiciones operacionales que lo hacen ampliamente distinto de otro. A pesar de ser diferencias pequeñas, las características del mineral varían fuertemente dependiendo de las condiciones y el lugar del cual provengan, de manera que a pesar de que las tendencias demuestren que una medida suele ser eficaz, dicha eficacia dependerá fundamentalmente de las condiciones de la faena en particular, cuyo comportamiento puede escapar ampliamente de lo que la práctica comúnmente sugiere.

Es por esto que la implementación de una etapa de pre-chancado, como se observó anteriormente, suele ser una alternativa tentadora y eficiente, de acuerdo a la teoría y a los resultados prácticos obtenidos, sin embargo, es una idea que debe estudiarse rigurosamente, tanto por el costo y la inversión asociadas, como por la verdadera optimización que ofrece dicha alternativa para el circuito en donde se desee aplicar.

2.3.2. *Índices de conminución*

Para la caracterización del mineral respecto a su futuro procesamiento en el molino SAG, existen una amplia gama de pruebas metalúrgicas. El rol de estas pruebas es fundamental, ya que a partir de ellas será posible determinar la cantidad de potencia que requiere un determinado flujo de mineral para ser reducido de tamaño en el molino SAG. Si bien las metodologías y los índices obtenidos en cada una de estas pruebas son distintos, todas se encuentran orientadas a la determinación del consumo específico de energía del mineral en el molino SAG o como se denomina en este trabajo CEE.SAG (kWh/t).

El CEE.SAG (kWh/t) del mineral se utiliza como input para la determinación de las dimensiones del futuro molino SAG a instalar en una planta. Es por ello que la obtención de este índice es fundamental para el dimensionamiento del molino y cualquier cálculo errado de él podría llevar a un posible sub-dimensionamiento del circuito de molienda, generando con ello pérdidas económicas e incluso el cierre de una planta recién puesta en marcha.

En el caso del molino SAG, son varias las pruebas existentes orientadas a su dimensionamiento; entre estas las más importantes son las siguientes:

- **RBT:** JK Rotary Breakage Test
- **DWT:** JK Drop Weight Test
- **SPI:** Sag Power Index
- **SAGDesign Test**
- **SMC:** SAG Mill Conminution Test

Tal como se menciona anteriormente, cada una de estas pruebas está orientada al mismo objetivo, sin embargo, los resultados entregados son distintos en cada caso. Dentro de estas pruebas metalúrgicas las más importantes y de mayor uso actualmente corresponden al DWT, SPI y el SMC. El SMC, desarrollado por Steve Morrell (2004), corresponde a una variante del DWT que determina, al igual que este test, el producto “Axb”; además entrega un índice característico de esta prueba, correspondiente al Drop Weight Index (DWi). Dicho parámetro corresponde a un análogo al Work Index convencional para molienda de bolas, sólo que el DWI es aplicable estrictamente para el estudio de molinos SAG; además, sólo constituye una referencia para estimar el nivel de complejidad que tendrá la operación del molino SAG, frente a un determinado mineral.

Los datos generados por las pruebas SMC y DWT se adicionan como inputs en el simulador *JK SimMet*, para el cálculo de potencia requerida por el molino SAG. La diferencia sustancial entre el Sag Mill Conminution Test y el Drop Weight Test radica en que el primero se desarrolla bajo condiciones mucho menos estrictas y complejas que el segundo, resultando ser una prueba mucho más sencilla de llevar a cabo y por tanto económica.

Son muchas las minas que han adoptado al SMC para desarrollar la caracterización de su mineral, en vista de los buenos resultados que ofrece este test. El índice que ofrece esta prueba, correspondiente al DWi (kWh/m^3), es capaz de dar un indicio acerca de cómo variará el consumo específico de energía del circuito completo, sin embargo, no se ha demostrado que su relación con este último sea tan directa, por lo que su magnitud es sólo referencial.

Respecto a lo mencionado en el párrafo anterior, en la planta de oro de la mina Newmont Ghana Gold, se desarrolló un estudio en donde se vincularon el DWi (kWh/m^3) del mineral con el consumo específico de energía por parte del molino SAG (Dance, Mwansa, Valery, Amonoo, y Bisiaux, 2011)^[13], cuya gráfica se aprecia en la Figura 21.

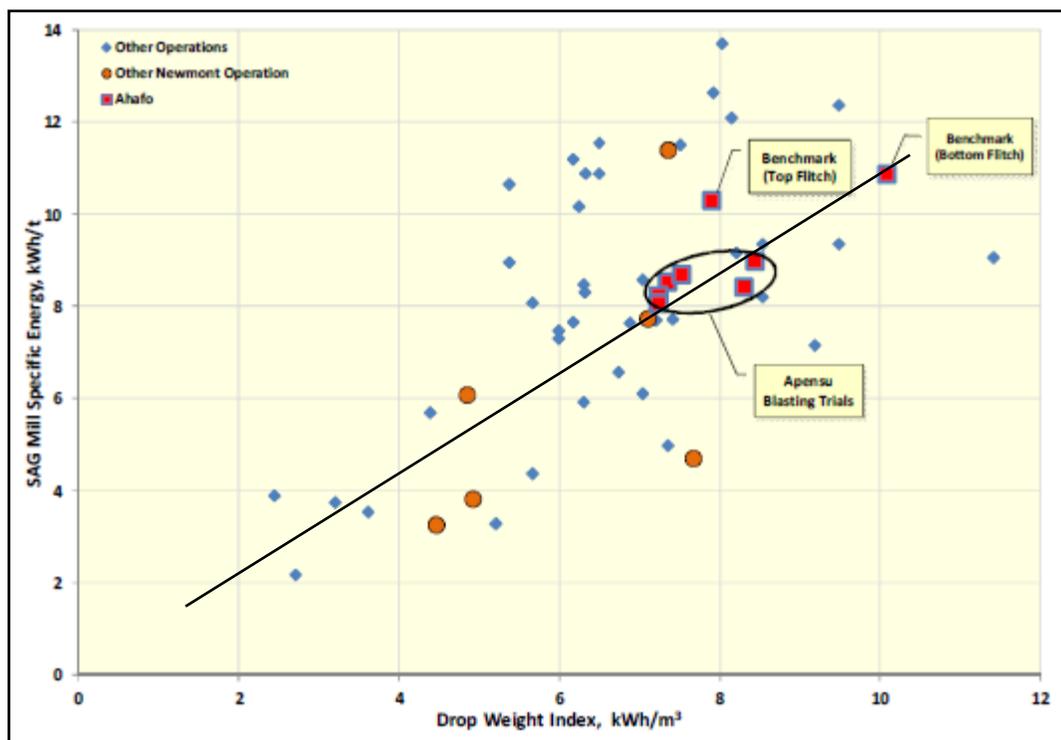


Figura 21. Consumo específico de energía del molino SAG en función del DWi (kWh/m^3).

Se puede apreciar cómo aumenta el consumo específico de energía del molino SAG, CEE.SAG, en la medida que el valor del DWi del mineral va adquiriendo valores superiores, lo que se desarrolla de manera casi lineal, sin embargo, asociado a este comportamiento se identifica además una alta dispersión de los datos, por lo que la linealidad no es completamente clara.

Un análisis más exhaustivo en torno a este índice fue el que desarrollaron Wirfiyata y McCaffery, quienes estudiaron la relación que existía entre el valor del DWi y la ley del mineral (Wirfiyata y McCaffery, 2011)^[14]. Dicho estudio estuvo enfocado en el desarrollo de un modelo predictivo para la capacidad de tratamiento de la mina de Cobre y oro, Batu Hijau, basado en la caracterización geometalúrgica del yacimiento.

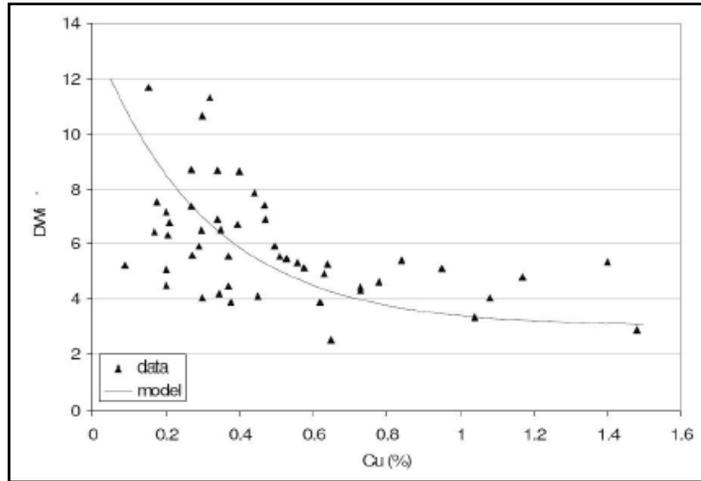


Figura 22. DWi (kWh/m³) del mineral en función de la ley de Cu en el yacimiento.

A partir del gráfico de la Figura 22, se pudo establecer un modelo que representa la tendencia de los puntos y al mismo tiempo la correlación entre estas dos variables de manera matemática (ver Ecuación 9).

$$DWi = 9 * \{1.33 - [1 - e^{3.26*(0.05 - Cu\%)}]\} \quad (9)$$

Según la tendencia que presenta el yacimiento y de acuerdo a pruebas desarrolladas sobre muestras representativas del mismo, la Ecuación 9 constituye un aporte de considerable importancia, por cuanto permite predecir el valor del DWi sin necesidad de depender de las pruebas de laboratorio. A pesar de esta contribución es necesario considerar que, de acuerdo a la alta dispersión observada en el gráfico de la Figura 21, la utilización de este parámetro no es del todo fidedigna y por ende induce a errores.

Finalmente se generó un modelo que permite estimar la capacidad de tratamiento del circuito, a partir de las características del mineral, entre estas, la que se desprende de la Ecuación 9 (DWi). De esta manera el modelo creado depende, de manera indirecta, de la ley media del yacimiento. La herramienta predictiva para el tonelaje (TPH) procesado por la planta de molienda, queda descrito por medio de la Ecuación 10, en donde RQD (Rock Quality Designation) corresponde a un índice que da cuenta de la calidad de la roca.

$$TPH = 0.916 * 22950 * RQD^{-0.131} * DWi^{-0.6} \quad (10)$$

Para observar la calidad del modelo propuesto (SMCC Model), se compararon los datos modelados por la Ecuación 10 con los obtenidos de la operación real, generándose el gráfico de la Figura 23. Se puede observar el comportamiento de la planta en sus condiciones reales (Actual), el comportamiento del modelo propuesto (SMCC Model) y por último el comportamiento establecido por un modelo creado por la empresa Metso, para la misma mina (Metso PTI Model).

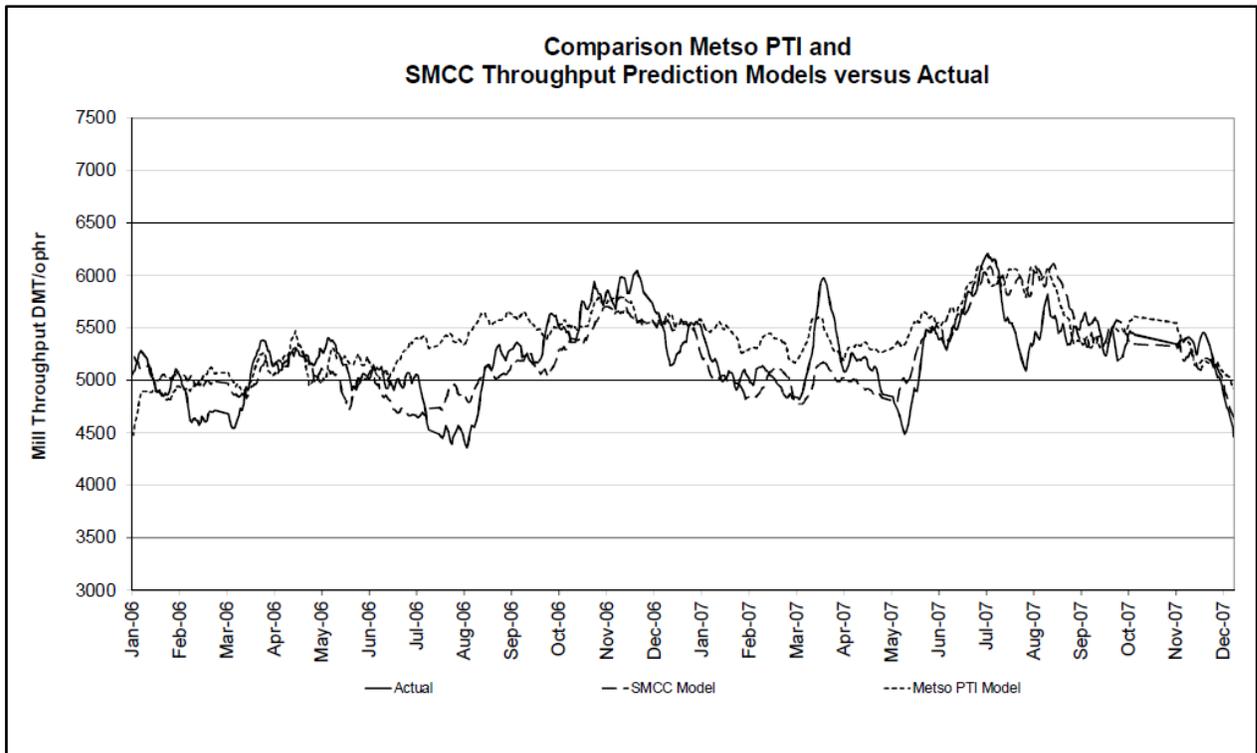


Figura 23. Comportamiento del modelo SMCC y PTI de Metso durante los años 2006 – 2007.

Adicionalmente en este estudio, se debió caracterizar al yacimiento en torno a otro parámetro, con el fin de establecer o definir en qué zonas era aplicable el modelo SMCC, descrito por la Ecuación 10. Para ello se desarrolló una correlación simple entre la dureza del mineral, caracterizada por el Ball Work Index (BWi), y la ley del mineral. A través del estudio de esta nueva tendencia, se pudo observar que el modelo SMCC no era representativo ni aplicable para todas las zonas del yacimiento en estudio.

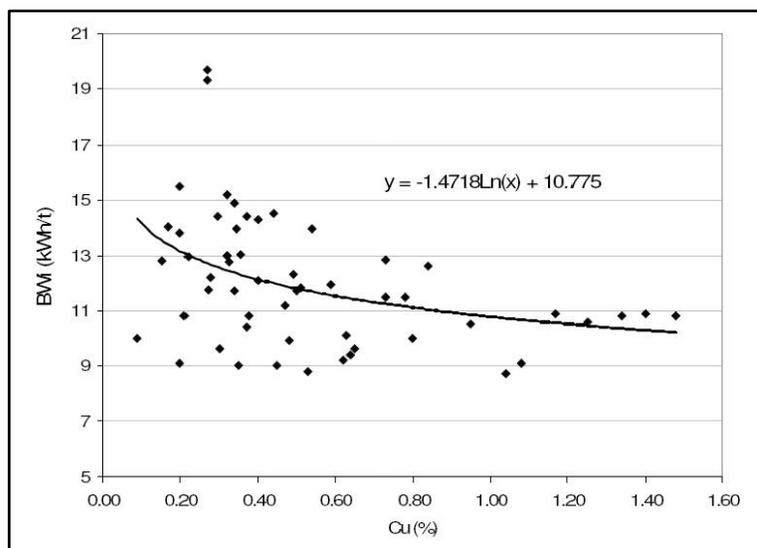


Figura 24. Correlación simple entre el Ball Work Index (BWi) y la ley de cobre del yacimiento.

A pesar de que el modelo presentado anteriormente (SMCC) se acomodó bien a las estadísticas de la mina durante los años correspondientes a su elaboración, un estudio más actualizado demostró que el comportamiento del mineral fue cambiando, haciendo que el modelo generado se ajustara de manera deficiente a los datos reales, tal como se puede apreciar en el gráfico de la Figura 25.

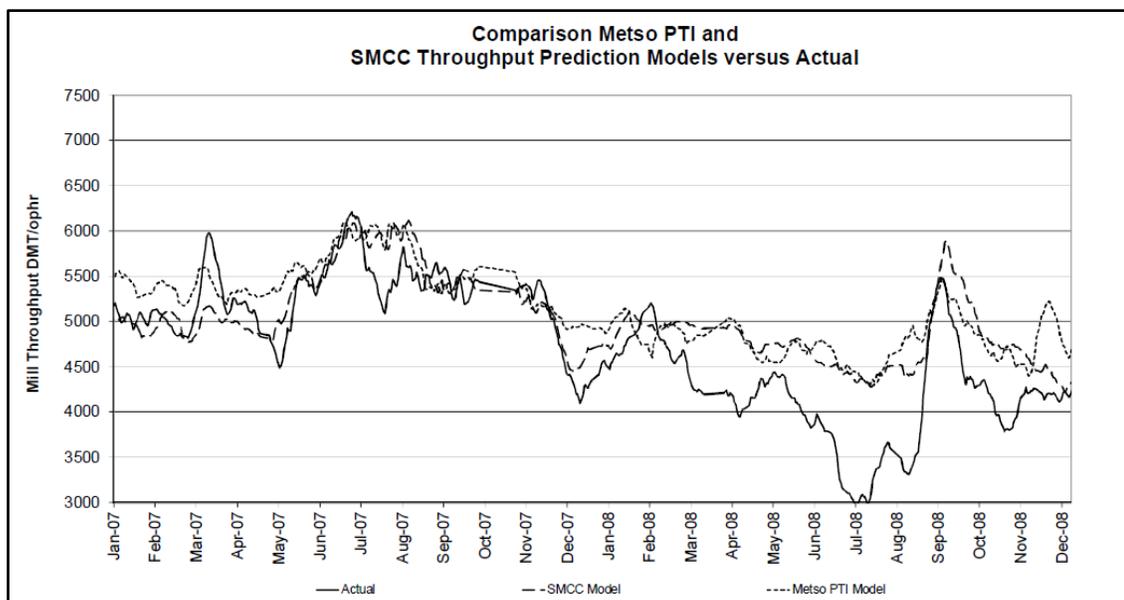


Figura 25. Comportamiento de los modelos SMCC y PTI de Metso durante los años 2007 – 2008.

A partir del comportamiento anterior se generó otro estudio enfocado en las propiedades del mineral, para evidenciar que características de éste son las que influyen un comportamiento distinto en el tonelaje de la Figura 25, en comparación al evidenciado en la Figura 23.

El análisis evidenció la existencia de un rango límite, entre un valor para el BWi de 12 y 13 kWh/t, en donde la capacidad de tratamiento de la planta dependía más fuertemente del BWi y entonces se veía influenciado de manera considerable por este parámetro.

Considerando lo anteriormente discutido, se generó el siguiente modelo predictivo para la capacidad de tratamiento de la planta, el que depende, para ciertos rangos, del BWi.

Si $BWi < 12.5 \text{ kWh/t}$

$$TPH = 0.916 * 22950 * RQD^{-0.131} * DWi^{-0.6}$$

Si $BWi \geq 12.5 \text{ kWh/t}$

$$TPH = 0.916 * 22950 * RQD^{-0.131} * DWi^{-0.6} * BWi^{-0.0323} \quad (11)$$

Con la corrección del BWi implementada al modelo, se pudo obtener una mejor representación de los datos reales y por ende una mejor capacidad predictiva, generándose una diferencia promedio, entre el valor arrojado por el nuevo modelo y el real, menor al 0,4%. La Figura 26 muestra la comparación final realizada entre los datos reales (Actual) y el modelo corregido (SMCC (WiBM)).

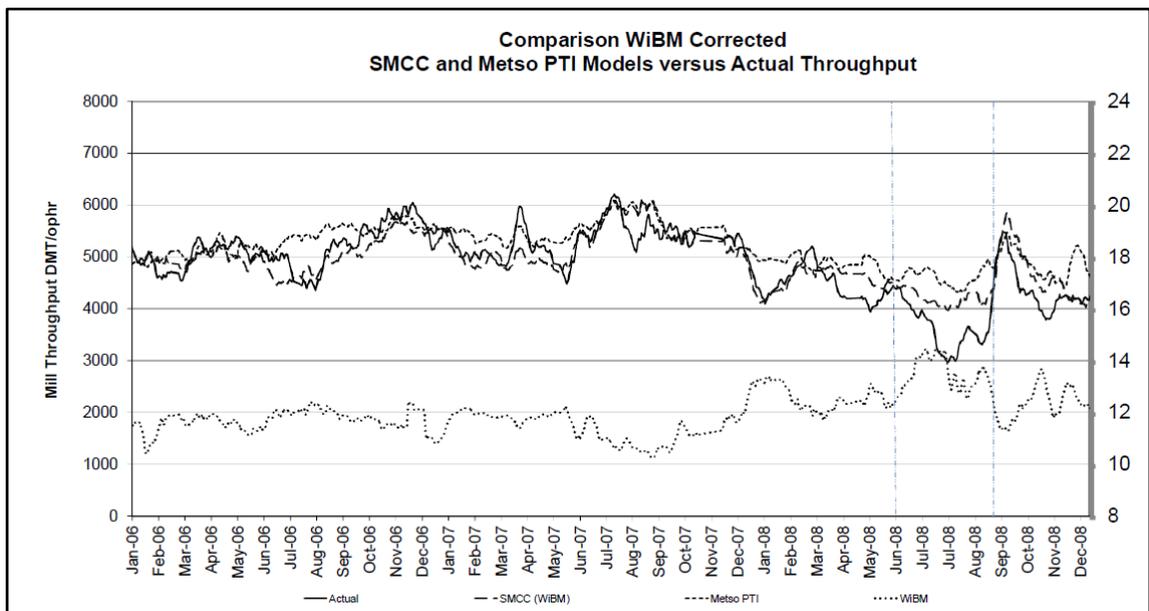


Figura 26. Comportamiento de los modelos SMCC corregido y PTI de Metso durante los años 2007 – 2008.

Se puede observar que el modelo creado depende principalmente del BWi y del DWi, pero este último se encuentra determinado, para este caso, por la ley de cobre en el yacimiento (Ecuación 9), de manera que el índice primordial del cual depende el modelo corresponde al Ball Work Index. Esto último es fundamental, considerando que este índice se determina a través de una prueba mucho más sencilla y económica de realizar que la requerida para el DWi.

El modelo presenta gran versatilidad al depender de una prueba de conminución sencilla para su uso, pero también ofrece la posibilidad de aplicar datos reales del DWi, en el caso de contar con estos, adicionando mayor confiabilidad a los resultados obtenidos. Claramente este modelo es aplicable sólo sobre la planta a partir de la cual fue creado, sin embargo, permite pensar que para un yacimiento que cuente con una buena caracterización geometalúrgica, es posible generar un modelo que represente el comportamiento de la planta con un alto grado de aceptación, en torno a índices como los utilizados anteriormente.

2.3.3. Identificación de problemas operacionales - Medidas Preventivas y Correctivas

Mientras mayor control se tenga sobre los parámetros operacionales de un circuito de molienda y mientras mayor número de estos se puedan controlar, la optimización de la planta se podrá consolidar de manera más exhaustiva. Cuando se requiere de un producto final fino en el circuito de molienda, con P_{80} iguales o incluso inferiores a $75 \mu\text{m}$, sobre todo en estaciones de molienda SAG de una sola etapa (FAG/SAG), los medios de molienda asumen un rol preponderante.

La escasés en los medios de molienda o un porcentaje de llenado con bolas en el molino que no sea el adecuado, repercute de manera negativa en la operación, incrementando la carga circulante del circuito y generando con ello problemas asociados a la formación de Pozos de Pulpa o “Slurry Pool” (Putland, Kock y Leigh, 2011)^[15]. Los “Slurry Pool” corresponden a pozos generados en la base del molino, debido que el agua asociada a la carga interna, se conserva en la parte más baja del equipo mientras éste rota, ya que por su condición (líquido) no es capaz de seguir el movimiento ascendente de los medios de molienda, escurriendo y generando pozos de agua en la zona de impacto del material.

En este mismo escenario, si el molino principal (AG o SAG) no fuera de motor de velocidad variable, los únicos parámetros operacionales capaces de ser modificados serían: la tasa de alimentación, el nivel de llenado del molino y la densidad de la carga interna en el mismo. En dichas circunstancias, tan pocas variables disponibles para controlar la operación, harían de la optimización del circuito una tarea muy compleja y arriesgada.

El poder controlar la velocidad de operación del molino AG/SAG, suele ofrecer mejoras frente a varias adversidades. Por ejemplo, en el caso de tener un nivel de llenado restringido para el molino, si se está generando sobre molienda por parte del mismo, se puede incrementar la velocidad de rotación para generar preferentemente la fractura del material más grueso. Por otra parte, la velocidad de operación del molino puede reducirse, para disminuir la fractura del material más grueso y así estabilizar la carga interna del equipo, cuando se tienen cargas circulantes demasiado altas al molino SAG/AG (Putland, Kock y Leigh, 2011)^[15].

En el caso de circuitos de molienda en una sola etapa (Single Stage), con chancado de pebbles, las parrillas de descarga suelen ser de aberturas menores a las que se utilizan convencionalmente, con valores aproximados de 50 mm, con lo cual se promueve la conservación de material más grueso en el interior del molino como medio de molienda. Junto con esto la medida del Setting o abertura de descarga de los chancadores de pebbles así como la abertura del harnero del producto del molino Semiautógeno, también suelen disminuir respecto a la operación SAG usual.

Respecto a las estaciones de molienda Single Stage, existen dos tipos de fracturas involucradas que deben ser controladas: la Fractura de Alta Energía o High Energy Breakage (HEB) y la Fractura de Baja Energía o Low Energy Breakage (LEB). La primera ayuda a controlar los niveles de llenado del molino AG/SAG mientras que la segunda ayuda a mantener la carga circulante y a consolidar la granulometría obtenida en el producto. Para incrementar la fractura por impacto en estas estaciones de molienda, se puede incrementar la velocidad de giro del molino. Si esto no es suficiente, manipular la granulometría de alimentación, la aplicación de un chancado de pebbles o simplemente una reducción en la tasa de alimentación al molino pueden presentarse como alternativas igualmente efectivas.

Respecto a la fractura de tipo Low Energy Breakage, es fundamental para generar la molienda del material más fino que se halla en la alimentación, por lo que una reducción en la participación de ésta en el molino, conlleva a incrementos de la carga circulante y de la granulometría en el producto final. Asociado a lo mismo, el registrar una disminución en la fractura de tipo LEB, responde principalmente a alguno de los siguientes hechos:

1. Chancado de pebbles excesivo.
2. Falta de colpas de gran tamaño en la alimentación.
3. Alimentación demasiado seca.
4. Levantamiento excesivo de la carga al interior del molino.

A continuación se da a conocer una tabla de medidas a adoptar frente a situaciones adversas experimentadas en estaciones de molienda SAG/AG de una sola etapa, tales como las mencionadas anteriormente.

Tabla 2. Escenarios operacionales para estaciones en una sola etapa (Single Stage) AG/SAG y medidas recomendadas.

Escenario				Medida a implementar
	Carga del Molino	Potencia Consumida	Carga Circulante	
1	↓	↓	↑	- Incrementar la carga del molino, disminuyendo su velocidad y haciendo más gruesa su alimentación. - Disminuyendo la tasa de pebbles recirculados.
2	↓	↓	↓	Incrementar la alimentación. Si la carga del molino no se recupera pero la carga circulante se incrementa dramáticamente, entonces se cae en el escenario (1)
3	↑	↑	↑	Disminuir el tonelaje de alimentación al molino
4	↑	↑	↓	Incrementar la velocidad operacional del molino o incrementar la recirculación de pebbles
5	↑	↓	↓	Incrementar la cantidad de agua adicionada al molino.
6	↓	↑	↑	Disminuir la cantidad de agua adicionada al molino.

Según Putland, Kock y Leigh^[15], si la carga circulante del circuito aumenta, entonces también lo hará la densidad de la pulpa alimentada a hidrociclones y con ello la granulometría en el Overflow de los mismos. Por otra parte, si la carga circulante decrece, de la misma manera lo hace la densidad de la alimentación a hidrociclones y la granulometría del producto obtenido de los mismos. Es posible observar lo influyente que se puede volver la carga circulante dentro del circuito, en particular para los de una sola etapa de molienda, tanto para la granulometría obtenida como para el rendimiento productivo, debido a lo cual se recomienda tener un control constante sobre esta variable durante la operación.

Tal como se menciona anteriormente, un problema bastante común en la molienda SAG, en particular en el molino SAG, lo constituye la formación excesiva de los “Slurry Pool”. Esta cama de barro o pulpa que queda en el fondo del molino, producto del agua asociada a la carga, puede llevar a pérdidas de la capacidad productiva en el molino SAG, así como también a un consumo excesivo e ineficiente de potencia por parte del mismo.

La existencia de un problema de esta naturaleza se puede evidenciar cuando el torque del molino disminuye y su nivel de llenado total se mantiene prácticamente constante (Markstrom, 2011)^[16]. Este problema se puede originar por un taponeo de las parrillas de descarga del molino SAG, como se comprobó mediante los estudios desarrollados por Markstrom en la planta de cobre de la mina Aitik (Markstrom, 2011)^[16]. Frente a este hecho, se procedió a operar el molino a menores tonelajes que los de diseño, lo que redujo el pegoteo en las parrillas de descarga hasta que éstas se despejaron casi por completo, permitiendo al molino SAG operar de manera corriente.

Se pudo evidenciar por medio del estudio, que cuando se sobrepasaba un determinado tonelaje de alimentación al molino, correspondiente en este caso a 2000 t/h, se empezaba a generar el pegoteo en las parrillas. Una de las explicaciones manejadas, es que cuando el tonelaje de alimentación aumenta hasta un cierto límite, el porcentaje de partículas cercanas al tamaño de abertura de la parrilla se incrementa de manera considerable, generando la obstrucción de los orificios en la salida.

La importancia de poder manejar de manera flexible los distintos parámetros operacionales de la planta, subyace en el hecho de optimizar los procesos internos tanto como se desee. En el caso de los molinos de Bolas se recomienda incrementar su densidad con el fin de mejorar la reducción de tamaño en el producto (Amoah, Kock, y Datu Khalil, 2011)^[17]. Otra medida recomendada se relaciona con los hidrociclones de clasificación, asociados a la molienda de bolas en una configuración SAG tipo SABC. En dicho caso se sugiere, según los estudios desarrollados por Amoah, Kock, y Datu Khalil^[17] en la planta de oro de la mina Damang, la instalación de hidrociclones dotados de grandes dimensiones en el “Spigot” (conducto del equipo por el cual es evacuado el flujo sobre tamaño o Underflow) con el fin de incrementar la carga circulante del circuito, fomentando con ello la eliminación de finos e incrementando la densidad en la descarga del molino de bolas.

Según los mismos estudios, se recomienda que la alimentación al molino SAG deba estar provista de una fracción considerable de material grueso, ya que sin ésta el molino es incapaz de mantener su nivel de llenado constante, pierde potencia y al mismo tiempo la escasez de las colpas de mayor tamaño, que constituyen los medios de molienda, hacen que los revestimientos internos del molino se vean mayormente expuestos a los impactos con el material.

Con medios de molienda y potencia escasos, producto de lo anteriormente comentado, el material pasa través del molino SAG a mayores tasas, saliendo de éste sin ser procesado de manera eficiente y llegando a la molienda de bolas con un tamaño de transferencia mayor, lo que demanda, por parte del molino de bolas, de un trabajo y consumo de potencia superiores. En el caso de que el molino de Bolas no pueda hacer frente al exceso de potencia requerido en dichas circunstancias, éste se termina transformando en un cuello de botella para el circuito.

Por otra parte una alimentación al molino SAG excedida en material grueso puede repercutir de manera negativa, generando un incremento en el consumo de potencia y el nivel de carga del molino, lo que termina limitando la capacidad de tratamiento del circuito (Amoah, Kock, y Datu Khalil, 2011)^[17].

La carga circulante, como se ha mencionado en las recomendaciones anteriores, puede ser un parámetro de control sumamente importante para generar la estabilización del circuito de molienda. Dependiendo del valor que esta tome, se puede generar una molienda eficiente o bien un producto grueso que no cumple con las demandas de calidad exigida por los procesos de concentración posteriores.

2.3.4. *Parámetros estructurales en los equipos de molienda*

Si bien las características estructurales de los equipos no suelen tomarse en consideración como una variable operacional fundamental a estudiar en torno al rendimiento del circuito de molienda, muchas veces, cuando el comportamiento o el perfil de funcionamiento de la planta o el de sus componentes se considera anómalo, sin una explicación aparente, dichos comportamientos pueden encontrar su explicación en detalles estructurales de los equipos que suelen estar afectando la operación. Referido a esto, los levantadores (lifters) y los revestimientos internos del molino (liners) suelen ser considerados componentes que influyen de manera considerable en el funcionamiento y rendimiento de estos equipos.

Se ha podido evidenciar que el desgaste de los lifters y los liners del molino SAG pueden influenciar comportamientos en la granulometría del producto final que debieran considerarse para su estudio (Bird, Powell y Hilden, 2011)^[18].

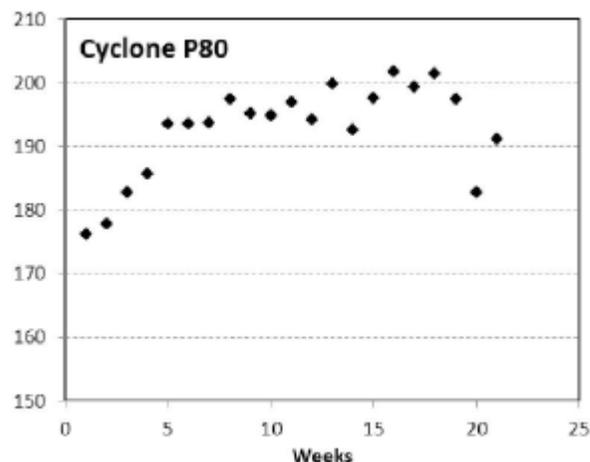


Figura 27. Granulometría del Overflow (P₈₀) en función del tiempo de uso de los liners del molino (Weeks).

El gráfico de la Figura 27 muestra como se relacionan la granulometría del mineral con el tiempo de uso de los revestimientos del molino, ubicado en el eje horizontal (Weeks). Se puede observar que la granulometría del Overflow de los hidrociclones se hace más fina hacia el final del tiempo de uso de los revestimientos. La explicación que se maneja para este comportamiento se fundamenta por un parte en un mayor tiempo de molienda del mineral y por otra en un proceso de transición en el molino SAG, desde la fractura por impacto a una fractura predominantemente por abrasión.

El mayor tiempo de molienda es una consecuencia del crecimiento en el volumen efectivo del molino. Cuando se desgastan los revestimientos del mismo, el volumen efectivo disponible para la carga se incrementa. Considerando que la tasa de alimentación al molino no se ve modificada, a la pulpa le tomará más tiempo abandonar el molino y por ende el tiempo de residencia de la carga o tiempo de molienda se incrementará, haciendo que el producto obtenido sea más fino, respondiendo con ello a la declinación observada hacia el final del tiempo de uso de los revestimientos en la Figura 27.

La otra explicación, asociada a la transición en el proceso de fractura al interior del molino, se da por el desgaste en sus revestimientos y los levantadores, los que al irse consumiendo y reduciendo hacen que la carga interna del equipo empiece a resbalar y a desgastarse en los bordes del molino en vez de ascender para posteriormente impactar sobre el pie de la carga. El efecto de esto es un proceso de fractura predominantemente por abrasión, lo que genera las partículas de menor tamaño, frente a una disminución de la fractura por impacto, encargada de fracturar las partículas de mayor tamaño.

Se ha demostrado la influencia de los revestimientos y los levantadores del molino SAG, en la evolución de la carga circulante dentro del circuito de molienda. Machado, Mendonça, Fonseca y Rosa desarrollaron un estudio para ratificar y detectar esta influencia. La investigación involucró una campaña de muestreo dedicada a observar la variación en la carga circulante, así como de otras variables de la operación, respecto al desgaste o las horas de uso de los levantadores (lifters) (Machado, Mendonça, Fonseca y Rosa, 2011)^[12].

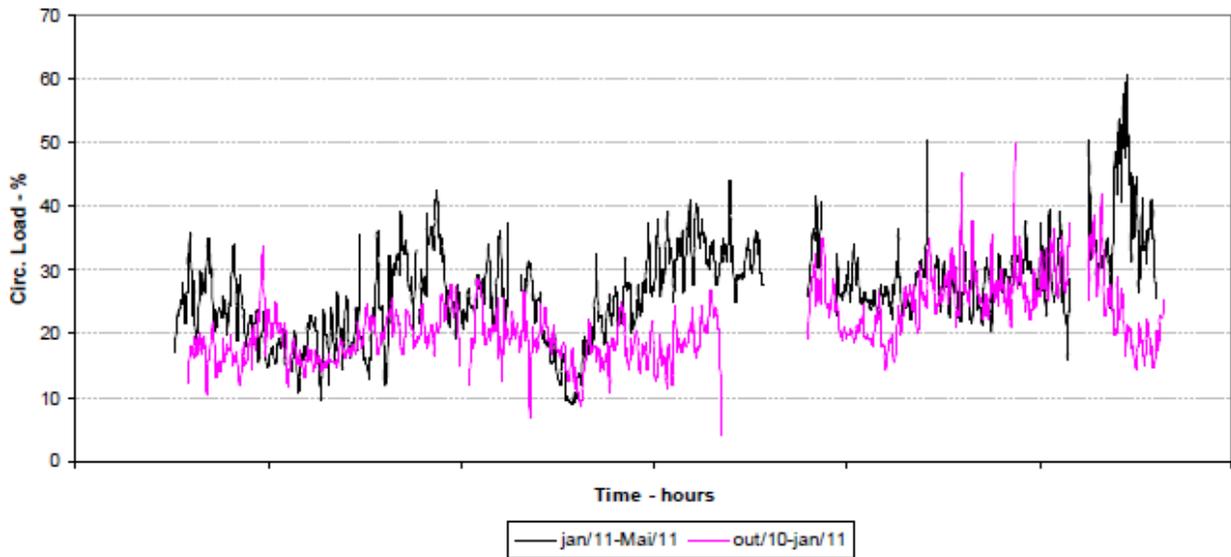


Figura 28. Carga circulante del circuito durante el tiempo de uso de los levantadores (lifters) del molino SAG.

En el gráfico de la Figura 28 se puede apreciar el incremento en el valor de la carga circulante del circuito, en la medida que el tiempo de uso y entonces el desgaste de los lifters se incrementa.

Por otra parte, se pudo comprobar que la tendencia en los revestimientos del molino fue la de perfilarse inicialmente para trabajar a niveles de carga circulante bajos, mientras que a medida que estos se van desgastando permiten que el molino pueda llenarse y trabajar a niveles de carga superiores.

En la Figura 29 se presenta un gráfico que vincula el nivel de llenado al que opera el molino SAG y el tonelaje de alimentación que éste procesa. Cada una de las curvas en la figura representa un tiempo de uso distinto para los lifters, representando la línea azul el período de uso más temprano, cercano a la instalación de los levantadores, mientras que las líneas rosada y amarilla indican mayores tiempos de uso.

Lo interesante es observar que a medida que los lifters del molino se van desgastando (línea rosada) el tonelaje máximo del molino SAG es alcanzando para una variedad de niveles de llenado, en un rango que va del 26 al 36% de su fracción de llenado total. Por otra parte para tiempos de uso menores de los lifters (línea azul) el molino se inclina a trabajar bajo un rango estrecho del nivel de llenado total para alcanzar su máxima capacidad de tratamiento, entre un 29 y un 31% de su fracción de llenado total. Hacia niveles de llenado inferiores o superiores al 30% se puede observar como el valor del tonelaje alimentado al circuito desciende fuertemente (línea azul), no así con las curvas amarilla y rosada que se mantienen relativamente planas.

Esto se debe al desgaste de los lifters y los revestimientos del molino, que permiten que a un mismo nivel de llenado, éste sea capaz de procesar mayor cantidad de mineral, en rigor del mayor volumen efectivo en su interior.

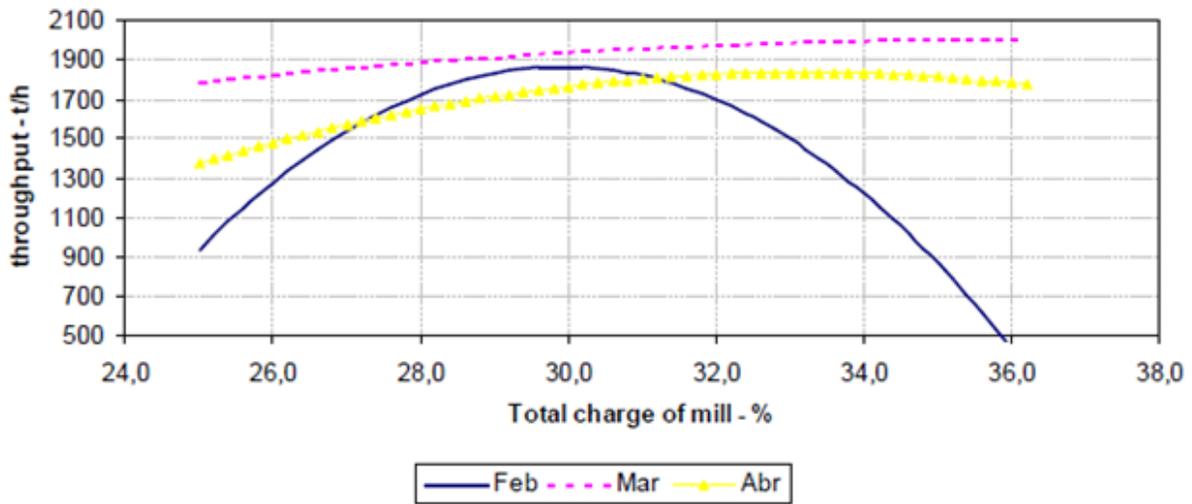


Figura 29. Capacidad de tratamiento del molino SAG en función de su nivel de llenado total.

Durante el mismo estudio se determinó una tendencia hacia la disminución del Peso Objetivo del molino para un nivel de llenado dado. El peso del molino debe alcanzar un valor objetivo, dado por el nivel de llenado y la tasa de alimentación que se desea procesar. Sin embargo, en este estudio se pudo evidenciar que en la medida que el tonelaje de tratamiento de la planta se incrementaba, el Peso Objetivo requerido del molino, disminuía según la tendencia que se observa en la Figura 30.

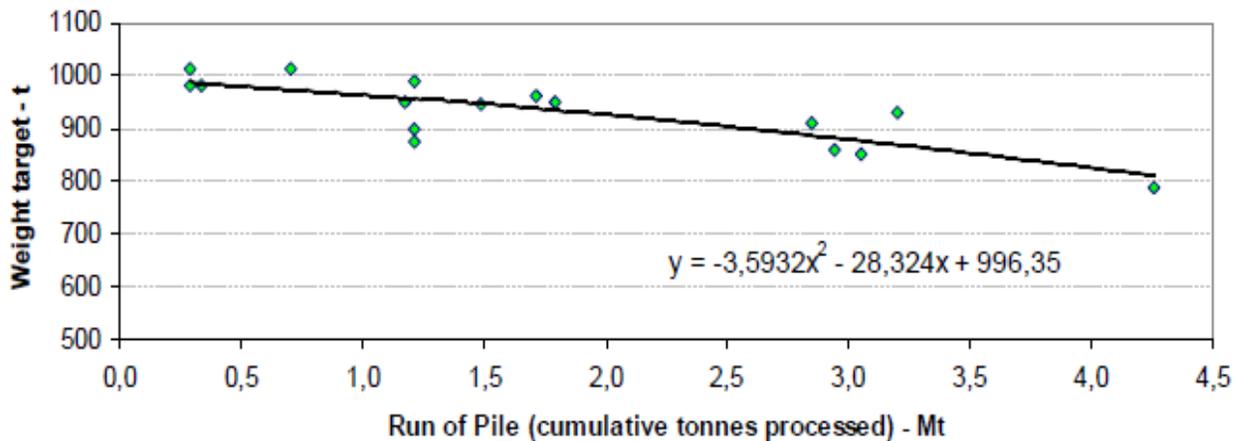


Figura 30. Target Weight del molino SAG para una carga total del 30%, en función a la alimentación del Run of Pile.

Se puede apreciar la tendencia hacia la disminución en el peso objetivo del molino o el “Target Weight”, en la medida que más masa es procesada por éste y los lifters son consumidos. De esta manera el control del peso del molino se realiza de manera más estable y es posible asegurar altos niveles de tonelaje de manera más estable en el tiempo, evaluando de manera paralela el desgaste de sus componentes internas, tales como los lifters.

Por otra parte, al vincular la dureza del mineral, representada en este caso por el BWi(kWh/t), con el ritmo de producción de la mina, el resultado fue una relación lineal e inversa: a medida que el BWi del mineral va disminuyendo, el tonelaje de alimentación o la capacidad de tratamiento se incrementa (ver Figura 31).

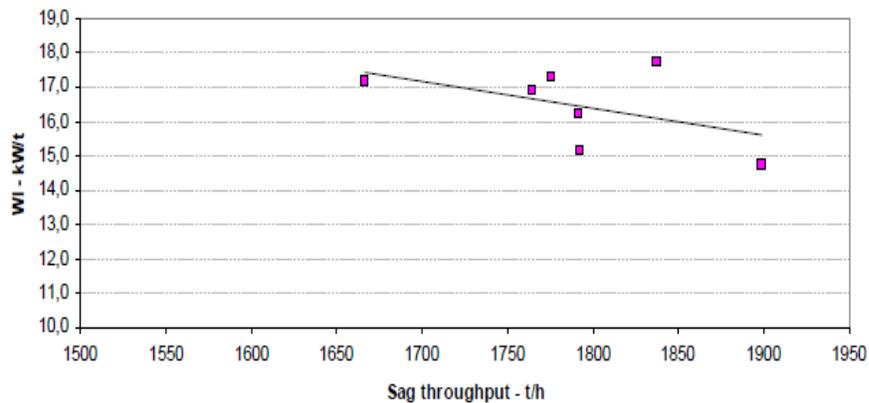


Figura 31. BWi (kWh/t) en función de la capacidad de tratamiento del molino SAG.

Por último se relaciona el consumo específico de energía del molino SAG con su capacidad de tratamiento (ver Figura 32). Se puede evidenciar para este caso, que el incremento en el consumo específico de energía del mineral en el molino SAG (CEE.SAG) genera una reducción de la capacidad de tratamiento del molino. Esto es útil para evidenciar si los cambios, asociados a un incremento en el CEE.SAG (kWh/t), están dados por un incremento en el consumo de potencia del molino o bien por una reducción en el tonelaje de alimentación fresca que éste procesa, constituyendo el último el peor escenario.

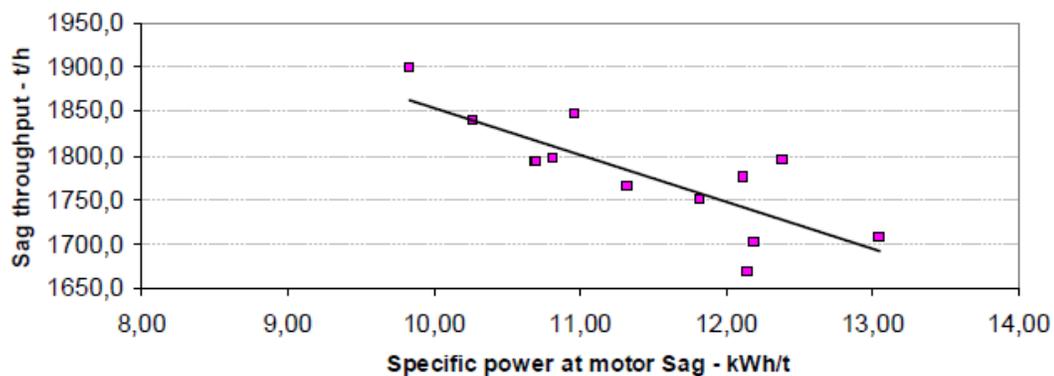


Figura 32. Capacidad de tratamiento del molino SAG en función del consumo específico de energía de su motor.

2.3.5. Aspectos generales en circuitos de molienda SAG

La configuración de un circuito es fundamental para cada tipo de mineral y faena en particular. Ésta dependerá de una amplia gama de factores, entre los que se cuentan la granulometría del stockpile, la demanda productiva y la dureza del mineral que se desea procesar. Frente a estas consideraciones, las configuraciones de molienda SAG tipo SABC-(A,B) suelen ser sumamente versátiles al hacer frente tanto a problemas de variabilidad en el mineral, como al tonelaje que se desea alcanzar; sin embargo, asociado a estas configuraciones se encuentra un costo de capital considerablemente alto, debido a la variedad de equipos requeridos.

Para faenas pequeñas, en donde el mineral se encuentra bien caracterizado, las configuraciones de molienda SAG en una sola etapa (Single Stage) suelen ser una alternativa atractiva, sin embargo, éstas son vulnerables frente a la variabilidad del mineral y a crecimientos inesperados requeridos en el rendimiento del circuito.

Al desarrollar la transición de una configuración de molienda en una sola etapa a un circuito SABC-(A,B), se puede llegar a incrementar de manera considerable el rendimiento productivo del circuito sin llegar a comprometer la calidad del producto final. Esta transición involucra un cambio desde un circuito cerrado a uno abierto, lo que según los estudios de Powell y Valery (2006)^[19], puede llegar a doblar la capacidad de tratamiento de un circuito de molienda.

Lo anterior fue comprobado por los estudios de Mainza, Lombard, Bepswa, Arthur, Yeboah, Nutor y Boakye (2011)^[19] quienes realizaron una transición desde la estación de molienda tipo SAG en una sola etapa, a un circuito SABC-A, luego de la cual se pudo incrementar la capacidad original del circuito a más del doble. Se determinó que una de las características claves que influenciaron de manera más fuerte las mejoras productivas del circuito respecto a la configuración original, correspondió al cambio en la granulometría de alimentación al molino SAG.

Por otra parte, luego de la transición hacia la configuración SABC-A, se pudo evidenciar lo esencial respecto al control operacional de los hidrociclones en el circuito. Si el Underflow de estos se encuentra demasiado diluido, se puede generar a la larga una alta carga circulante que impide el funcionamiento óptimo del circuito de molienda. Por otra parte, si el Underflow de los hidrociclones posee una concentración en sólidos demasiado elevada, el transporte de material a través del molino de bolas se dificulta, repercutiendo de manera negativa en el rendimiento del circuito.

Durante una investigación, desarrollada a la planta de hierro de la mina LKAB Kiirunavaara en Suecia, se estudió el efecto de variar la composición y características de la alimentación al molino AG del circuito de molienda (Bueno, Powell, Kojovic, Worth, Shi, 2011)^[20]. En este estudio se pudo evidenciar cómo, al incluir una mayor proporción de mineral duro en la alimentación, correspondiente en este caso a silicatos de tamaño mayor a 30 mm, la capacidad de tratamiento del molino se veía disminuida, mientras que su consumo específico de energía se incrementaba de manera lineal (Figura 33, corte izquierdo). A pesar de ello, en estas mismas circunstancias la granulometría del producto del molino AG se redujo, haciéndose más fina, debido a la mayor abrasión del mineral duro, principalmente causada por la menor densidad de la carga del molino bajo estas nuevas condiciones, reduciéndose con ello la potencia y la fractura por impacto al interior del equipo.

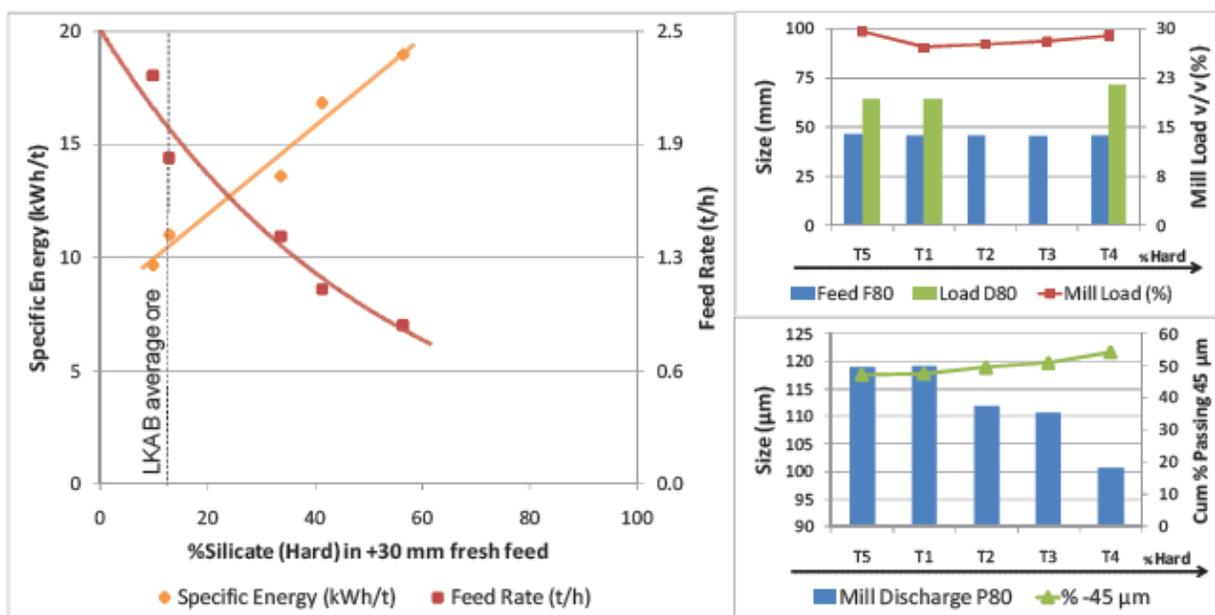


Figura 33. Resultados experimentales obtenidos para la operación de LKAB, durante el estudio.

En cuanto al nivel de llenado total del molino, éste es un parámetro que depende de una variedad de factores, entre estos el más importante corresponde a la tasa de alimentación a la que se desea trabajar. Es fundamental poder establecer vínculos de esta variable con otras relevantes dentro de la operación, para mantener un control de la misma.

Powell, Perkins y Mainza (2011)^[21] realizaron estudios respecto a una base de datos constituida por los parámetros operacionales de 8 plantas de molienda, en donde se relacionaron la velocidad de operación (N/Nc), la potencia consumida, el tonelaje de alimentación y el nivel de llenado de distintos molinos SAG. Se estudió, a distintos N/Nc (%) del molino, cuál era la fracción de llenado del mismo a la cual se alcanzaba el peak o el valor óptimo para la granulometría del producto, el tonelaje de alimentación y la potencia consumida. De acuerdo a esto se generaron los gráficos que se presentan en la Figura 34.

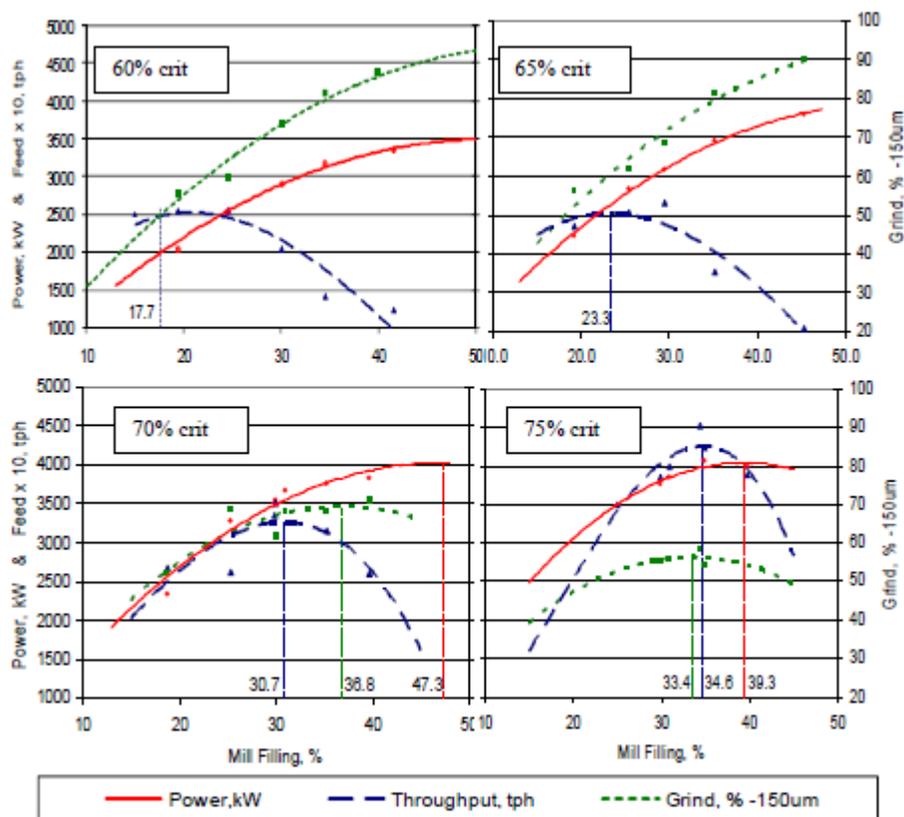


Figura 34. Curvas de correlación entre parámetros del molino SAG, a distintos N/Nc (%) del mismo.

Se puede observar, al variar el N/Nc (%) del molino en cada gráfico, desde un 60% a un 75%, como se desplazan las distintas curvas. En cuanto al tonelaje de alimentación (línea azul) por ejemplo, el nivel de llenado del molino al cual se alcanza el peak de esta variable pasa de un 17,7%, en el primer gráfico, a un 34,6% en el último (el de mayor velocidad de operación). Por otra parte la granulometría (línea verde) se comporta de manera inversa, alcanzando su valor óptimo inicialmente a un nivel de llenado del molino del 50%, mientras que al valor más alto de la velocidad crítica, probado en el último gráfico, el nivel de llenado requerido para alcanzar su óptimo desciende a un 33,4%.

El estudio además reveló cómo afecta la manipulación de la granulometría de alimentación al molino SAG en el comportamiento de la operación. Según esto, a medida que la granulometría de alimentación al molino SAG se hace más gruesa, el nivel de llenado del molino al cual se alcanzaba el tonelaje máximo, disminuye desde un 43% a un 37%, obteniéndose para ambos casos productos de granulometría similar. Este comportamiento se puede verificar según el gráfico de la Figura 35.

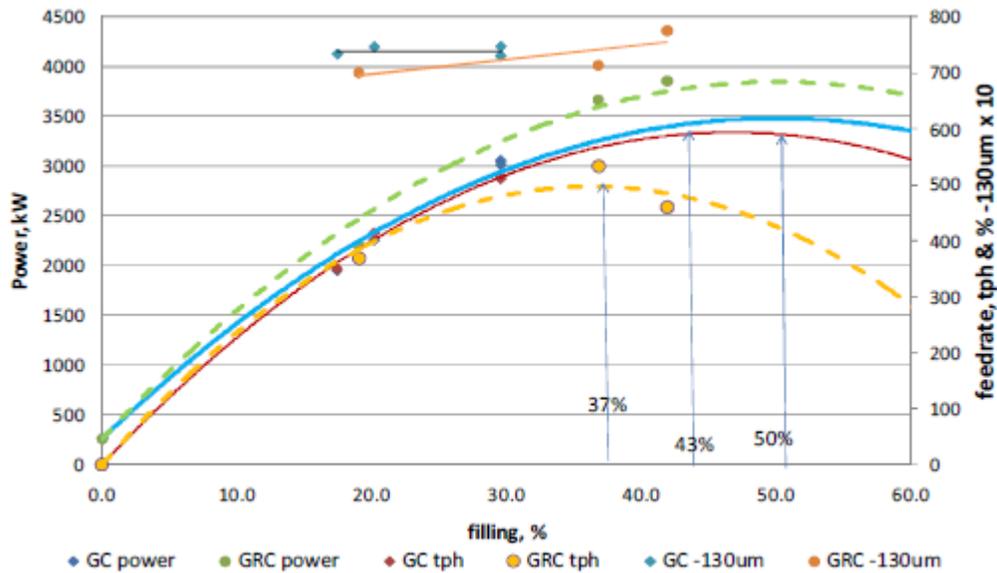


Figura 35. Curvas de correlación con 36% (GC) y 55% (GRC) de material grueso en la alimentación del molino SAG.

A partir de la base de datos y de la tendencia mostrada en la curva de la Figura 35, Powell, Perkins y Mainza^[21] plantearon el siguiente modelo para el control del nivel de llenado del molino SAG:

$$\text{Nivel Óptimo de llenado del Molino}[\%] = 54.4 - 0.32 * (\% - 30[\text{mm}]) \quad (12)$$

Finalmente se construye una curva general que relaciona el valor máximo alcanzado por el tonelaje, la granulometría y la potencia consumida, extraída del estudio de las 8 minas. En esta curva se puede observar como la potencia consumida alcanza su peak a un porcentaje de la velocidad crítica del 75%. Posteriormente, frente a valores de velocidad mayor, la curva de potencia se achata y no experimenta variaciones considerables.

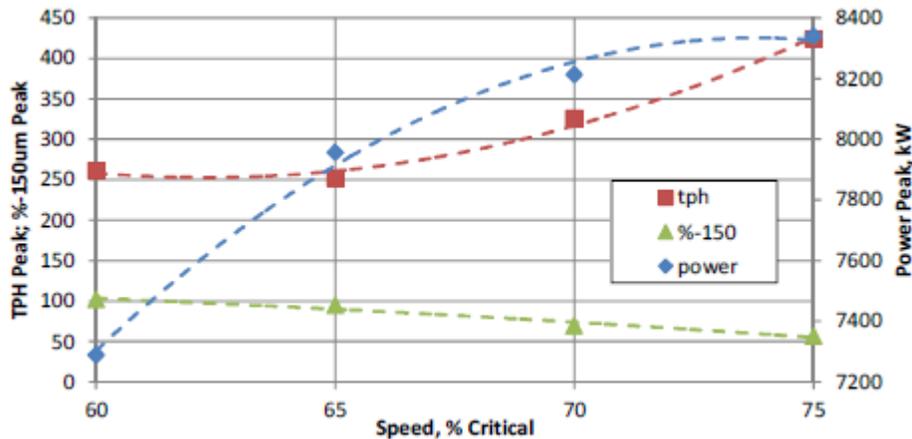


Figura 36. Curva de valores críticos a distintos porcentajes de la velocidad crítica (N/Nc).

En la medida que el tonelaje de alimentación y la velocidad de operación del molino SAG se van incrementando, la granulometría que se obtiene en el producto se va haciendo más gruesa, de manera que el porcentaje bajo los 150 μm va disminuyendo (línea verde), tal como se observa en la Figura 36.

Finalmente se presenta una curva que describe el desplazamiento en la posición de los valores óptimos de cada variable considerada (granulometría, tonelaje y potencia) con la variación de la velocidad de operación del molino, N/Nc (%). Los puntos de cada curva, asociados al eje “Y”, corresponden al nivel de llenado del molino al cual se alcanza el valor peak de la variable correspondiente (potencia, tonelaje o granulometría), a la velocidad de giro dada por el eje “X” (ver Figura 37).

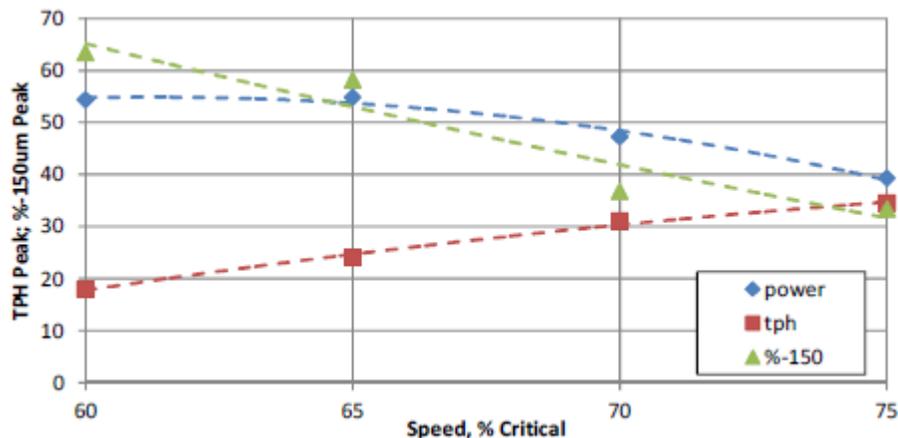


Figura 37. Nivel de llenado del molino SAG al que se alcanzan los valores peaks en las 3 variables consideradas vs N/Nc (%).

Como se puede apreciar el nivel de llenado del molino al cual se alcanza la potencia peak se desplaza a niveles cada vez menores conforme se incrementa el porcentaje de la velocidad crítica a la que opera el equipo, mientras que el tonelaje muestra un comportamiento opuesto, desplazando su ubicación hacia niveles superiores de llenado bajo las mismas condiciones. Por su parte, la molienda más fina de material se da a niveles de llenado cada vez menores, en la medida que el N/Nc (%) se incrementa.

Lo más importante de la curva anterior, es que la ubicación para el peak de los 3 parámetros se igualó a un porcentaje de la velocidad crítica del 75%, lo que hace pensar que tal valor podría constituir un punto de operación óptimo para el molino SAG/AG. Correlaciones de esta naturaleza pueden ayudar en la determinación de puntos de operación óptimos, para la consolidación de la operación de molienda considerando estas tres variables, las más importantes de controlar en la operación.

Referido a la relación que puede existir entre los parámetros más importantes del circuito de molienda, Bueno y Lane (2011)^[22] estudiaron correlaciones entre las distintas variables, para distintas líneas de molienda de todo el mundo, a través de una base de datos elaborada con los resultados de 134 pruebas piloto. Uno de los vínculos más claros que pudieron evidenciarse, corresponde al del consumo específico de energía del molino SAG con su tonelaje de alimentación, representado por el gráfico de la Figura 38.

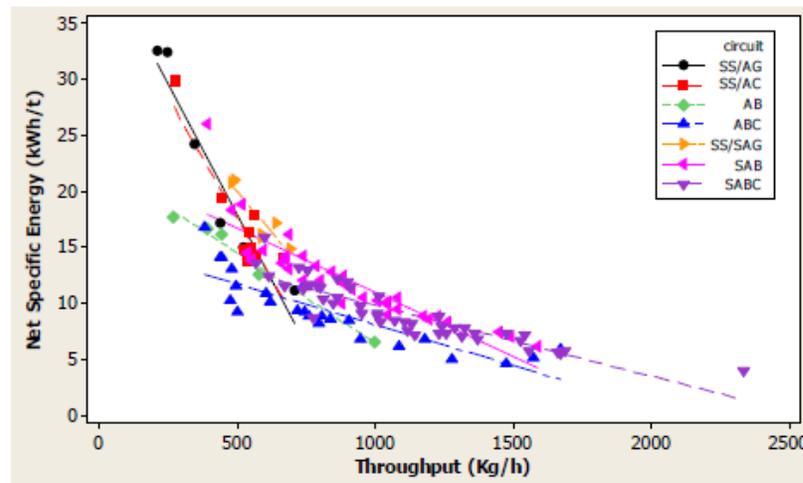


Figura 38. Capacidad de tratamiento de los molinos AG/SAG en función de su consumo específico de energía.

Mientras más energía emplee el molino AG/SAG para desarrollar la molienda, la granulometría en el producto de éste será más fina y por ende el tamaño de transferencia a molienda de bolas será menor, ayudando con ello a disminuir la carga de trabajo por parte del molino de Bolas y por ende la potencia consumida por el mismo. Al graficarse el porcentaje bajo los 150 μm en el producto final, con el consumo específico de energía del molino SAG, se obtiene el gráfico de la Figura 39.

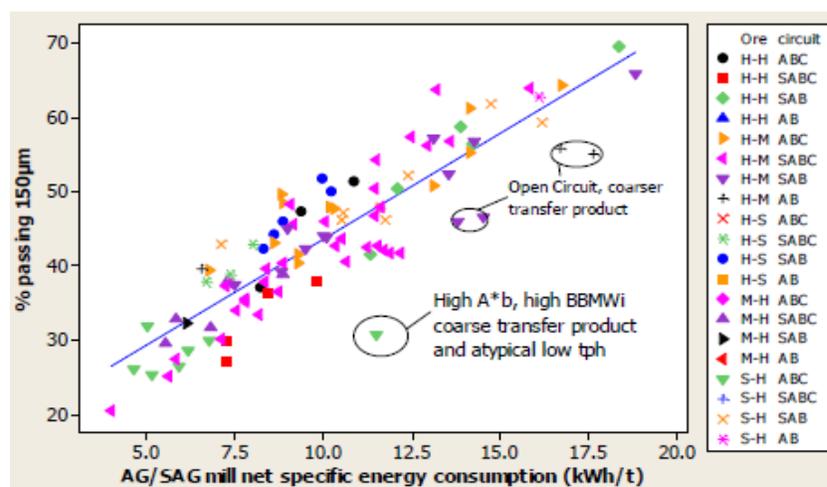


Figura 39. Granulometría del producto en función del consumo específico de energía del molino AG/SAG.

Mientras más energía se consume en la molienda primaria (AG/SAG) para generar un producto más fino, menor será la labor que deberá desarrollar la molienda secundaria de Bolas, para circuitos de molienda SAG/AG con estas dos etapas.

En el escenario del párrafo anterior, frente a un menor consumo de potencia por parte de la molienda de bolas, se ha podido observar que el Work Index Operacional del circuito completo disminuye. Esto se esquematiza a través del gráfico de la Figura 40, en donde se relacionan el consumo específico de energía del molino SAG/AG por tonelada de material molido bajo los 150 μm , con el Work Index Operacional (OWi) (Bueno y Lane, 2011)^[22]. Este último corresponde a un índice homólogo al Work Index del mineral, que en este caso se mide directamente sobre la operación y representa la eficiencia en el uso de la energía empleada para la conminución del mineral. Se puede observar cómo, a medida que disminuye la cantidad de material bajo los 150 μm , se incrementa el OWi; esto debido a que mientras menor cantidad de material fino se envía hacia el molino de bolas, mayor será la demanda energética de este equipo y por ende mayor será el OWi medido, tal como se había comentado anteriormente.

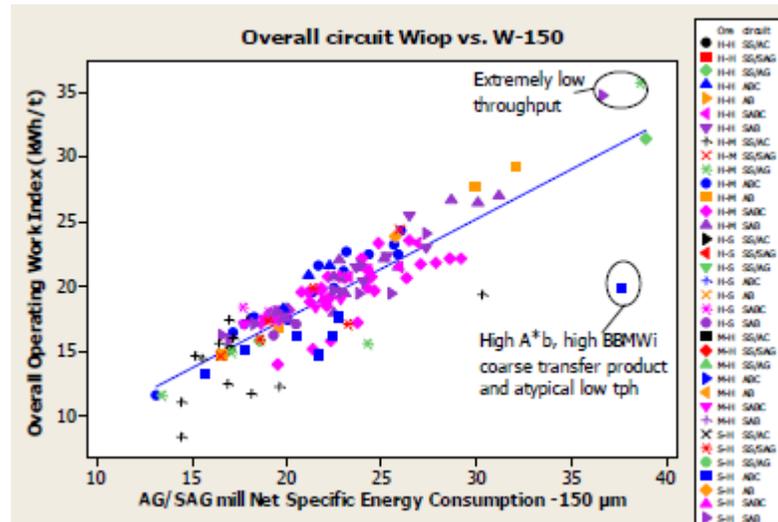


Figura 40. OWi del circuito global en función del consumo específico de energía para partículas bajo 150 μm .

2.4. Selección de variables operacionales a estudiar

En base al análisis desarrollado sobre la SAG Conference 2011, es posible evidenciar el gran número de variables que intervienen en la operación de molienda SAG. En este caso es sencillo darse cuenta que las variables de mayor influencia sobre el funcionamiento del circuito completo, son las vinculadas al molino SAG, debido a que es el equipo que desarrolla la principal labor (conminuir el material proveniente de chancado primario) y por ende el que consume la mayor cantidad de potencia, de entre todos los equipos asociados al circuito de molienda SAG. Es debido a lo mismo que el hecho de poder consolidar un cambio positivo en el funcionamiento de este equipo, sin duda alguna terminará repercutiendo de manera positiva en el circuito de molienda global, aunque sea sólo levemente.

A continuación se describen las variables consideradas de mayor relevancia sobre el funcionamiento y el perfil operacional en el circuito de molienda SAG, que serán estudiadas a partir de los datos reales obtenidos. Cabe mencionar que por lejos la consideración de mayor relevancia para la selección de estas variables, corresponde a la disponibilidad de información respecto a las mismas. Varios de los estudios analizados en la SAG Conference 2011 corresponden a pruebas desarrolladas a escala de laboratorio o piloto, en donde la medición y manipulación de variables operacionales se pueden llevar a cabo con un alto grado de especificidad. En la faena muchas de estas variables no son medidas, debido a una incapacidad o limitación por parte del equipo o porque dicha medición no constituye una práctica habitual. Es por ello que las variables a seleccionar deben constituir un parámetro usualmente medido en la operación.

2.4.1. Granulometría

De todos los parámetros operacionales observados y estudiados, el más trascendental a considerar corresponde a la granulometría, en particular aquella alimentada al molino SAG. A pesar de lo trascendental y cierto de esta afirmación, dicha granulometría no es un parámetro que suela medirse en las plantas de molienda; sólo se mide de manera selectiva para estudios específicos, desarrollados además a menor escala. Esto se debe a lo complejo de la ubicación del instrumento de medición para la granulometría, en la alimentación al molino SAG, considerando que además los pebbles chancados suelen ser recirculados al molino, lo que dificulta aún más la medición. Por último, la tendencia en las plantas es la de ubicar los medidores granulométricos en la correa que transporta el mineral desde el Stockpile, de manera que no se cuenta con una medición posterior de la variable, menos durante la alimentación al molino SAG.

Lo que sí suele medirse en las plantas de molienda, corresponde a la granulometría presente en la alimentación fresca al circuito, aquella asociada al Stockpile. Lo negativo de este parámetro es que muchas de las operaciones de molienda SAG que se encuentran operando, lo hacen con una etapa de chancado de pebbles, que recircula el flujo de material triturado de vuelta al molino SAG, haciendo que, aunque levemente, la granulometría efectiva alimentada al molino SAG sea distinta de aquella medida en la alimentación fresca al circuito.

A pesar de lo mencionado en el párrafo anterior y según se ha podido demostrar en la bibliografía revisada, es la granulometría de alimentación fresca la que termina influyendo de manera más fuerte en el funcionamiento del molino SAG. Además, el flujo másico de pebbles recirculados frente al de la alimentación fresca es bastante menor, por lo que su incidencia no debiese ser perjudicial. Es por ello que se concentrará el interés en la granulometría de alimentación fresca al circuito, debido a la disponibilidad de datos asociados. Es vital estudiar la influencia de esta variable sobre el consumo de potencia del molino SAG, el tonelaje de alimentación fresca y consecuentemente sobre el consumo específico de energía del molino Semiautógeno.

La granulometría en el producto del molino SAG también es una variable que se debe tener en consideración. Se puede establecer una relación entre esta variable y el consumo específico de energía del molino SAG, con tal de determinar la cantidad de potencia requerida por unidad de flujo másico para alcanzar un determinado perfil granulométrico en la salida del molino SAG. Al mismo tiempo es posible fijar la potencia del molino y determinar el tonelaje de alimentación fresca que se debe alimentar para generar una disminución en la granulometría del producto, en el caso de evidenciar algún deterioro de su calidad. De esta manera es posible, teniendo como input la granulometría en el producto del molino SAG, fijar tanto la capacidad de tratamiento del circuito como la demanda de potencia requerida por parte del mismo, lográndose un alto grado de versatilidad y control para la operación.

A pesar de lo comentado, en torno a esta última variable granulométrica se presenta un problema similar al comentado para la granulometría de alimentación al molino SAG. La medición de la granulometría en el producto de este equipo también constituye una práctica casi inexistente en las faenas, por lo que considerarla como variable a estudiar en una base de datos asociada a una operación real, no sería factible. De esta manera lo que queda por estudiar, en pro de mantener el perfil granulométrico del producto, corresponde a la granulometría final en el circuito de molienda, es decir, aquella medida en el Overflow de los hidrociclones. De hecho, en algunos de los estudios analizados anteriormente, se estudió la relación entre esta granulometría y el consumo específico de energía del molino SAG, por lo que tiene sentido estudiar este vínculo para la base de datos que se desee analizar.

Cabe mencionar que en la granulometría del producto final también influye el rendimiento del o los molinos de bolas, asociados a la molienda secundaria del circuito. Es por ello que a la hora de analizar la granulometría del producto final en función al consumo específico de energía del molino SAG, se debe constatar que la variación experimentada en dicha granulometría corresponde a un efecto ejercido exclusivamente por el molino SAG y no por la influencia de otras componentes en el sistema (molinos de Bolas por ejemplo).

Otra variable asociada a la granulometría con la que es trascendental contar, corresponde al T_{80} . Este parámetro es un indicador sumamente útil en la operación, ya que define la distribución de trabajo desarrollado entre los molinos de Bolas y el SAG. Una disminución en el valor de esta variable debería facilitar el perfil operacional de los molinos de Bolas, contribuyendo a una disminución en su consumo de potencia. Lo ideal en este caso sería determinar la forma de lograr dicha reducción, sin tener que incrementar considerablemente el consumo de potencia del molino SAG, de manera de establecer una optimización global en el circuito.

La forma de lograr aquella optimización global es precisamente a través de la granulometría en la alimentación, ya que si el molino se perfila de la misma manera, esto es, mantiene constantes sus condiciones operacionales, con una alimentación más fina debería generar un producto consecuentemente más fino, sin tener que incurrir en un mayor consumo de potencia. De esta manera vuelve a ser la granulometría de alimentación la variable que interesa estudiar. Por otra parte, el T_{80} suele ser un parámetro difícil de medir, por lo que se hace poco probable contar con su magnitud para una faena dada.

Finalmente es fundamental estudiar el comportamiento de la generación de Pebbles o la presencia de los mismos, en el circuito de molienda SAG, en función a la granulometría de alimentación. Como se sabe, la presencia de pebbles en el circuito afecta negativamente en el perfil operacional de la planta, de manera que los esfuerzos están siempre orientados hacia su reducción o tratamiento. Una de las formas de lograr ello es por medio de la granulometría de alimentación, ya que gran porcentaje de los pebbles evacuados por el molino SAG son una consecuencia directa de dicha variable. De esta manera, conocer el perfil granulométrico de la alimentación fresca que ayuda a reducir la presencia de pebbles en el circuito de molienda SAG, sin lugar a dudas contribuye al proceso de optimización en la operación.

2.4.2. *Condiciones operacionales del molino SAG*

2.4.2.1. *Fracción de llenado con bolas del molino SAG*

Una de las variables operacionales más importantes definidas para el molino SAG, corresponde al nivel o porcentaje de llenado con bolas de acero en el equipo, $J_b(\%)$. Tal como se pudo llegar a evidenciar, la magnitud de este parámetro influye de manera trascendental en el rendimiento del equipo. Un incremento en el porcentaje de bolas en el molino SAG provocará de manera directa un mayor consumo de potencia por parte del mismo, de acuerdo a la forma de los modelos convencionales de potencia, sin embargo, generará también una reducción de la granulometría observada a la salida del equipo, conllevando con ello a la obtención de un producto final de mejor calidad o bien al incremento en la capacidad de tratamiento del equipo y del circuito de molienda completo, manteniendo la misma calidad el producto original.

De esta manera sería importante evidenciar cuál es el nivel de llenado con bolas que mejor se acomoda a las características del molino y del mineral. En consecuencia se debería medir la evolución del perfil granulométrico en el producto final, en función del nivel de llenado con bolas en el molino. El $J_b(\%)$ del molino SAG es una variable que se puede controlar durante la operación. Con su manipulación se podría llegar a reducir la granulometría del producto final, en el caso de estar obteniendo un producto muy grueso, o bien incrementar el tonelaje de alimentación fresca, si así se desea. Dado que el porcentaje de bolas adicionado al molino SAG, que se fija durante la operación, suele mantenerse relativamente constante, es difícil contar con una amplia gama de valores que permitan una comparación con la granulometría final, de acuerdo a lo cual un estudio como el sugerido sería viable sólo en pruebas piloto o a escala de laboratorio, pero no en una faena común como la que se considera para este estudio.

2.4.2.2. *Porcentaje de la velocidad crítica a la que opera el molino SAG*

Otro aspecto fundamental a considerar, corresponde al porcentaje de la velocidad crítica a la que opera el molino SAG, $N/N_c (\%)$. Este parámetro influye de manera trascendental y directa tanto en el consumo de potencia del molino SAG como en la fractura del mineral que se desea conminuir en su interior. Dado esto, es trascendental poder definir el perfil óptimo de conminución para el molino SAG, en torno a su velocidad de operación, ya que como se ha observado, luego de superada una cierta magnitud para la velocidad de rotación del molino, las bolas y los medios de molienda en su totalidad adquieren una trayectoria desfavorable para la conminución del mineral, tendiendo a impactar de manera preferente con los revestimientos del equipo en lugar de colisionar con la carga.

En torno a las consideraciones anteriores es fundamental poder concentrar el estudio de esta variable sobre la granulometría final del circuito de molienda, pero además sobre el nivel de llenado del molino SAG. La idea es que, con la primera relación, se pueda establecer el perfil óptimo de la velocidad al cual sea posible minimizar la granulometría en el producto final de molienda. En segunda instancia, con el nivel de llenado del molino, la idea es poder establecer el nivel óptimo del $N/N_c(\%)$, que genera su disminución. La lógica es que un mejor perfil de conminución debería facilitar el vaciado del molino, producto de una reducción en el tiempo de molienda del mineral, lo que finalmente se vería reflejado a través de una reducción del nivel de llenado total del molino, conforme a la velocidad a la que opera. Claramente este comportamiento debería evidenciarse hasta el punto en donde el incremento en la velocidad de rotación del molino se vuelve perjudicial para el mismo, luego del cual debería detectarse un incremento en el nivel de llenado del equipo (cambio de pendiente).

2.4.2.3. *Concentración de sólidos en peso alimentada al molino SAG*

La concentración de sólidos en peso alimentada al molino SAG, $C_p(\%)$, suele ser un parámetro que no varía significativamente durante la operación, pero que puede llegar a repercutir trascendentalmente tanto en la potencia consumida por el molino SAG como en el funcionamiento y la capacidad productiva del mismo. Esta variable influye de manera directa en la densidad de la pulpa que se obtiene dentro del molino, por lo que un incremento de su magnitud debiese generar un efecto homólogo en la potencia consumida por el equipo. Dicha variable influye además en el perfil de transporte de la carga al interior del molino, de manera que con una reducción de la magnitud del $C_p(\%)$, se obtendría una pulpa más diluida que contribuiría a una descarga más rápida del molino SAG.

De esta manera se podría pensar en un efecto positivo asociado a la disminución en la magnitud de esta variable, sin embargo, un transporte más rápido de la pulpa a través del molino podría hacer que las partículas no alcancen el tiempo de molienda requerido para su reducción, lo que estaría generando un perfil granulométrico más grueso a la salida del molino SAG. Por esta razón resulta interesante estudiar cuál es el efecto, de esta variable, que prepondera durante la operación.

2.4.3. *Pebbles en el circuito de molienda*

Si bien los pebbles en el circuito de molienda son un resultado dentro de la operación, vinculado especialmente a las características del mineral alimentado al molino SAG (granulometría, abrasividad, entre otras), cuando se cuenta con una configuración de tipo SABC-(A,B), en donde es posible decidir si enviar los pebbles chancados al molino SAG, a molienda de bolas o a ambos (repartiendo la carga), entonces la tasa de pebbles recirculados al molino Semiautógeno se vuelve una variable controlable dentro del sistema, que influye en su funcionamiento.

Debido a lo anterior se propone el estudio de los pebbles recirculados al molino SAG, frente al consumo específico de energía del mismo, en el caso de evaluar un circuito de configuración SABC-(A,B).

2.4.4. Características estructurales del Molino SAG

El desgaste de los lifters y revestimientos internos del molino SAG, se puede utilizar como parámetro para definir el nivel de llenado óptimo al que debe operar el equipo. A medida que se desgastan dichas componentes, el molino presenta una mayor holgura respecto al nivel de llenado requerido para alcanzar el tonelaje máximo de tratamiento, por lo que un estudio referido a este ámbito, ayudaría a flexibilizar el control sobre el nivel de llenado total en el molino SAG. Lamentablemente éste es un dato escaso en las plantas; sólo se cuenta con un reporte mensual o periódico, referido al cambio de revestimientos o renovación de los lifters en el molino, por lo que se hace complejo desarrollar un estudio como el recomendado en este párrafo.

Resumen: Variables operacionales consideradas

Finalmente, se listan en la Tabla 3 las variables consideradas de mayor incidencia dentro del circuito de molienda y respecto de las cuales se cuenta con información suficiente para su estudio. Cabe mencionar que el nivel de llenado total podría ser remplazado en el estudio por la presión en los descansos del molino SAG, que usualmente se utiliza como una representación directa de dicho nivel. Dado que las relaciones a establecer se desarrollarán en base a nubes de dispersión entre pares de parámetros, se detallan en la misma tabla aquellos que asumen el rol de la variable independiente o exógena (eje “X”) y aquellos considerados variables dependientes (eje “Y”).

Tabla 3. Pares de parámetros a relacionar, sobre la base de datos obtenida.

Eje Y – Variable dependiente	Eje X – Variable independiente
Pc SAG (kW), CEE.SAG (kWh/t)	Granulometría de alimentación fresca
Pebbles Evacuados	Granulometría de alimentación fresca
Granulometría del Overflow en hidrociclones	CEE.SAG (kWh/t)
Granulometría del Overflow en hidrociclones	N/Nc (%)
Nivel de llenado total del molino SAG	N/Nc (%)
Nivel de llenado total del molino SAG	Cp (%)
CEE.SAG (kWh/t)	Pebbles alimentados

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo se encuentra definido por dos capítulos principales. El primero de ellos se orienta al análisis de una base de datos (DB.M1) con información operacional de una planta de molienda SAG que procesa mineral de cobre. El objetivo de este primer capítulo es estudiar el vínculo que se da entre las variables más influyentes del circuito de molienda SAG. Para ello se deben relacionar los parámetros operacionales ya seleccionados, indicados en la Tabla 3 del capítulo anterior, con el fin identificar correlaciones entre éstos y a partir de las mismas plantear análisis que permitan optimizar la operación.

Dado que el capítulo descrito en el párrafo anterior se enfoca en una sola planta de molienda, las correlaciones y comportamientos evidenciados no tienen por qué constituir resultados de validez universal, siendo sólo aplicables en la planta de molienda analizada. De esta manera, el estudio recae en un caso particular y pierde generalidad.

Debido a lo anterior, con el capítulo complementario se busca otorgar generalidad al presente estudio. Para ello, en primer lugar, se deben seleccionar las correlaciones más relevantes evidenciadas en el estudio de la base de datos DB.M1. Posteriormente y adicionando información proveniente de distintas plantas de molienda SAG, se verifica si las correlaciones seleccionadas tienen validez para otro conjunto de faenas, en cuyo caso se identificarían comportamientos de tipo genérico, válidos para todas las plantas analizadas, a partir de los cuales se posibilita el desarrollo de herramientas predictivas.

3.1. Selección de variables a estudiar y consideraciones

El objetivo principal de la revisión bibliográfica es establecer un registro respecto al estado actual del estudio en la molienda Semiautógena, con el fin de seleccionar variables operacionales trascendentales en el circuito de molienda SAG y así orientar posteriormente el estudio de las mismas.

A pesar de que las variables a vincular en DB.M1 ya han sido definidas en el capítulo de antecedentes, no es posible desarrollar el análisis del circuito de molienda sin tener presente, de manera anticipada, hacia donde se orienta dicho análisis, ya que de otra manera se podrían utilizar las variables de interés para concentrar su estudio sobre tópicos que no tengan relevancia para el presente trabajo.

Respecto a lo comentado en el párrafo anterior, el presente trabajo se enfoca en el estudio del perfil energético y productivo del molino SAG, por ser éste el equipo de mayor influencia en el circuito de molienda Semiautógeno. A lo anterior se suma la granulometría del producto final del circuito de molienda, la que si bien no influye directamente sobre el rendimiento energético/productivo del molino SAG, debido que es un resultado del mismo, constituye un parámetro de control que limita el perfil operacional del circuito de molienda.

3.2. Datos Operacionales

Éstos constituyen la materia prima del trabajo que se pretende desarrollar, por ende el manejo y la preparación de la información asociada, en vías a su análisis, constituyen el paso crucial a establecer previo a la identificación de correlaciones entre parámetros operacionales.

Variables con valores extremos afectan considerablemente las estadísticas básicas y generan problemas al aplicar regresión o construir modelos predictivos. Éstos podrían constituir datos erróneos o aberrantes (outliers), debido por ejemplo, a una falla accidental en el sistema de medición. El hecho de contar con información de calidad, que se encuentre desprovista de valores atípicos o erróneos, es por tanto fundamental. A este hecho se suma la llegada de datos operacionales caracterizados por un gran número de valores anormales y distribuciones erráticas, generadas por la poca rigurosidad con que se lleva a cabo la práctica de medición en faena.

En la planta de molienda interesa particularmente mantener ciertos puntos operacionales y detectar tendencias, lo que ha hecho que, con el paso del tiempo y el escenario de la minería actual, la práctica de medición en faena se encuentra actualmente desprovista de cuidado y orientada preferentemente al monitoreo del tonelaje o la alimentación fresca al circuito, ya que es el principal parámetro a optimizar y, en la mayoría de los casos, maximizar. Por ende, la medición de los demás parámetros operacionales ha ido perdiendo rigurosidad.

Sumado a lo anterior, se presenta la existencia de datos errados, asociados a una disfunción o un problema exclusivo de los instrumentos de medición, que no siempre funcionan de manera perfecta, lo que se puede dar a pesar de mantener un buen protocolo de muestreo. De esta manera, mediciones mal generadas conducen a la creación de un sistema sesgado, inclusive bajo una práctica de medición rigurosa. Respecto a lo anterior, algunos de los siguientes escenarios suelen generar mediciones erróneas:

- Piezas desgatadas del instrumento de medición.
- Instrumento dimensionalmente inadecuado.
- Dispositivos de medición calibrados incorrectamente o fuera de calibración.
- Instrumento utilizado incorrectamente, debido a un entrenamiento inadecuado en el propio uso de los dispositivos.
- Contaminación del sistema de medición.

El proceso de descarte o eliminación de datos aberrantes suele ser complejo, puesto que es precisamente lo que se trata de evitar. Además, es difícil contar con un criterio certero que permita declarar un dato como erróneo para posteriormente proceder a su eliminación; para ello se debe tener la certeza de que dichos “outliers” o valores críticos están errados, ya que de lo contrario, los mismos son capaces de proveer información trascendental para condiciones extremas del sistema estudiado.

De acuerdo a lo anterior, es importante definir criterios de limpieza para la erradicación de datos, que sean válidos y que cuenten con el respaldo del conocimiento que se tiene respecto al área abordada.

Para dar pie a la limpieza de la base de datos principal a analizar, es pertinente definir primero lo que interesa obtener través de las estadísticas operacionales. Al respecto la respuesta es sencilla: interesa vincular los parámetros de la planta analizada durante el ritmo operacional de la misma, para que las correlaciones identificadas sean representativas de la operación y permitan desarrollar un análisis en vías a su optimización.

Consecuentemente, lo que interesa observar es el ritmo corriente de la operación y no los puntos críticos de la misma, ya que éstos no obedecen a un resultado o reflejo del comportamiento normal, sino que a otras variables vinculadas fuertemente a los equipos y/o a decisiones tomadas por parte de los operadores (perturbaciones externas).

De acuerdo a lo anterior, el proceso de limpieza de datos se concentrará en aquellos que aun estando correctos, no se encuentren dentro de la condición operacional promedio definida para este estudio.

Regularmente el molino SAG debe ser detenido durante la operación, ya sea para hacer un cambio de sus revestimientos, una renovación de sus parrillas o debido a algún problema operacional que esté presentando. El tonelaje de alimentación medido, cercano a la detención del equipo, se reducirá de manera paulatina hasta alcanzar un valor nulo, que representará el detenimiento total del equipo. En este contexto, dicho detenimiento se debería meramente a una decisión por parte de la operación, en rigor a alguno de los escenarios indicados inicialmente, por lo que representaría directamente una influencia externa que no se responde con las variables operacionales medidas. Consecuentemente, estos valores, que comienzan a descender de manera constante y abrupta hasta alcanzar magnitudes críticas, deben ser descartados.

Si bien el caso del molino SAG constituye un ejemplo puntual, el procedimiento de limpieza sigue el mismo criterio para cada una de las demás variables disponibles en la base de datos.

3.3. Correlaciones entre parámetros operacionales

Tanto para el desarrollo de la limpieza de datos como para el análisis de los mismos, la herramienta a utilizar corresponde a la aplicación *Excel*, de *Microsoft Office*. Lo anterior, debido a lo sencillo de su uso, su capacidad para el manejo y el almacenamiento de amplios volúmenes de datos y por constituir la herramienta de Hojas de Cálculo de mayor uso en el mundo. Además, los complementos estadísticos y de análisis con los que cuenta esta aplicación son los necesarios para el desarrollo del estudio que se desea.

El procedimiento de análisis y correlación se basa fundamentalmente en el desarrollo de nubes de dispersión entre aquellos parámetros que, se estima, poseen algún tipo de vínculo. El principal objetivo es identificar un comportamiento que esté abalado por la distribución que presenten los puntos en el gráfico analizado.

Lo correcto para ratificar que un comportamiento realmente se puede definir como tal, es evidenciar “precisión” en la nube de puntos. Lo anterior está relacionado directamente con la dispersión de los datos en el gráfico, ya que si se obtiene una nube de puntos muy errática o dispersa, difícilmente existe evidencia de un comportamiento o vínculo entre las variables relacionadas. Mientras menor sea la dispersión de los puntos, en torno a una misma forma, mayor evidencia habrá para validar un comportamiento entre el par de variables vinculadas.

Respecto a lo anterior, la precisión es un requisito de carácter objetivo, para validar o no la existencia de correlación entre dos variables que se estén relacionando, sin embargo, es imprescindible adicionar a éste requisito el conocimiento y criterio personal, para determinar efectivamente si una nube de puntos, por muy precisa que sea, presenta efectivamente un comportamiento o tendencia lógicos.

Los aspectos más relevantes considerados en este estudio para identificar correlación entre dos variables, son los siguientes:

- **Definición de la línea de tendencia:** una línea de tendencia tiene un comportamiento que puede ser lineal, exponencial, logarítmico o de cualquier otra naturaleza. El índice “R Cuadrado”, R^2 , de *Excel*, es capaz de definir si efectivamente el comportamiento entre dos variables adquiere alguna de las formas indicadas anteriormente. Para lo anterior es necesario tener presente, de manera previa, qué tipo de comportamiento, se sabe o se cree, existe entre el par de variables relacionadas.
- **Apreciación personal:** vinculado al punto anterior, es vital tener una noción clara y un conocimiento acabado de lo que se está relacionando, puesto que, por muy definida que se encuentre la nube de puntos, es necesario que la forma evidenciada cuente con una aprobación de acuerdo a la teoría y la lógica. Si bien los comportamientos anómalos o extraños pueden llegar a ser válidos e incluso explicables, aquello requiere de un respaldo y fundamentos concretos, asociados a un amplio conocimiento respecto al área abordada.
- **Revisión bibliográfica:** el capítulo de revisión bibliográfica es fundamental para esta parte del estudio, por cuanto permite orientar y organizar el análisis del gran número de variables disponibles. Además, entrega un anticipo respecto a los resultados esperados, por ende constituye una guía que ayuda a ratificar la forma para algunas de las correlaciones identificadas.

Otro aspecto a considerar corresponde a las condiciones de la operación. Los estudios e investigaciones desarrollados a escala piloto o de laboratorio, para identificar la influencia entre dos variables, ajustan y dejan fijos todos los demás parámetros medidos, para así observar únicamente el comportamiento que se obtiene entre las dos variables de interés. Dicha medida se basa en la influencia de las demás variables del sistema. Por ejemplo, en un sistema determinado por 3 variables, al focalizar el estudio sobre dos de éstas, para observar el vínculo entre ambas, es posible que la tercera variable excluida se encuentre ejerciendo algún tipo de influencia sobre una de las variables estudiadas o sobre ambas de manera simultánea, lo que podría conllevar a un sesgo en el análisis y a conclusiones erróneas.

En un sistema como el que se desea estudiar, con una variedad de parámetros por lejos mayor a sólo 3, la perturbación de terceras variables se vuelve mucho más probable y aguda. La ventaja de los experimentos a escala piloto y aún más en los desarrollados a escala de laboratorio, radica en lo sencillo de poder controlar las variables del sistema, debido a la magnitud de éstas y de los equipos involucrados, por lejos menores a las de la operación real.

Considerando lo anterior, se recurre a la herramienta “Filtro”, de *Excel*, capaz de acotar los datos de una determinada columna, a un rango de valores o una magnitud específica, definidas por el usuario. Dado que en una faena como la que se desea analizar los datos son reales, con un alto grado de dispersión y variabilidad, no es posible definir un valor constante para cada variable, ya que éstas adquieren un valor específico y único en el tiempo. De acuerdo a esto, el ajuste desarrollado sobre terceras variables, que no interesan estudiar, deberá estar dado por un rango lo más estrecho posible, asumiendo que dichas variables, dentro de este rango, se mantienen constantes.

El criterio para la definición del rango de acotamiento, indicado en el párrafo anterior, variará entre un parámetro y otro, pues no es posible comparar, por ejemplo, el rango de estabilidad definido para el tonelaje de alimentación fresca al circuito, que puede ser fácilmente de 100 t/h, con el definido para la granulometría del Overflow en los hidrociclones, que variará porcentualmente en un rango mucho más acotado.

Se trata de asemejar, de acuerdo a las limitaciones y recursos con los que se cuentan, la metodología que se utiliza a escala de laboratorio o piloto, sin embargo, se debe tener precaución, ya que si bien el rango bajo el cual se está definiendo a una variable como “constante” puede ser tan pequeño como se desee, mientras más estrecho sea, menor cantidad de datos disponibles habrá para el análisis, lo que a la larga juega en contra de la robustez del estudio y la representatividad de los resultados obtenidos.

El cuidado que se debe tener respecto de la metodología de Filtros es mayor si se considera que previo a su utilización, para relacionar dos variables de interés, se requiere conocer cuáles son los demás parámetros de la operación que están influyendo. Lo anterior se debe a la existencia de variables poco dependientes o para las cuales no hay influencia significativa por parte de otros parámetros, y a la evidencia de variables muy sensibles, afectadas considerablemente por cambios en la mayoría de los demás parámetros del sistema. Al último caso se liga una reducción considerable de datos disponibles, ya que se debe acotar un mayor número de variables, lo que determina la exclusión de un elevado número de datos para el análisis.

3.4. Desarrollo de Modelos

Posterior al análisis entre las variables operacionales de la base de datos DB.M1, se desarrolla el capítulo complementario, orientado a universalizar el presente estudio por medio del desarrollo de herramientas predictivas de uso genérico.

Para lo anterior, se debe contar con el respaldo de información tan variada como se pueda, referida a las mismas variables estudiadas, pero proveniente de distintas fuentes y que por tanto considere distintos escenarios. Debido a esto se recurre a una búsqueda bibliográfica que logre complementar la base de datos principal, con información operacional de distintas faenas de molienda SAG.

Para la creación de los modelos se definen las variables que interesa estimar y los parámetros de la operación que influyen de manera preponderante en dichas variables. Entre las variables de mayor interés, se cuentan las relacionadas al perfil energético del molino SAG, debido a que dicho equipo es el que mayor incidencia tiene en la operación de molienda. El consumo de potencia por parte del molino SAG y el consumo específico de energía derivado del mismo, se presentan por lejos como las variables de mayor relevancia en la operación, cuyo pronóstico interesa obtener.

La literatura en general, no sólo la citada en este trabajo de memoria, indica que la variable más influyente dentro del perfil de funcionamiento del circuito de molienda SAG y en particular del molino Semiautógeno, la constituye la granulometría de alimentación a este equipo. Se busca, por tanto, poder adicionar a la granulometría de alimentación fresca como variable exógena en la creación de un modelo predictivo de potencia consumida por el molino SAG y consumo específico de energía del mismo, lo que constituye un aporte inédito, si se considera que la mayoría de los modelos convencionales de potencia consumida, no toman en cuenta dicho parámetro, adicionando una alta imprecisión a sus resultados.

Respecto a la herramienta predictiva para la potencia consumida por el molino SAG, la estrategia es estudiar el comportamiento de ésta en función de la granulometría de alimentación fresca y evidenciar si dicho comportamiento se da de la misma manera para todas las bases de datos consideradas, ratificando con ello una tendencia de carácter universal, a partir de la cual se pueda desarrollar un modelo predictivo.

A pesar de lo mencionado en el párrafo anterior, al comparar la potencia consumida por el molino SAG de una faena con la de otra, es posible evidenciar altas diferencias en las magnitudes alcanzadas, lo que se debe a la forma en la se encuentra definida la potencia consumida por los molinos Semiautógenos. Como se revisó anteriormente, la potencia consumida por el molino, independiente del modelo considerado para su cálculo, estará determinada a partir del torque ejercido por el sistema, el que dependerá directamente de las dimensiones del equipo a través del factor “ $D^{2,5} * L$ ”.

Por ende, en el consumo de potencia intervendrá, de manera directa y acentuada, las dimensiones del molino (Ecuación 13), otorgando a los de mayor envergadura un valor extremadamente alto, en comparación a aquellos de menor tamaño asociados a faenas pequeñas, lo que hace que la comparativa se vea distorsionada por las dimensiones de los equipos en cada planta.

$$Pc\ SAG = f\left(Jt, Jb, \frac{N}{Nc}, Cp\right) * (D^{2,5} * L) \quad (13)$$

Lo anterior genera un sesgo muy alto en el comportamiento que se desea evidenciar, en donde la amplia diferencia que se produce entre la posición de la curva de potencia consumida, de una faena con la de otra, viene dada por las dimensiones de los equipos y no por la variable exógena estudiada. Finalmente, el hecho de independizar al consumo de potencia del molino SAG de las características dimensionales del equipo, igualaría el campo comparativo, evidenciándose en este caso el efecto neto de la granulometría sobre el consumo de potencia.

De acuerdo a lo anterior, se define el siguiente factor de escalamiento, el que debe ser aplicado (multiplicado) a la magnitud de la potencia consumida, para todas las faenas consideradas:

$$\frac{1}{D^{2,5} * L}$$

A partir de esto se logra desarrollar una parametrización, correspondiente al producto entre la potencia consumida y el factor de escalamiento (eje “Y”), en función de la granulometría presente en la alimentación fresca, considerada la variable independiente o eje “X”.

En otras palabras, se estaría observando una potencia normalizada por las dimensiones del molino, tal como muestra la siguiente expresión:

$$\frac{Pc \text{ SAG}}{L * D^{2,5}} = \text{Eje Y}$$

Para el desarrollo del modelo de consumo específico de energía del molino SAG, se procede a evaluar el valor de esta variable en función de la granulometría de alimentación fresca, en todas las bases de datos. La idea es la misma que en el caso del modelo de consumo de potencia: identificar un comportamiento de carácter genérico que permita el desarrollo de una herramienta predictiva para la variable observada. En este caso no es necesario ponderar el parámetro energético, en este caso el CEE.SAG (kWh/t), por las dimensiones del molino, puesto que dentro de esta misma expresión se encuentra asociada la capacidad de tratamiento y de manera indirecta, la envergadura del molino SAG, tal como se indica en la Ecuación 14:

$$CEE.SAG = \frac{Pc \text{ SAG}}{Gsf} \quad (14)$$

La alimentación fresca al circuito de molienda, Gsf (t/h), da cuenta de la capacidad productiva y por ende de las dimensiones del molino SAG, que son las que efectivamente limitan el rendimiento de la planta. Lo anterior se puede desprender de la ecuación del Holdup para el molino SAG (ver Ecuación 15), en donde H representa el Holdup o las toneladas de mineral que se encuentra al interior del molino de manera constante en el tiempo, Gsa(t/h) representa la capacidad de tratamiento del molino o el flujo másico alimentado al mismo y “ τ ” corresponde al tiempo de residencia que posee la carga al interior del molino, antes de ser evacuada, expresada en este caso en horas.

$$H = Gsa * \tau \quad (15)$$

Si consideramos que el Holdup del molino se encuentra definido por la masa de mineral dentro del mismo, en su valor intervendrán la densidad total de la carga, $\rho_t[\frac{t}{m^3}]$, que se mantiene constante en el equilibrio y el volumen o las dimensiones del molino SAG, como se muestra en la siguiente ecuación alternativa para el Holdup.

$$H = K * (L * D^2) * (Jt * \varepsilon * Cp * \rho_t) \quad (16)$$

Donde el parámetro “K” es función de la constante π y de la geometría del equipo (cilíndrico o cilindro-cónico). Dado que G_{sa} corresponde al flujo másico completo que ingresa al molino SAG, esto es, la alimentación fresca, G_{sf} , más los pebbles recirculados al equipo (en el caso de haber recirculación), para este caso se asume que no hay recirculación de pebbles ($G_{sa}=G_{sf}$), para evidenciar de manera más clara la aparición de las dimensiones del molino SAG en la alimentación fresca, que es lo que se desea demostrar:

$$G_{sf} = G_{sa} = \frac{H}{\tau} = (L * D^2) * \frac{K * (Jt * \varepsilon * Cp * \rho_t)}{\tau}$$

Como se puede apreciar en la ecuación anterior, las dimensiones del molino se encuentran incluidas de manera indirecta en el flujo de alimentación fresca, G_{sf} , por lo que ponderar la potencia por esta variable (CEE.SAG) es homólogo a la aplicación del factor de escalamiento, desarrollada en el caso de la potencia consumida, de manera que el efecto de la granulometría sobre el consumo específico de energía del molino SAG es posible de comparar directamente ente las distintas faenas consideradas.

Con la obtención de los modelos de potencia consumida y específico de energía del molino SAG, es posible elaborar un tercer modelo orientado a la predicción del tonelaje de alimentación fresca, G_{sf} , al circuito de molienda. La utilidad de este modelo estaría esencialmente dirigida a estrategias “Mine to Mill”, con el fin de determinar el perfil granulométrico en la alimentación fresca que mejor se ajusta al molino SAG, para cumplir con las metas productivas de la planta.

De esta forma, la obtención del tercer modelo vendría dado por el cociente entre los modelos de potencia consumida y CEE.SAG (kWh/t), de la siguiente manera:

$$G_{sf} = \frac{Pc \text{ SAG}}{CEE.SAG}$$

Dado que el modelo para el tonelaje de alimentación fresca, presentado anteriormente, no se encuentra elaborado de manera directa en torno a datos reales, se requiere del diseño de este mismo modelo, pero utilizando directamente datos del tonelaje de alimentación fresca de cada planta de molienda. Lo anterior corresponde al desarrollo del modelo de tonelaje de acuerdo a la misma metodología empleada para la creación de los dos primeros modelos. Finalmente, se comparan ambas metodologías, la del cociente y la de los datos directos, para evidenciar cuál de las dos permite obtener el modelo más representativo para el tonelaje de alimentación fresca.

4. ANÁLISIS DE DATOS OPERACIONALES

Este capítulo se encuentra orientado al análisis y estudio de las variables operacionales más relevantes medidas en un circuito de molienda SAG (DB.M1), con el fin de encontrar correlaciones entre éstas, establecer tendencias y finalmente caracterizar el perfil de la operación, para así identificar y recomendar medidas que optimicen el rendimiento energético y productivo del circuito de molienda analizado.

De acuerdo a lo anterior, las conclusiones, recomendaciones y predicciones que se desarrollan en este capítulo, son válidas solamente para este caso de estudio.

4.1. Caracterización de la Base de Datos

La base de datos que es objeto de análisis para este trabajo de investigación, proviene de una planta de molienda SAG que procesa mineral de cobre. La faena posee dos líneas o circuitos de molienda; uno de ellos es el que provee de información para este estudio. La configuración del circuito de molienda de esta línea, corresponde a una de tipo SABC-(A,B), que cuenta con la facilidad de enviar los Pebbles, posterior al chancado de los mismos, hacia la alimentación al molino SAG, hacia la molienda secundaria en los molinos de Bolas o bien repartir el envío de la carga entre ambos equipos.

El circuito cuenta con un molino SAG de grandes dimensiones y dos molinos de bolas que desarrollan la labor de molienda secundaria. Para el chancado de pebbles se cuenta con 4 chancadores de cono SANDVIK. Las características más importantes de los principales equipos en el circuito considerado, se dan a conocer en la Tabla 4:

Tabla 4. Características de los molinos en la planta de Molienda considerada.

	Molino SAG	Molino de Bolas
Número de equipos	1	2
Dimensiones (D x L)	38' x 20'	24' x 36'
Potencia Instalada por equipo	19388 kW	11185 kW

Los datos operacionales utilizados para este estudio, de las distintas variables medidas (ver Tabla 5), fueron levantados en el circuito de molienda, con una frecuencia horaria. El periodo considerado es desde el 1 de Enero de 2012, a las 00:00 horas, al 31 de Diciembre del mismo año a las 23:00 horas. Se tienen, por tanto, las estadísticas operacionales de la faena para un año completo. Los parámetros medidos corresponden a los de mayor relevancia en la operación de molienda, sin embargo, no es posible contar con la magnitud de muchas de las variables que fueron sugeridas para su estudio en el capítulo 2.4, debido a que el control de la operación que se busca obtener por medio de la medición de variables, es de carácter global y no está dirigido al monitoreo de parámetros considerados poco influyentes dentro de la operación.

Tabla 5. Variables operacionales medidas y reportadas en la Base de Datos.

Variable	Unidad de medición	Instrumento de Medición
Alimentación Fresca (Gsf)	t/h	Pesómetro + Velocímetro
Pebbles Recirculados (Gsp)	t/h	Pesómetro + Velocímetro
Pebbles Evacuados (Gse)	t/h	Pesómetro + Velocímetro
Presión D.SAG (P° SAG)	psi	Medidor de Presión
Granulometría de Alimentación	% acumulado	Análisis de Imágenes (Split)
Alimentación HC (Qa)	m ³ /h	Flujómetro
Granulometría Final (+100#)	%	PSI o PSM
Concentración de Sólidos (Cp)	%	Balanza de Marcy
P° Hidrociclones	psi	Medidor de Presión (Manómetro)
Velocidad de rotación (Vm)	rpm	Velocímetro
Potencia SAG (Pc SAG)	kW	Amperímetro + cálculo adicional
Pc molino de Bolas	kW	Amperímetro + cálculo adicional
Flujo de agua a SAG (Ql)	m ³ /h	Flujómetro

Se da a conocer a continuación una descripción de las variables indicadas en la tabla anterior, de acuerdo la simbología empleada para cada una:

- **Gsf:** flujo másico de alimentación fresca al circuito.
- **Gsp:** flujo másico de pebbles recirculados al molino.
- **Gse:** flujo másico de pebbles evacuados del molino SAG.
- **P° SAG:** presión en los descansos del molino SAG.
- **Qa:** flujo volumétrico total alimentado a los hidrociclones (sólidos más líquidos).
- **+100#:** granulometría en el producto final del circuito de molienda.
- **Cp:** concentración de sólidos en peso.
- **P° Hidrociclones:** presión en la batería de los hidrociclones.
- **Vm:** velocidad de rotación, medida para el molino SAG.
- **Pc SAG:** potencia consumida por el molino SAG.
- **Pc molino de Bolas:** potencia consumida por el molino de bolas correspondiente
- **Ql:** flujo volumétrico de agua alimentado al molino SAG.

Es necesario señalar que muchos de los instrumentos de medición indicados en la Tabla 5, no necesariamente fueron utilizados para la medición de los datos en esta faena; constituyen sólo una referencia para dejar en claro el contexto de las mediciones.

Respecto a la variables medidas, en el caso del Cp(%), éste se reporta solamente para la alimentación y para el Overflow de los hidrociclones, pero no para el Underflow de los mismos. También es posible determinar el valor de esta variable para la alimentación al molino SAG, es decir, el porcentaje de sólidos en peso de la pulpa en el equipo, desarrollando una ponderación sencilla entre el flujo de mineral y agua alimentado al molino SAG.

En cuanto a la granulometría, ésta sólo se mide para el producto final y la alimentación fresca al circuito. La granulometría presente en la alimentación fresca se reporta como el porcentaje acumulado entre rangos de tamaño y para su categorización se utilizan tres clases de tamaños, especificados en la Tabla 6:

Tabla 6. Detalle de los rangos granulométricos con los que se caracteriza la alimentación fresca.

Granulometría Fina	Granulometría Intermedia	Granulometría Gruesa
% < 1”	1” < % < 6”	% > 6”

En segunda instancia la granulometría del producto final se reporta como el porcentaje de material acumulado sobre las 100 #, medido en el Overflow de los hidrociclones, lo que dependiendo de la malla considerada puede corresponder al porcentaje sobre 147 μm (Malla Tyler) o bien sobre 149 μm (Malla A.S.T.M).

La magnitud para algunas de las variables especificadas en la Tabla 5, tiene asociada una incertidumbre considerablemente alta, que depende de la metodología y el instrumento utilizado para su medición, por lo que se debe tener el debido cuidado respecto a la limpieza de sus datos y el posterior análisis que se desea desarrollar en torno a los mismos. La magnitud del $C_p(\%)$, por ejemplo, en la práctica general suele contar con un grado considerable de imprecisión, debido al instrumento utilizado para ello, comúnmente la Balanza de Marcy. Además de la imprecisión del instrumento, la medición dependerá de una muestra tomada a partir de un flujo, por lo que además interviene el grado de representatividad de la muestra, el protocolo de muestreo empleado y la experiencia del personal encargado de la medición.

4.2. Limpieza de Datos

Para el proceso de limpieza de datos, que corresponde al descarte de aquellos considerados aberrantes o que simplemente no aporten con información afín para el estudio, es vital establecer los criterios de limpieza que se siguen. Esta tarea no es en lo absoluto sencilla, considerando que el universo de variables que se tiene es amplio. Se suma a lo anterior el que muchas de éstas se encuentran medidas con un instrumento y una metodología distinta, de manera que establecer el protocolo de limpieza, se vuelve una labor a desarrollar prácticamente de manera aislada para cada variable.

Un dato aberrante o atípico corresponde, en estadística, a una medición que no parece corresponderse con el resto de los valores en el grupo de datos. Por ejemplo, respecto a todas las variables medidas, ninguna de ellas permite dentro de su dominio o de la magnitud que pueda alcanzar, un dato negativo, constituyendo esta una condición de descarte genérica, que se puede aplicar a todas las variables.

Respecto a lo último, la única variable que presentó valores anómalos, con magnitudes negativas, fue el tonelaje de Pebbles evacuados del molino SAG (ver Figura 41).

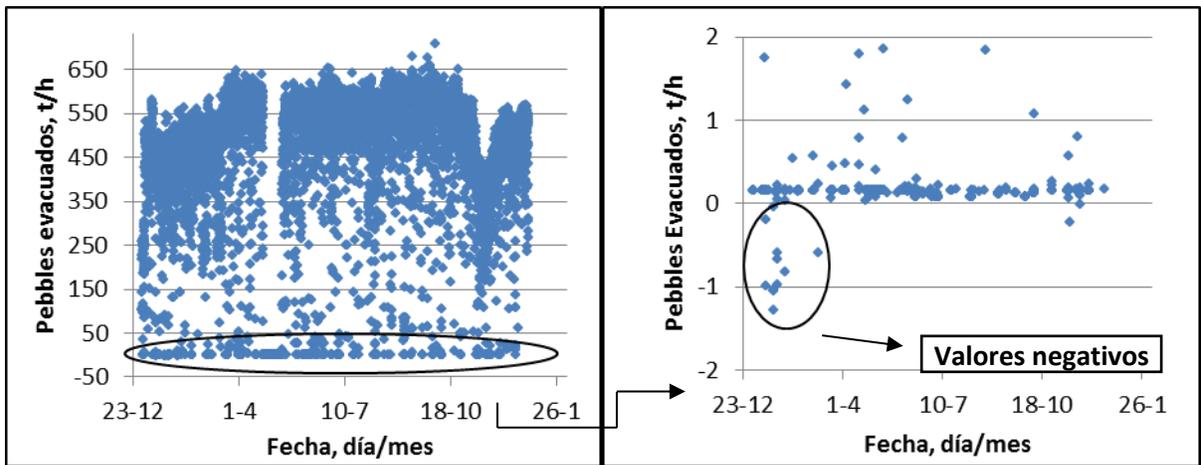


Figura 41. Tonelaje de Pebbles evacuados del molino SAG en el tiempo (año 2012); identificación de datos aberrantes.

Dado que en la figura anterior, debido a la escala del gráfico, no es posible visualizar fácilmente los datos negativos que constituyen valores aberrantes, se analiza el porcentaje de pebbles evacuados del molino SAG respecto a la alimentación fresca al circuito. En este caso es simple determinar, de manera visual, la presencia de los valores negativos (ver Figura 42) y además la existencia de otros datos aberrantes (porcentajes mayores al 100%), los que pueden estar ligados tanto a los pebbles evacuados como al tonelaje de alimentación fresca.

En todos los gráficos presentados en este capítulo y en los anexos, las fechas en el eje “X” son relativas al año 2012, por lo que se omite mencionar a éste en la figura por simplicidad.

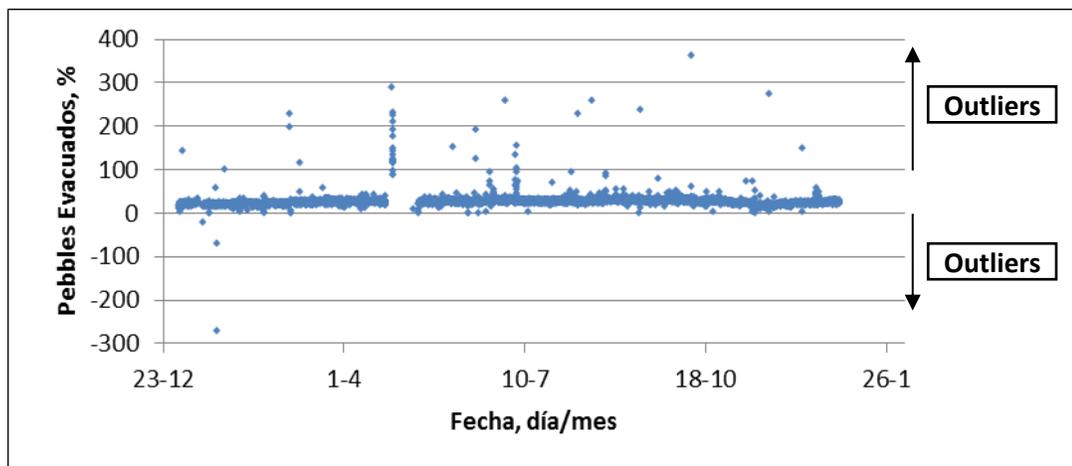


Figura 42. Porcentaje de pebbles evacuados del molino SAG, respecto a la alimentación fresca, en el tiempo.

Otro de los aspectos considerados como un factor común de descarte, corresponde a la presencia de datos duplicados o repetidos. Si bien es posible que, por ejemplo, para algunas variables medidas tales como el $C_p(\%)$ en la alimentación a hidrociclones o la fracción de la velocidad crítica a la que opera el molino SAG, su valor no cambie mucho en el tiempo, pues corresponden a condiciones operacionales predefinidas y altamente controladas, la repetición de exactamente un mismo dato, con hasta 12 decimales, 50 veces seguidas (lo que representa un período continuo de 50 horas), constituye sin lugar a dudas un problema en el instrumento de medición.

La repetición de un dato 50 veces seguidas implica que la variable medida no presenta variaciones ni perturbaciones de ningún tipo durante más de dos días completos en la operación, lo cual es prácticamente imposible, de acuerdo a la variabilidad de la misma, por lo que dicho dato debe ser descartado. La presencia de dichos duplicados en el análisis generaría sesgo, que es precisamente lo que se desea evitar.

La repetición de datos en largos intervalos de tiempo se dio de manera muy recurrente, por ejemplo, en el caso del porcentaje de la granulometría fina alimentada al circuito (ver Figura 43); en variadas ocasiones el mismo dato, medido con una precisión de 13 decimales, se repetía incluso hasta 70 veces seguidas, lo que constituye aproximadamente 3 días completos de operación:

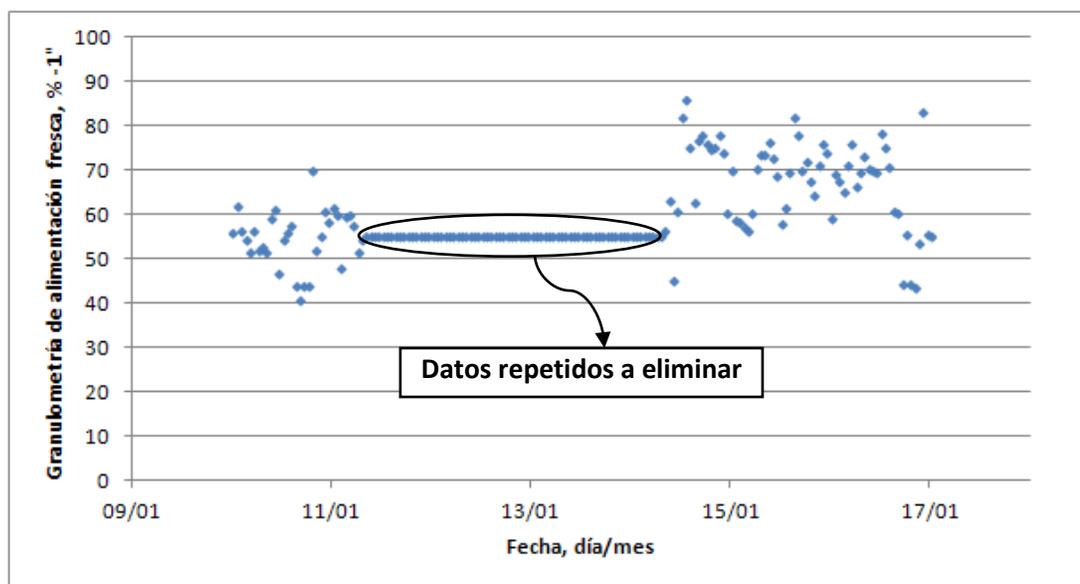


Figura 43. Porcentaje de granulometría fina en el tiempo; caracterización de datos duplicados.

Para tomar la decisión respecto a que datos borrar y cuales dejar, esto es, de toda la serie de datos repetidos, con cuál o cuáles de todos proseguir con el estudio, el criterio utilizado es el siguiente: dado que el problema en la medición está claramente asociado al equipo, al haber una repetición exacta del dato medido, se considera prudente erradicar todos los datos repetidos, desde el primero hasta el último, ya que se asume que la medición no es correcta dentro de todo el intervalo.

Otro aspecto a considerar es la frecuencia con la que fueron realizadas las mediciones. En esta base de datos es frecuente el encontrarse con magnitudes que varían drásticamente entre dos mediciones contiguas. En este caso, a pesar de que los datos se encuentran dentro de un rango de medición razonable y acorde con el resto, los cambios extremos son la instancia para analizar si aquel dato, que presenta una variación violenta respecto al anteriormente medido, constituye o no un valor atípico, considerando el intervalo de tiempo que los separa. La definición de un dato atípico, en el contexto de lo anteriormente discutido, es compleja de establecer de manera rotunda para algunas variables, puesto que ciertas variaciones drásticas pueden tener explicaciones completamente lógicas.

En el caso de la alimentación fresca, por ejemplo, esta se mide con un pesómetro ubicado en la correa de alimentación fresca al circuito. Dicho pesómetro cuantifica la masa de mineral que pasa por una determinada sección de la correa transportadora. Se puede dar que en cierto instante, cuando se realiza el registro de una medición, pase por la sección de la correa una colpa de gran tamaño y masa, mientras que a la hora siguiente, en el momento de la medición contigua, por la correa circulen partículas muy pequeñas de mineral, haciendo que la medición de la masa o tonelaje en ese momento disminuya drásticamente respecto a la anterior.

Cuando los datos del ejemplo anterior sean llevados al gráfico, se podrá apreciar una variación muy grande que visualmente parecerá un error de medición, sin que esto sea efectivamente así. De acuerdo a lo anterior, se plantea un último criterio orientado a la limpieza de datos, que será aplicado a todas las variables, correspondiente a la definición de rangos operacionales, que se establecerán como los límites entre los que opera la planta la mayor parte del tiempo y que por tanto definirán su ritmo operacional “corriente”, que es el que interesa analizar.

Para establecer estos rangos, es preciso considerar dos aspectos claves. El primero está ligado al conocimiento que se tiene de la operación en general. Dado que la faena que se está analizando procesa mineral de cobre, los valores para la mayoría de las variables operacionales son bien conocidos, por tratarse del principal metal producido a nivel nacional. De acuerdo a esto, se vuelve sencillo el establecer rangos bajo los cuales deberían estar acotadas las distintas variables del circuito de molienda SAG en estudio. Por ejemplo, es sabido que el porcentaje de la velocidad crítica, $N/N_c(\%)$, a la que opera el molino SAG suele ser de aproximadamente un 75%, sin embargo, este valor (para los molinos SAG de velocidad variable) puede variar durante la operación, mucho más cuando se comparan dos faenas distintas de cobre. A pesar de lo señalado anteriormente, el valor que adquiere el $N/N_c(\%)$ no suele escapar del rango 65-80%, esto por el perfil que se busca lograr en la conminución, por lo que dicho rango perfectamente podría ser utilizado para acotar los valores de la variable en este trabajo.

Sin desmedro de lo indicado en el párrafo anterior, no se debe confiar completamente en lo que indica la práctica habitual y la teoría; aquello debe ser reforzado con las tendencias mostradas por la misma planta en sus datos. Es por ello que el segundo aspecto clave a considerar, es observar, dentro de la faena en estudio, la dispersión de cada variable en el tiempo, para detectar sobre qué rango de valores se halla la mayor concentración de puntos y así definir la condición operacional promedio a considerar para el estudio.

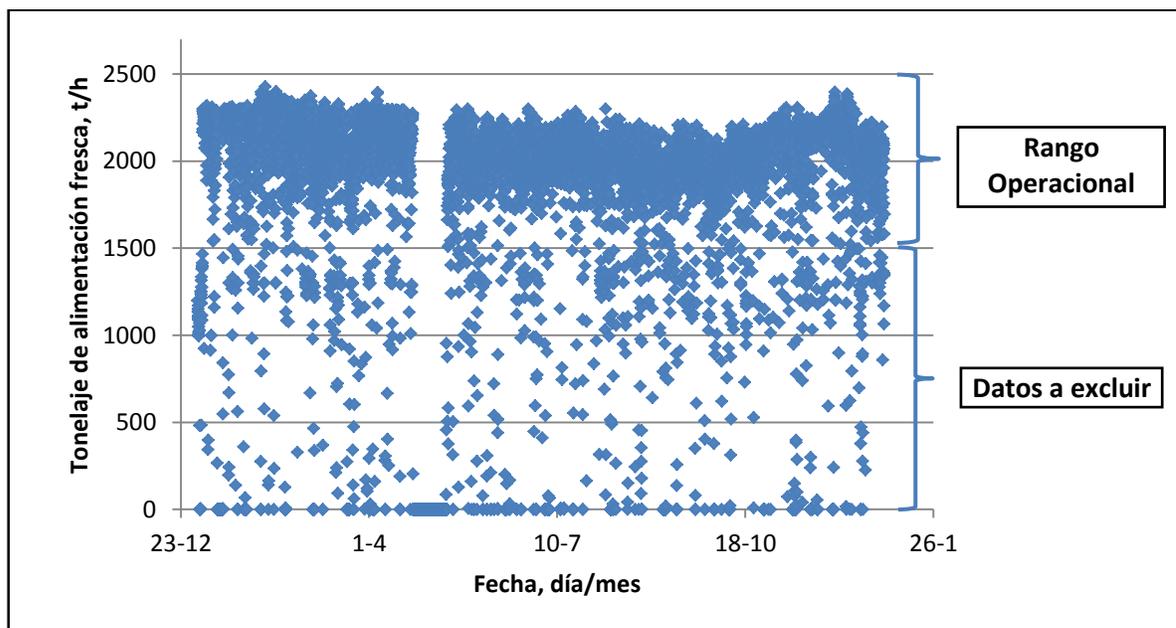


Figura 44. Tonelaje de alimentación fresca en el tiempo, con la identificación del rango operacional definido.

Una vez desarrollado el proceso de limpieza, se obtiene la sub-base de datos que será utilizada para la búsqueda y el análisis de las correlaciones. Se presenta a continuación una tabla que detalla el rango bajo el cual quedan definidas las principales variables operacionales a relacionar:

Tabla 7. Rangos operacionales definidos para las principales variables a estudiar.

Variable	Rango operacional definido
Gsf (t/h)	1600 – 2500
Gsp (t/h)	150 – 710
-1" (%)	20 – 95
+1" -6" (%)	8 – 70
+6" (%)	0 – 20
Pc SAG (kW)	10000 – 20000
Cp a SAG (%)	70 – 83
P° SAG (psi)	930 – 1200
N/Nc (%)	60 – 80

Tanto la limpieza exhaustiva de datos como la definición de rangos operacionales, se desarrollan sobre aquellas variables que forman parte del estudio, correspondientes a las que interesa correlacionar (ver Tabla 7). Dado que las demás variables no serán consideradas dentro del análisis, no es necesario invertir tiempo en su estudio y limpieza.

Para visualizar la diferencia que existe entre los datos originales o crudos y los obtenidos luego de la limpieza, se detalla a continuación una imagen de contraste para los valores de la potencia consumida por el molino SAG en el tiempo.

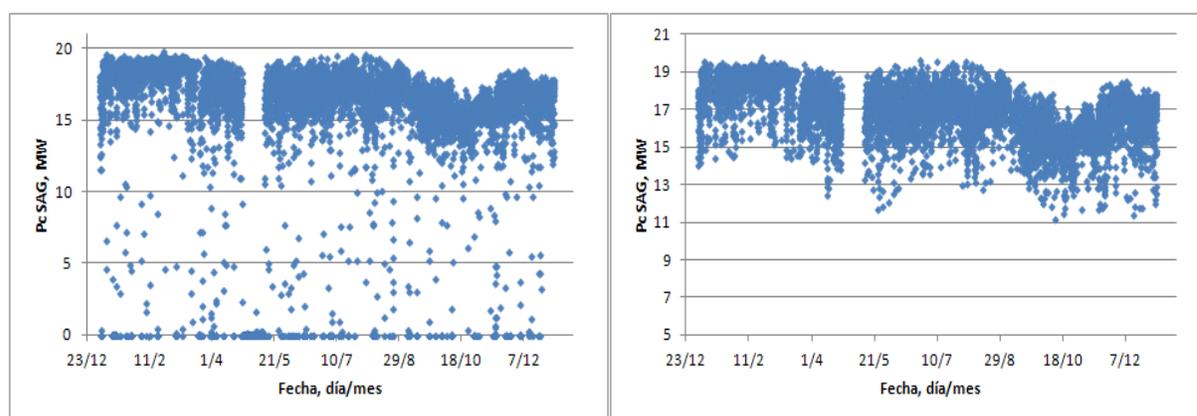


Figura 45. Potencia consumida por el molino SAG, para los datos originales (izquierda) y posteriores a la limpieza (derecha).

Se puede observar (ver Figura 45) el alto grado de dispersión de los datos crudos (izquierda), frente a los obtenidos luego del proceso de limpieza (derecha), para la potencia consumida por el molino SAG. Muchos de estos datos no son de utilidad, como por ejemplo los valores nulos, que representan la detención del equipo de molienda. Con la limpieza desarrollada es posible obtener una sub-base de datos dotada de variables menos erráticas, que si bien considera una menor cantidad de datos, resulta mucho más representativa de la operación.

4.3. Análisis de Datos Operacionales

Dada la importancia que posee el consumo de energía en el circuito de molienda SAG, las primeras variables a considerar, para evidenciar cualquier tipo de influencia sobre éstas por parte de otros parámetros en la operación, corresponden a la potencia consumida por el molino SAG y al consumo específico de energía del mismo, CEE.SAG (kWh/t). De estas dos, el consumo específico constituye la variable más importante, por cuanto indica la cantidad de potencia requerida por el molino SAG para procesar la unidad de flujo másico alimentada al circuito, transformándose en el indicador más relevante y utilizado del circuito de molienda.

4.3.1. Consideraciones previas

Antes de proceder al establecimiento de correlaciones entre parámetros operacionales, es preciso recalcar una consideración de importancia. Uno de los objetivos del presente trabajo, en particular de este capítulo, corresponde a la identificación del perfil operacional bajo el cual trabaja la planta. Al desarrollar nubes de dispersión entre las distintas variables operacionales, se lograron identificar tendencias sumamente claras, pero también dispersas, lo cual adiciona un alto grado de imprecisión al estudio y a la validación de los comportamientos observados.

Al analizar la dispersión de cada una de las variables operacionales en el tiempo, se identifica que, para el caso de la presión en los descansos del molino SAG, existen durante la operación alrededor de 4 cambios bruscos en su tendencia. Dada la naturaleza y magnitud de los cambios, estos no constituyen una variación que se haya dado de manera fortuita a causa de los demás parámetros medidos en la operación; obedece a una influencia externa, que no se responde con la información disponible.

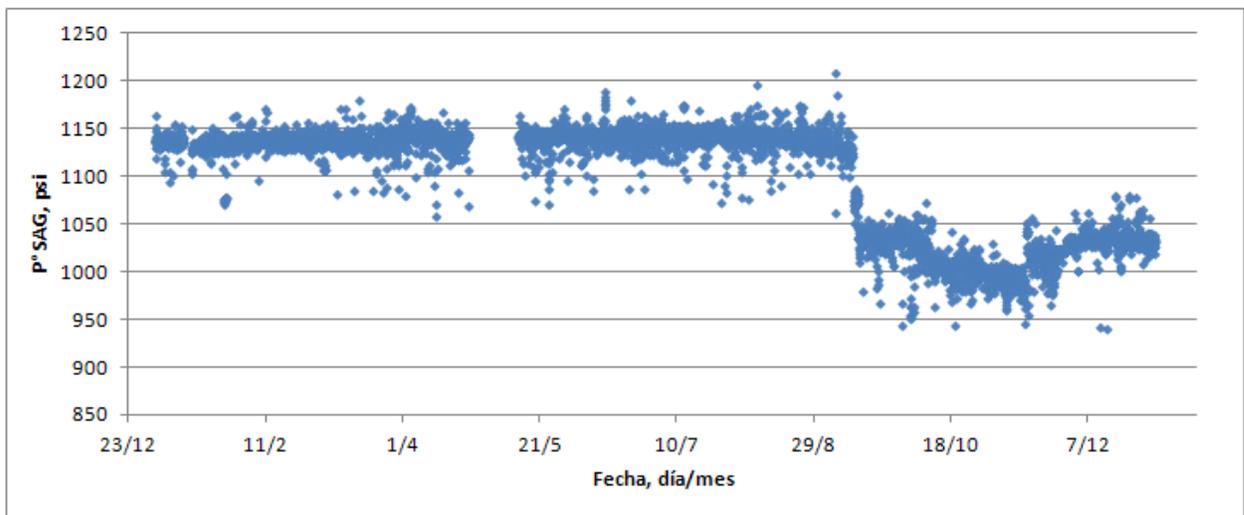


Figura 46. Presión medida en los descansos del molino SAG, en el tiempo.

Se observa, en la Figura 46, que cada una de las transiciones evidenciadas en el nivel de la presión en los descansos del molino SAG constituye un cambio en las condiciones operacionales, inducidas por parte de la operación. Lo anterior debido a que, luego de cada transición, el valor de la variable tiende a mantenerse acotada en un rango estrecho, lo que indica que el molino sigue operando bajo un nuevo rango o condición operacional. Esto es algo completamente distinto a lo discutido en el subcapítulo 4.2, en donde se definía un sólo rango operacional para cada variable, debido a que acá el molino SAG, una vez que se genera el cambio drástico de la presión en sus descansos, permanece trabajando en una nueva condición. Lo anterior hace que se presente más de un sólo rango operacional factible para la variable “presión en los descansos”.

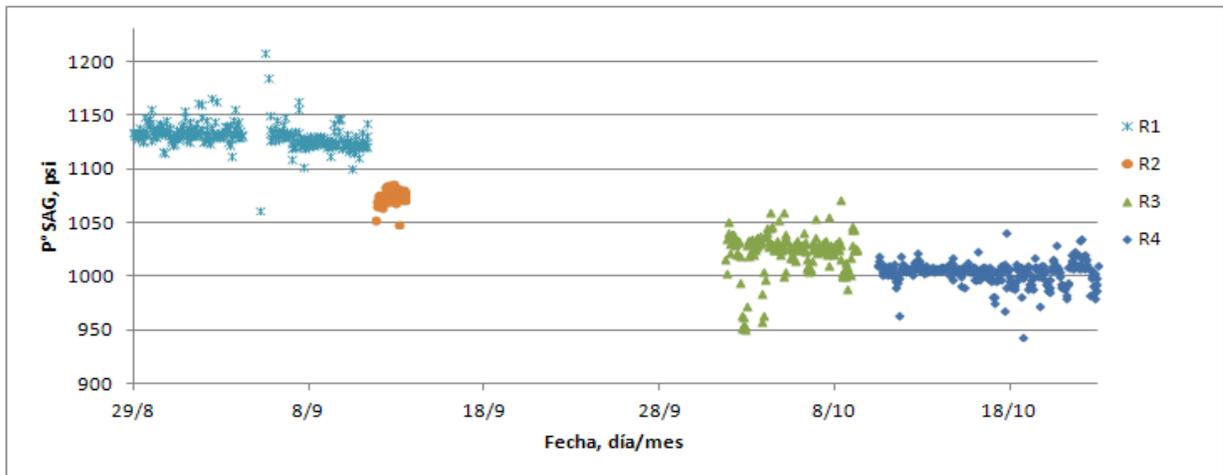


Figura 47. Caracterización de los saltos en el nivel de la presión en los descansos del molino SAG, en el tiempo.

Se destacan, en la Figura 47, aquellos datos considerados cambios de las condiciones operacionales en el molino SAG, en base al nivel de la presión en los descansos a los cuales se trabaja en cada uno. Cada rango de presión o condición operacional definido de esta manera, se caracteriza con un color distinto. Cabe mencionar que en el gráfico de la Figura 47 no se adicionan todos los datos, sino que sólo aquellos en donde es posible identificar claramente los saltos en el nivel de la presión, antes descritos.

Además de los tres cambios observados en la Figura 47, se identifican otros tres más, los que se presentan en el gráfico de la Figura 48.

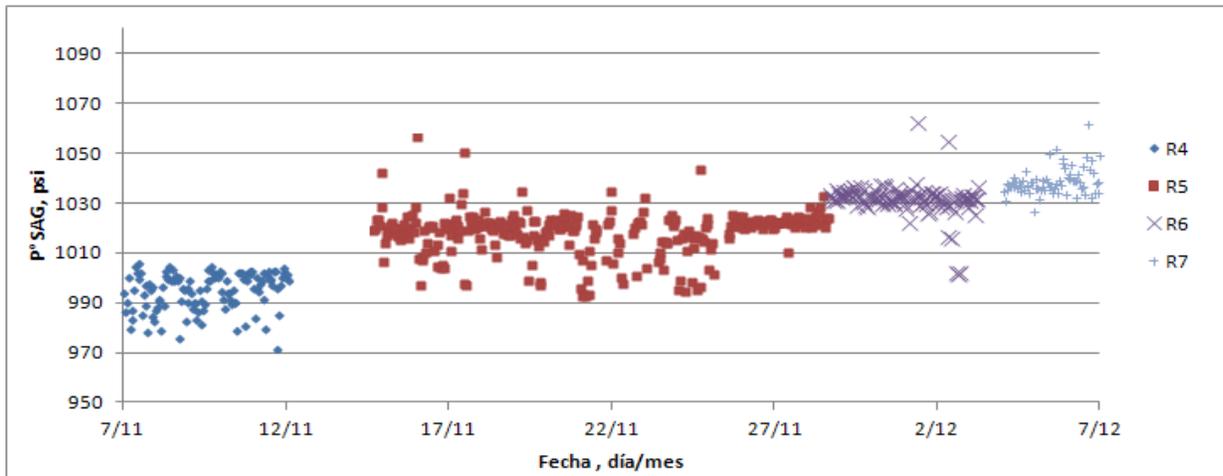


Figura 48. Caracterización de los saltos en el nivel de la presión en los descansos del molino SAG, en el tiempo.

Se identifica, además, que entre cada cambio de nivel de presión al que trabaja el molino SAG, existe una discontinuidad, lo que refleja una ausencia en la medición de los datos que se atribuye directamente a un detenimiento inducido sobre el molino SAG, durante ese lapso de tiempo, luego del cual el molino se halla trabajando a un nivel distinto de la presión en sus descansos. Lo anterior refuerza aún más la idea de que las transiciones evidenciadas en el valor de esta variable, se deben a cambios de las condiciones bajo las que trabaja el molino SAG, inducidos por parte de los operadores.

La hipótesis más fuerte que se maneja para explicar los saltos al alza, evidenciados en la presión (Figura 48), se relaciona con la fracción de llenado con bolas del molino SAG. Cada uno de los niveles de presión en los descansos a los que trabaja el molino SAG, estaría representando un determinado porcentaje de llenado con bolas en el equipo, que por algún motivo se vio modificado. Otra alternativa que se maneja para explicar dichos saltos, corresponde a una posible variación drástica en el tonelaje alimentado al molino SAG, sin embargo, tras un análisis de dicha variable, se comprueba que el tonelaje de alimentación no responde en lo absoluto a las transiciones evidenciadas en las Figuras 47 y 48.

En cuanto a los saltos a la baja, evidenciados en la Figura 47, la hipótesis que se maneja es la de una discontinuidad en la reposición de bolas alimentadas al molino SAG. Manteniendo el mismo rendimiento productivo, lo anterior genera una reducción del nivel de llenado con bolas en el equipo, producto de un desgaste de las bolas de acero que no se compensa con una reposición adecuada de estos medios de molienda. A pesar de ello, la explicación dada es válida sólo para saltos pequeños, como el evidenciado entre R3 y R4 (ver Figura 47), por lo que la brecha que se observa entre R1 y R2, considerablemente mayor, no seguiría la misma lógica. Este último salto no tiene una explicación clara; debido a la discontinuidad en la medición de la presión entre estos rangos (R1 y R2) se presume que dicho salto estaría ligado a labores de mantenimiento del equipo.

Un hecho interesante, que refuerza la hipótesis de los saltos al alza, corresponde al observado en la curva de potencia consumida por el molino SAG en función de la presión medida en sus descansos (ver Figura 49). Los puntos asociados a cada rango de presión predefinido, muestran múltiples y fuertes desplazamientos, manteniendo relativamente su forma, lo que responde, según la teoría y la práctica, a un cambio en la fracción de llenado con bolas a la que opera el molino SAG.

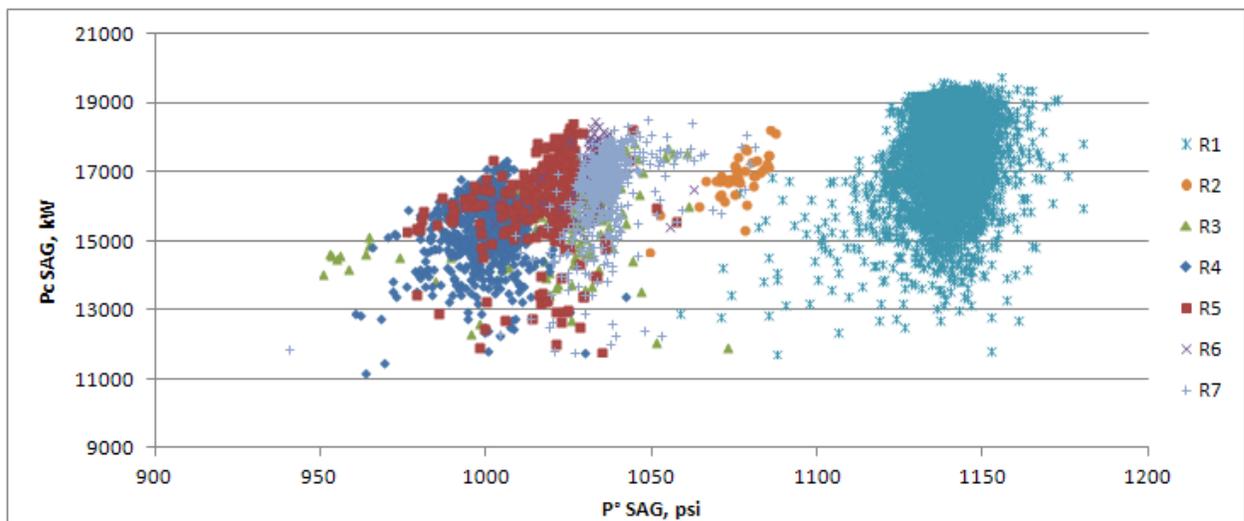


Figura 49. Potencia consumida por el molino SAG en función de la presión en los descansos del mismo.

Lo importante de evidenciar esto, más allá de la explicación que pueda existir, es que el perfil de la planta permite identificar más de una condición operacional en el tiempo. Sumado a lo anterior se halla el fuerte vínculo que existe entre la presión en los descansos del molino SAG y el consumo de potencia del mismo, lo que hace que las correlaciones a establecer deban ser desarrolladas de acuerdo a cada uno de los niveles de presión caracterizados anteriormente (R1, R2, R3, R4, R5, R6 Y R7), definiendo cada uno de estos, un perfil de funcionamiento distinto en el molino SAG.

4.3.2. Consumo de potencia y específico de energía del Molino SAG

Tal como se menciona anteriormente, la granulometría de alimentación al circuito ha manifestado con el paso del tiempo un rol protagónico en el funcionamiento del circuito y en particular del molino SAG. Es por ello que una vez desarrollada la revisión bibliográfica, surge como interés principal evidenciar el efecto de esta variable sobre el perfil de la operación. Dicho esto, la primera relación a establecer corresponde a la de la potencia consumida por el molino SAG en función de la granulometría presente en la alimentación fresca. Para ello, tal como se menciona en el capítulo “Metodología”, es preciso dejar fijas las demás variables que pudiesen estar influyendo en el consumo de potencia del molino SAG, para así no desarrollar conclusiones erradas en torno a comportamientos sesgados.

La variable considerada como independiente o exógena corresponde en este caso a la granulometría de alimentación fresca al circuito, mientras que la variable dependiente, que interesa observar, corresponde a la potencia consumida por el molino SAG (P_c SAG). En este caso es preciso dejar fijo principalmente el tonelaje de alimentación total al molino SAG (tonelaje de alimentación fresca más la tasa de pebbles recirculados) y la velocidad de operación del equipo, ya que son las variables que más influyen en su consumo de potencia. De esta manera se dan las condiciones para observar específicamente el efecto neto de la granulometría sobre la potencia consumida por el molino SAG y se descartan perturbaciones o influencias externas por parte de cualquiera de las variables mencionadas anteriormente.

Si bien sólo se mencionan dos variables a fijar, las demás también influyen en el perfil de la conminución y por ende en el consumo de potencia del molino SAG. A pesar de que su influencia no es tan acentuada como la del caso del tonelaje de alimentación o del N/N_c (%), el resto de las variables generan dispersión en el gráfico y por ende repercuten de manera negativa en la validación de la tendencia identificada.

Tabla 8. Principales variables influyentes en el estudio del P_c SAG (kW) vs la granulometría de la alimentación fresca.

Variables Estudiadas		Principales variables a dejar fijas		
Dependiente	Independiente	Gsa (t/h)	N/Nc (%)	+100# (%)
Pc SAG(kW)	Granulometría (%)	2550-2500	70-71	15-17

Si bien se puede estar reportando una disminución en el consumo de potencia del molino SAG a partir de la granulometría de alimentación, es preciso chequear que aquello no se esté dando de manera paralela con un deterioro en la calidad del producto final. Es factible que la disminución en el consumo de potencia del molino SAG esté relacionada con una mala conminución por parte del equipo y por ende con un perfil granulométrico más grueso del producto. Interesa estudiar las variaciones en el consumo de potencia del molino SAG en función de la granulometría de alimentación, sin que a partir de ello se vea afectada ninguna otra variable en el sistema, es decir, que el molino siga cumpliendo con su rol de conminución entregando la misma calidad en su producto. Por ello es fundamental monitorear y fijar también la granulometría final del circuito de molienda, para comprobar que la calidad del material se mantenga a un mismo nivel y que la variación en el consumo de potencia del molino SAG sea válida, de acuerdo a lo discutido anteriormente.

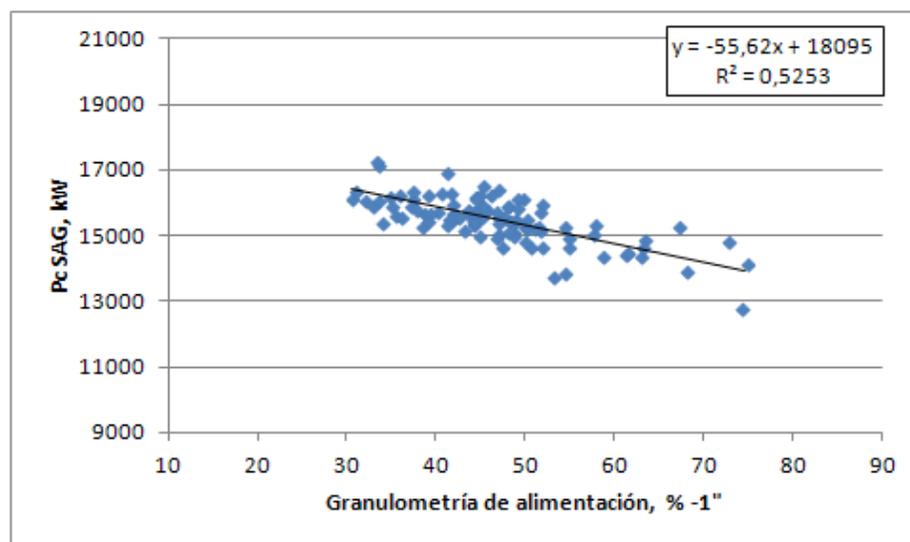


Figura 50. Potencia consumida por el molino SAG en función del % -1" presente en la alimentación fresca.

En el gráfico de la Figura 50 se aprecia la influencia positiva ejercida por la granulometría fina sobre la potencia consumida por el molino SAG. Un incremento de la granulometría fina en el tonelaje de alimentación, hace que el tiempo requerido para la molienda de la carga disminuya. Lo anterior genera una reducción en el tiempo de residencia de la pulpa al interior del molino, haciendo que el material abandone el equipo a mayor velocidad.

Respecto a lo comentado en el párrafo anterior, la hipótesis que se maneja es que la granulometría debiese repercutir directamente en el nivel de llenado del molino; considerando que se mantienen constantes tanto el tonelaje de alimentación al molino como el nivel de llenado con bolas del mismo, J_b (%), la fracción de llenado con mineral debiese irse reduciendo en el tiempo, y con ello el nivel de llenado total del molino, lo que generaría un efecto directo en la potencia consumida por el molino SAG, reduciéndola.

El efecto en el nivel de llenado, discutido anteriormente, se debería apreciar a través de la presión en los descansos del molino SAG; en este caso tendría lugar una tendencia similar a la del gráfico de la Figura 50, pero para la presión en los descansos en función de la granulometría de alimentación fresca. A pesar de lo comentado, no hay certeza respecto a este resultado, debido a que la presión en los descansos del molino SAG no es un referente completamente preciso de su nivel de llenado total. Lo anterior se debe a que en el peso del equipo intervienen una variedad de parámetros (densidad del mineral, $C_p(\%)$ de la pulpa, nivel de bolas, granulometría alimentada, entre otras) que alteran directamente la presión medida en los descansos, incluso cuando el nivel de llenado total del equipo se mantiene invariante. Posteriormente en este capítulo, se verifica el efecto de la granulometría sobre la presión medida en los descansos, para evidenciar si dicho efecto se responde con lo observado en la Figura 50.

Otro efecto que ayuda a explicar el comportamiento de la Figura 50, corresponde al que ejerce la granulometría fina sobre el factor de empuje de la pulpa. El porcentaje de finos adicionados al molino resulta beneficioso para el transporte de la pulpa en su interior, incrementando el efecto de empuje que en ésta se da y mejorando la tasa de evacuación del producto molido. Con un incremento de la granulometría bajo 1" se logra intensificar el efecto de empuje, lo que hace que la pulpa se desplace más velozmente hacia las parrillas de descarga del molino SAG. Dado que se tiene un mismo nivel de flujo alimentado, lo anterior debería ejercer nuevamente una disminución en el nivel de llenado total del molino (vaciado) con las consecuencias pertinentes (reducción) sobre la potencia consumida.

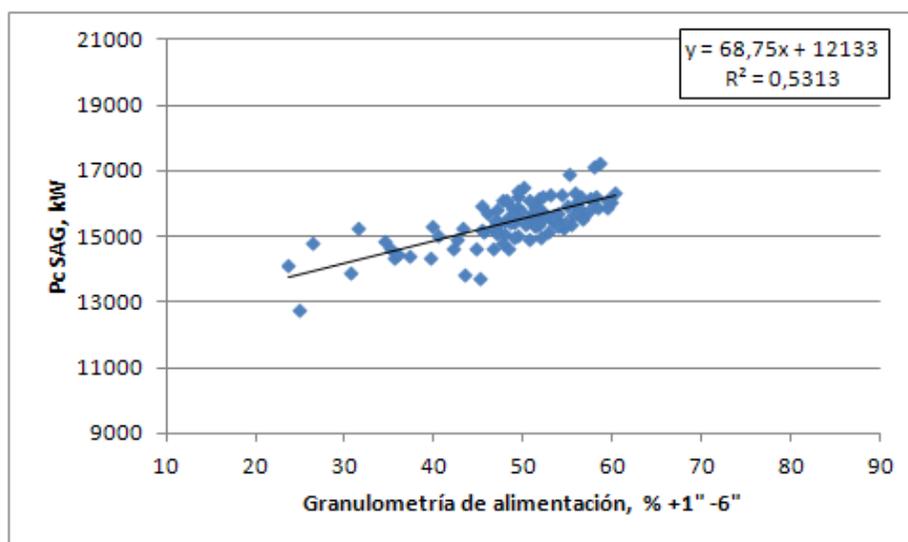


Figura 51. Potencia consumida por el molino SAG en función del % +1" -6" presente en la alimentación fresca.

En cuanto a la granulometría intermedia, el efecto sobre la potencia (ver Figura 51) es inverso al de la granulometría fina. El porcentaje de la alimentación acumulado +1” -6” ejerce un efecto adverso en el consumo de potencia del molino SAG, por cuanto a este rango se encuentra asociada la denominada granulometría de “tamaño crítico” (+1” -3”) o pebbles, los que presentan un alto grado de oposición a la molienda. Dado que la velocidad de fractura, para este rango de tamaños, es extremadamente baja, dicha granulometría tenderá a acumularse dentro del molino. A pesar de que los pebbles son evacuados del equipo precisamente para evitar este tipo de situaciones, el sobre llenado del molino con este material se mantiene, debido a la generación o nacimiento de pebbles dentro del equipo y a la ineficiencia en su mecanismo de evacuación.

El sistema de evacuación de pebbles, para el caso de la planta estudiada, se realiza a través de las parrillas de descarga del molino SAG. Esto hace que la evacuación del tamaño crítico no se logre de manera completamente eficiente, es decir, que no toda la carga de pebbles alimentados sea descargada en un mismo instante e incluso que parte de la misma permanezca dentro del molino SAG, conllevando a un incremento de la carga interna del equipo. A esto se suma el nacimiento de pebbles comentado anteriormente, producto del astillamiento y la abrasión de partículas superiores a 3”, que adquieren esfericidad y terminan formando parte de la granulometría de tamaño crítico al interior del molino SAG.

Lo anterior genera un sobrellenado con material de tamaño crítico en el molino SAG; dado que el flujo de alimentación se mantiene constante, su fracción de llenado total tiende a incrementar. Mientras mayor sea la presencia de granulometría intermedia en la alimentación fresca, mayor será el nivel de llenado alcanzado para un mismo tonelaje, acentuando aun más el consumo de potencia por parte del equipo. Lo anterior hace que sea esta granulometría, la intermedia, la que resulta perjudicial para el molino SAG, volviéndose vital establecer un control dinámico sobre la misma.

Con los gráficos anteriormente desarrollados se comprueba la fuerte influencia de la granulometría sobre el consumo de potencia del molino SAG y entonces en su perfil de funcionamiento. A pesar de que los diversos estudios sólo consideran a estos dos rangos granulométricos (fino e intermedio) como los más influyentes dentro del equipo de molienda, se adiciona en este caso, con fines complementarios, la influencia de la granulometría gruesa en el consumo de potencia del molino SAG.

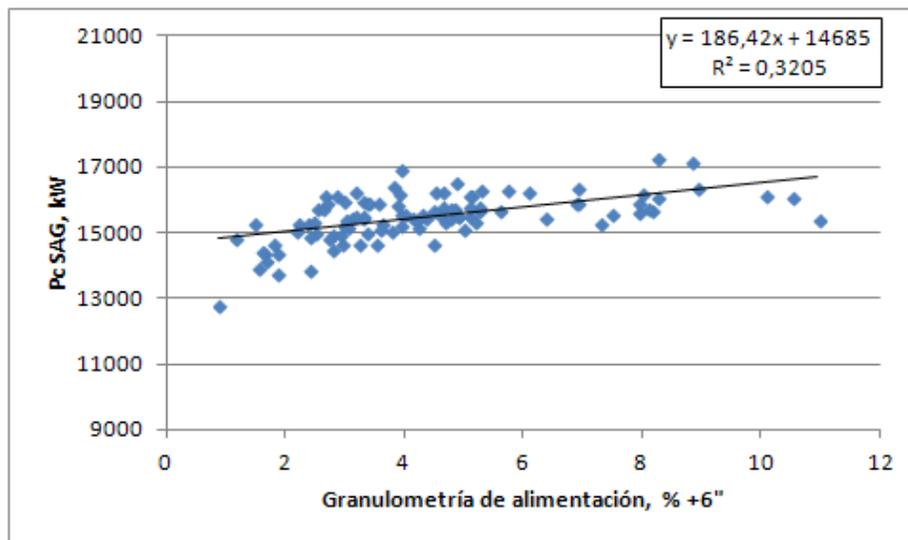


Figura 52. Potencia consumida por el molino SAG en función del % +6'' presente en la alimentación fresca.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 52, existe una leve tendencia para la granulometría gruesa sobre la potencia, similar a la reportada para el caso de la granulometría intermedia (pendiente positiva). A pesar de ello, el bajo coeficiente de correlación que se da para este tamaño de partículas, que sólo explica un 32% de los datos, refleja la poca influencia de esta granulometría, por lo que se descarta su utilización como objeto de estudio.

Por otra parte, es sabido que la presencia de la granulometría gruesa, como medio de molienda, es fundamental al complementar a las bolas de acero, por lo que a pesar del efecto observado sobre la potencia consumida (negativo para este caso), la regulación de ésta y la definición de un rango óptimo, no puede depender meramente del consumo de potencia en el molino; se deben considerar de manera paralela o incluso con mayor grado de importancia, otras variables, en particular el nivel de bolas al que se encuentra trabajando el molino SAG. Si éste se viese disminuido respecto a la condición definida por la operación, se requerirá de un incremento de la granulometría gruesa, que pueda remplazar aquel déficit en la fracción de llenado con bolas en el molino.

Al igual que en el caso de la potencia consumida por el molino SAG, es necesario estudiar el efecto de la granulometría en el consumo específico de energía del molino Semiautógeno. Si bien un mejor índice hubiese sido el consumo específico de energía del circuito completo, en éste intervienen las potencias de los dos molinos de bolas, las cuales no varían considerablemente durante la operación, por lo que la incidencia de las granulometrías se hubiese visto disminuida, por lo menos gráficamente, mientras que en el molino SAG el efecto es directo, por ende es posible identificar cambios más acentuados en la gráfica que se desea evaluar.

A pesar de que se espera evidenciar un efecto de la granulometría sobre el CEE.SAG (kWh/t) homólogo al descrito para el caso de la potencia consumida por el molino, en su magnitud influye directamente el tonelaje de alimentación fresca, debido a lo cual existe una influencia adicional que pudiese estar generando cambios inoportunos respecto a los resultados que se esperan obtener, sesgando el estudio de este índice en función de la granulometría presente en la alimentación fresca.

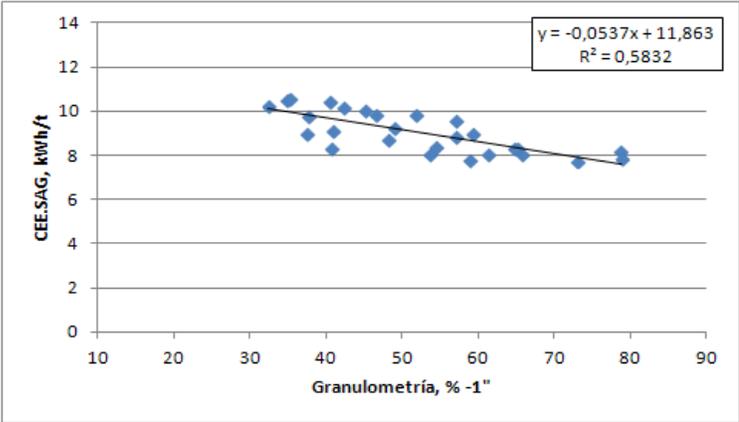


Figura 53. Consumo específico de energía del molino SAG en función del % -1” presente en la alimentación fresca.

De acuerdo al último gráfico, se corrobora el comportamiento ofrecido por la potencia consumida en función de la granulometría fina. Lo que se observa en el gráfico de la Figura 53, es que para un mismo tonelaje de alimentación fresca, el molino SAG requiere de menos potencia para moler la misma unidad de flujo másico que ingresa al circuito, si en la alimentación fresca hay un mayor porcentaje de granulometría -1”. Dicho de otra manera, para una misma cantidad de potencia consumida por el molino SAG, un perfil granulométrico más fino en la alimentación, incrementa la capacidad del equipo, permitiéndole procesar un mayor flujo de alimentación fresca.

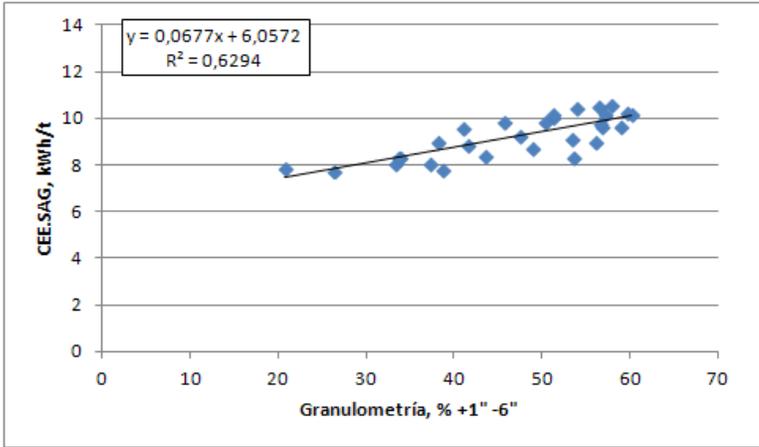


Figura 54. Consumo específico de energía del molino SAG en función del % +1” -6” presente en la alimentación fresca.

La tendencia que se observa para el caso de la granulometría intermedia es lógica. Al presentar la alimentación fresca un mayor porcentaje de esta granulometría (+1” -6”), el molino SAG debe incrementar su consumo de potencia para seguir moliendo la misma unidad de flujo másico y entonces mantener su rendimiento productivo constante.

De acuerdo a lo anterior, el incremento del porcentaje de granulometría intermedia en la alimentación al circuito reduce la capacidad de tratamiento del mismo, para un mismo consumo de potencia por parte del molino SAG. En la medida que la presencia de esta granulometría se acentúe en la alimentación fresca, los requerimientos de potencia por parte del molino SAG se incrementarán para mantener el rendimiento productivo en la planta.

Dado que anteriormente se pudo evidenciar la poca influencia de la granulometría gruesa en el consumo de potencia del molino SAG, no se adiciona el gráfico del CEE.SAG (kWh/t) en función a dicho rango granulométrico.

4.3.3. Presión en los Descansos del Molino SAG

Para confirmar la hipótesis que se maneja, acerca de que la granulometría influye en la potencia consumida por el molino SAG a través de su fracción de llenado total (incrementándolo o disminuyéndolo), se estudia a continuación el nivel de la presión medida en los descansos del molino SAG en función a los dos rangos granulométricos de interés, fino e intermedio. Como se menciona anteriormente, la granulometría gruesa no constituye objeto de estudio, por lo que se descarta el análisis de su influencia sobre la presión en los descansos del molino SAG.

Cabe reiterar que se asume a la variable “Presión en los Descansos” del molino SAG como una buena representante del nivel de llenado total del equipo, aun cuando se ha indicado que dicho parámetro no es un representante completamente directo ni preciso. A pesar de ello y del posible sesgo que se pueda dar sobre esta variable, el identificar una tendencia lógica respecto a la hipótesis planteada, es suficiente para contribuir al respaldo y ratificación de la teoría que se maneja.

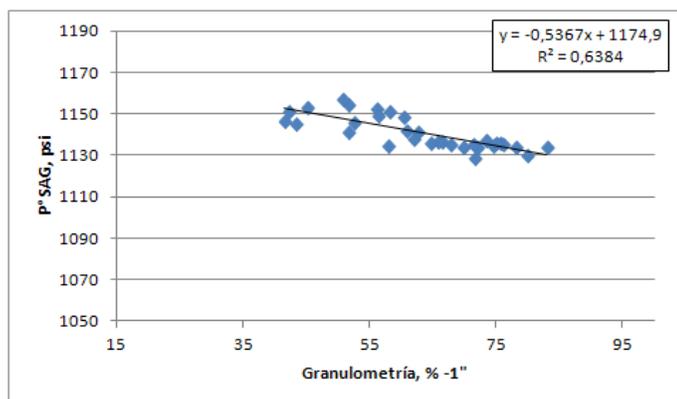


Figura 55. Presión en los descansos del molino SAG en función del % -1" presente en la alimentación fresca.

Como se aprecia en la Figura 55, la granulometría fina contribuye a la disminución de la presión en los descansos del molino SAG, en la medida que se incrementa su presencia en la alimentación fresca al circuito. Lo anterior ayuda a confirmar la suposición de que esta granulometría incide en el nivel de llenado total del molino SAG, provocando con ello la disminución en el consumo de potencia del equipo, evidenciado anteriormente.

A pesar de que el efecto no es tan acentuado (pendiente relativamente baja), la tendencia es clara y se encuentra abalada por un coeficiente de correlación superior al 50%, lo que se considera un buen indicador de correlación, tomando en cuenta que la presión en los descansos del molino SAG sufre de una alta dispersión, producto de la influencia de otras variables en el sistema.

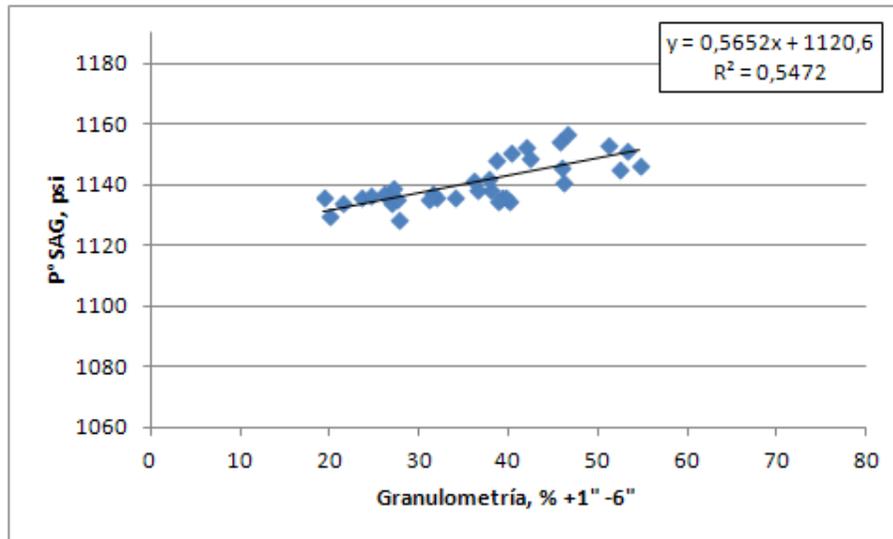


Figura 56. Presión en los descansos del molino SAG en función del % +1" -6" presente en la alimentación fresca.

Tal como se menciona anteriormente, es precisamente la granulometría intermedia la que contribuye fuertemente al incremento en el nivel de llenado del molino SAG. El aumento de la presión medida en los descansos, que se observa en la Figura 56, es una clara representación de que, a un flujo de alimentación constante al molino SAG, el incrementar la granulometría intermedia en la alimentación fresca repercute negativamente, sobrellenando el molino con mineral y por ende aumentando su peso o la presión medida en sus descansos. En el tiempo, la presión alcanzará un valor máximo que no podrá ser superado, debido a lo cual la alimentación fresca al circuito deberá reducirse, para no superar la capacidad de potencia máxima consumida por el molino SAG.

Finalmente es claro que ambas granulometrías, tanto la fina como la intermedia, poseen un efecto directo en el nivel de llenado del molino SAG y por ende repercuten en la potencia que el equipo consume para llevar a cabo la conminución del mineral. Es por ello que los esfuerzos destinados hacia la optimización del circuito y del molino SAG, deben estar enfocados en un manejo y control exhaustivo de la granulometría presente en la alimentación fresca.

4.3.4. Granulometría del producto final del circuito de molienda

La tendencia actual de la minería del cobre se encuentra orientada a la maximización del rendimiento productivo de mineral tratado. Este hecho ha generado que las medidas y políticas desarrolladas en la planta de molienda, se basen preferentemente en el cumplimiento de las altas demandas productivas. La priorización del tonelaje de alimentación que ingresa a la planta de molienda, ha conllevado a un deterioro en la calidad del producto final, registrándose un perfil granulométrico más grueso en éste. La granulometría de dicho producto determina la calidad del proceso de molienda, pero aún más el éxito de los procesos de concentración que se desarrollarán posteriormente (flotación). Es debido a lo anterior que una optimización de la planta de molienda no puede ser plausible si no se considera, de manera paralela, un control en el perfil granulométrico del producto enviado a flotación.

El hecho de invertir en una mayor cantidad de potencia consumida por el molino SAG, para procesar el mismo tonelaje de alimentación, necesariamente debe repercutir en el producto molido. En particular, el incrementar el CEE.SAG (kWh/t) manteniendo el rendimiento productivo de la planta, debiese generar un efecto positivo en la granulometría del producto obtenido. Manteniendo las mismas condiciones globales de la operación, lo anterior debería reflejarse a través de una disminución en la granulometría final del circuito de molienda.

En base a lo anterior, el poder establecer el perfil energético/productivo del molino SAG que define de manera paralela la calidad o granulometría alcanzada en el producto final, es fundamental para la optimización de la operación, debido a que, de acuerdo a lo discutido, interesa saber hasta dónde es posible maximizar la capacidad productiva del circuito de molienda, manteniendo la calidad del producto final.

El interés está dado en establecer un vínculo entre el consumo específico de energía del molino SAG y la granulometría final del circuito de molienda, identificando la tendencia presente para determinar cuál debiese ser la demanda productiva o rango operacional para el molino SAG, que permita cumplir con la granulometría final demandada.

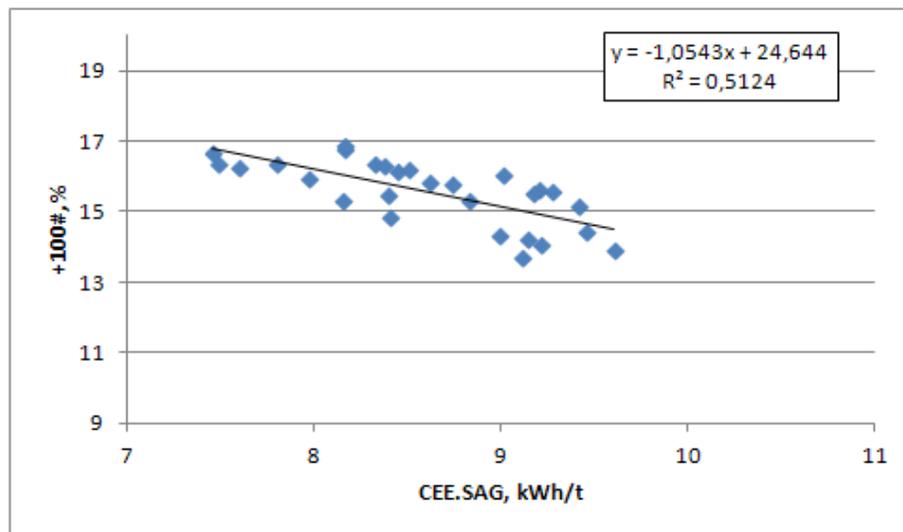


Figura 57. Porcentaje sobre 100# en el producto final del circuito de molienda en función del CEE.SAG (kWh/t).

Al establecer el vínculo entre ambas variables, se obtiene el gráfico de la Figura 57. Se observa una tendencia lineal, caracterizada por una pendiente negativa, lo que indica que mientras mayor es el consumo específico de energía asociado al molino SAG, la granulometría del producto final o el porcentaje sobre las 100# en el Overflow de los hidrociclones, disminuye. Lo anterior confirma el hecho de que invertir en un mayor consumo de potencia en el molino SAG, sobre el mismo flujo de mineral tratado, resulta beneficioso para la calidad del producto final, de acuerdo a la pendiente del último gráfico.

El gráfico de la Figura 57 es fundamental, por cuanto permite estimar, para un mismo consumo de potencia y granulometría de alimentación al molino SAG, en cuánto es posible incrementar el tonelaje de alimentación fresca, con tal de no superar un determinado rango o valor demandado para la granulometría final.

Si del circuito de molienda se obtiene una granulometría más gruesa que la demandada, es preciso tomar las medidas pertinentes con tal de recuperar la calidad en el producto final. En el caso de no poder incrementar el consumo de potencia por parte del molino SAG, ya que su capacidad máxima fue alcanzada, la medida a adoptar debiese ser una reducción en el tonelaje de alimentación fresca. Lo que se logra con esto, manteniendo el consumo de potencia del molino SAG, es un incremento en el CEE.SAG (kWh/t), lo que conlleva a un producto final de granulometría más fina (disminución del % +100#). Esto debería llevarse a cabo sólo hasta alcanzar la granulometría objetivo, recuperando la calidad en el producto de molienda, para no reducir sobremanera el tonelaje y perjudicar el rendimiento productivo de la planta más de lo necesario.

De acuerdo a la misma curva (ver Figura 57) y el escenario planteado en el párrafo anterior (deterioro en la calidad del producto final), se evalúa el caso en el que el tonelaje de alimentación fresca no se puede reducir. El análisis de dicho escenario es fundamental, por cuanto constituye un caso que suele darse durante operación; además, en ésta interesa poco reducir el tonelaje de alimentación fresca al circuito, ya que aquello perjudica la capacidad productiva de la planta. La medida a adoptar, en pro de recuperar la calidad del producto final, correspondería a la de un incremento en el consumo de potencia por parte del molino SAG (si el equipo lo permite).

Para consolidar un incremento en la potencia consumida por el molino SAG, se puede incrementar la velocidad de rotación del equipo, N/N_c (%). Si bien esto genera un aporte desde el punto de vista de la conminución, se requiere de un análisis para establecer hasta qué nivel del N/N_c (%) un incremento en su magnitud se vuelve beneficioso, ya que la velocidad de operación del molino puede repercutir de manera adversa en la conminución del mineral, una vez superado cierto valor (según la teoría alrededor del 85-90%).

Otra medida recomendada para incrementar la potencia consumida por el molino SAG, se encuentra asociada a la fracción de llenado con bolas del equipo. Mayores niveles de J_b (%) generan un incremento directo del consumo de potencia del molino, de la presión en sus descansos (asumiendo que el nivel de llenado con mineral dentro del equipo se mantiene constante) y de la calidad del producto obtenido por el molino SAG.

A pesar de lo anterior, prácticas como el incremento en el nivel de llenado con bolas del molino SAG requieren de un estudio aún más profundo, por cuanto dicha medida repercute directamente en los costos operacionales ligados a la molienda, particularmente en el consumo de aceros, incrementándolo. En este caso es necesario desarrollar un análisis costo-beneficio de la situación.

4.3.5. *Pebbles*

Otra variable que afecta sobremanera en la operación, corresponde a la presencia de pebbles en el circuito de molienda. El objetivo de la plantas es reducir en la medida de lo posible la presencia de los pebbles dentro del molino SAG, ya que estos sólo repercuten de manera negativa en el equipo y el circuito, representando una carga circulante que acota la capacidad productiva de la planta de molienda. La reducción de este material de tamaño crítico se orienta hacia dos fuentes: la alimentación y la generación o el nacimiento de pebbles.

Por una parte se desea reducir la alimentación de material de tamaño crítico al molino SAG, por cuanto éste tenderá a acumularse dentro del equipo, conllevando a un sobre llenado. Por otra parte, aun cuando se pueda evitar de manera completa el ingreso de partículas de tamaño crítico al molino SAG, la presencia de pebbles en el circuito se mantendrá, debido a la generación de los mismos al interior del molino, a partir de la atrición de colpas de tamaño mayor a 3". En base a lo anterior, la manera de abordar la presencia de pebbles dentro del circuito para reducirla al máximo, es evitando su alimentación (granulometría de entrada) y su generación dentro del molino, siendo esta última medida la más compleja de llevar a cabo.

Dado que para la base de datos analizada (DB.M1) no se cuenta con los elementos para determinar la cantidad de pebbles que se generan al interior del molino SAG, los esfuerzos para reducir su presencia en el circuito se concentran en la alimentación de tamaño crítico al circuito. Respecto a este último punto no se cuenta con la información ideal, ya que el rango de "granulometría intermedia" con el que se trabaja en este estudio corresponde al intervalo +1" -6", mientras que el rango de tamaño crítico corresponde al porcentaje +1" -3". Dado que se desconoce la distribución de tamaños dentro del rango de granulometría intermedia, +1" -6", no es posible conocer la fracción efectiva de tamaño crítico o pebbles que se alimentan al molino SAG para el circuito analizado.

A pesar de la limitante discutida en el párrafo anterior, se estudia el comportamiento de los pebbles evacuados del molino SAG, en función de los tres rangos granulométricos presentes en la alimentación fresca. El establecer una relación entre la granulometría de alimentación y la tasa de pebbles evacuados del molino es fundamental para prevenir y reducir la acumulación de este material dentro del equipo, por ende cualquier tipo de medida en este contexto aporta también al control del nivel de llenado y en consecuencia del consumo de potencia del molino SAG.

De la operación se cuenta con la medida del flujo másico de pebbles evacuados por el molino SAG, esto es, el tonelaje del producto del molino SAG, cuyo tamaño se halla bajo la abertura de la parrilla del equipo y sobre la malla de corte del harnero que recibe el producto molido. El flujo de pebbles evacuados estará constituido por pebbles alimentados (que no pudieron molerse) y por pebbles generados dentro del molino.

La variable que se busca observar, en función de la granulometría, corresponde a los pebbles evacuados como porcentaje respecto al flujo másico de alimentación fresca, debido a que al ponderar por el tonelaje de alimentación se descarta cualquier influencia por parte de la magnitud de este flujo sobre los pebbles evacuados.

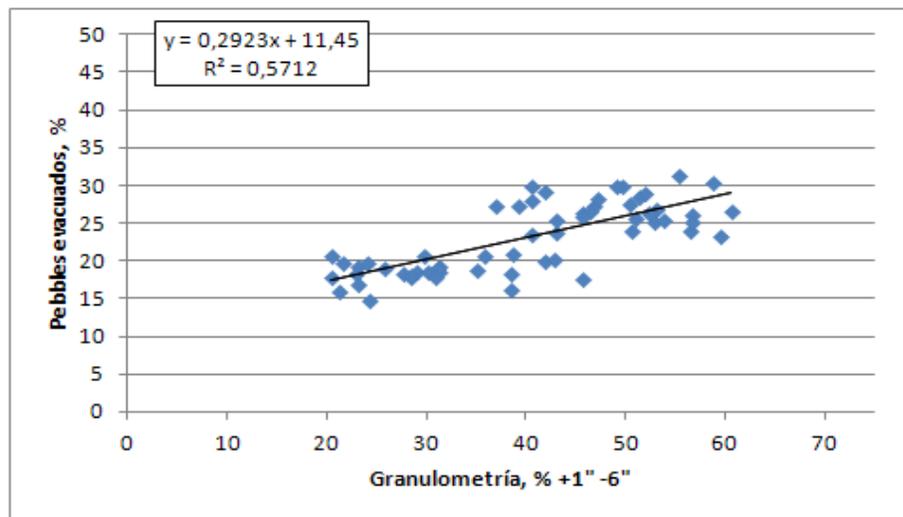


Figura 58. % de pebbles evacuados, respecto a la alimentación fresca, en función del % +1" -6" presente en la misma.

En el gráfico de la Figura 58 se aprecia una influencia directa, por parte de la granulometría intermedia, hacia el incremento en el porcentaje de pebbles evacuados por el molino SAG. A pesar de que este rango granulométrico, como se menciona anteriormente, no corresponde específicamente a lo que se denomina “tamaño crítico”, su influencia es clara y un incremento del mismo repercute negativamente en el circuito, incrementando la tasa de pebbles que son recirculados. Por lo demás, dado que en dicho rango granulométrico se encuentran partículas sobre las 3”, éste aporta al nacimiento de pebbles dentro del molino, por lo que la tasa de pebbles evacuados tiene un vínculo aún mayor con la variable del eje “X” o granulometría intermedia.

En consecuencia, el reducir la granulometría intermedia en la alimentación fresca previene la acumulación de material de tamaño crítico dentro del molino, pero además genera una reducción en la tasa de pebbles evacuados desde el mismo, disminuyendo directamente el tonelaje de pebbles chancados y recirculados al molino SAG. Lo anterior es fundamental, debido a que una menor tasa de pebbles recirculados al molino, manteniendo las mismas condiciones operacionales, le permite a éste tratar un mayor flujo de alimentación fresca, incrementando la capacidad productiva global del circuito.

A modo de aclarar lo discutido en el párrafo anterior, se monta una figura explicativa de la recirculación de pebbles al molino SAG (ver Figura 59).

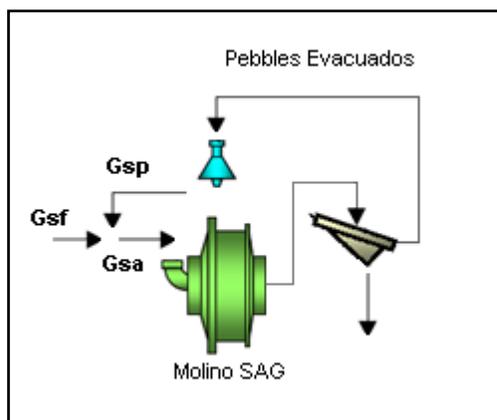


Figura 59. Esquema de la recirculación de pebbles al molino SAG y los flujos asociados.

Como se observa en la Figura 59, el tonelaje total alimentado al molino SAG (G_{sa}) será la suma de la alimentación fresca, G_{sf} (t/h), más la recirculación de los pebbles ya chancados, G_{sp} (t/h). Si se asume que el molino trabaja a su máxima capacidad de manera constante, caracterizada por un flujo de alimentación “ G_{sa} ”, los flujos G_{sf} y G_{sp} deberían controlarse de manera tal de mantener dicha capacidad máxima invariante en el tiempo, por lo que la disminución de cualquiera de estas componentes genera un incremento directo sobre el flujo complementario. Consecuentemente, una disminución en el flujo de pebbles recirculados, G_{sp} , genera un incremento directo en el tonelaje de alimentación fresca, G_{sf} , consolidando una mayor capacidad productiva para el circuito de molienda.

A modo de verificar si lo comentado es precisamente lo que se da para el actual caso de estudio, se observa el tonelaje de alimentación fresca en función del tonelaje de pebbles recirculados (ver Figura 60).

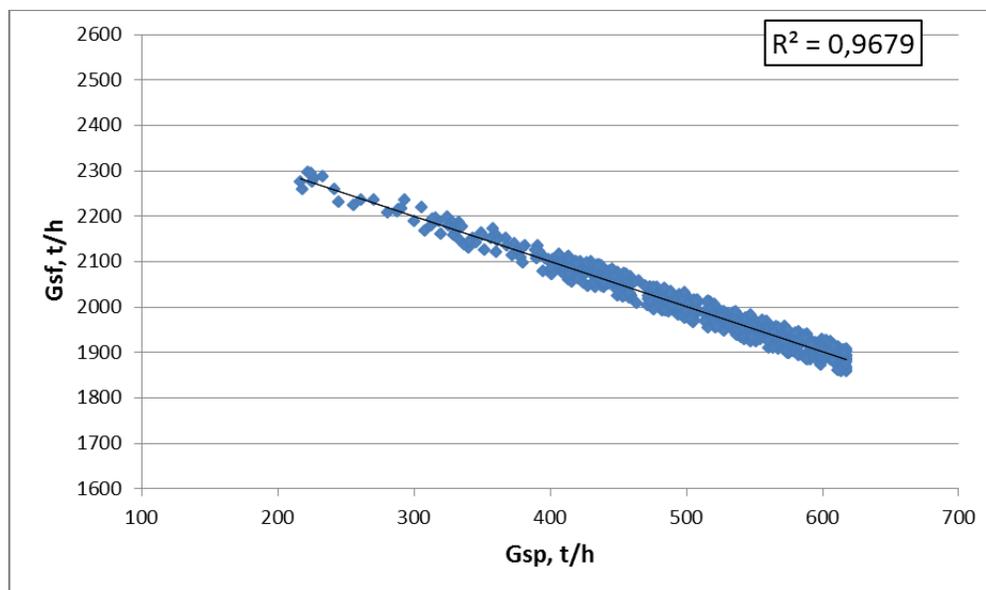


Figura 60. Tonelaje de alimentación fresca en función del tonelaje de pebbles recirculados.

En el gráfico de la Figura 60 se observa la tendencia que se da para la alimentación fresca en función del tonelaje de pebbles recirculados. El comportamiento es claro y ratifica el análisis desarrollado anteriormente, en donde una mayor tasa de pebbles recirculados reduce directamente el tonelaje de alimentación fresca a la planta, Gsf, repercutiendo negativamente en la operación.

En cuanto a los otros dos rangos granulométricos, tanto el fino como el grueso muestran un efecto disperso y errático sobre la tasa de pebbles evacuados, opuesto al de la granulometría intermedia y que no entrega información, por lo que no se incluyen los gráficos de estas dos granulometrías. El resultado no es preocupante para efectos del estudio de los pebbles, por lo que se recomienda concentrar los esfuerzos hacia la reducción de la granulometría +1” -6” presente en la alimentación fresca, que es la que definitivamente afecta a esta variable.

Luego del análisis desarrollado, se hace posible establecer un control sobre la tasa de pebbles evacuados por el molino SAG, de manera de no sobrepasar un límite dado. Además, esta operación cuenta con la posibilidad de enviar los pebbles chancados hacia el molino SAG (circuito SABC-A) o bien hacia molienda de bolas (circuito SABC-B), de manera que dependiendo de los intereses, de la capacidad de tratamiento de los equipos y de su disponibilidad, se adoptará la configuración correspondiente.

Respecto a esto último, si bien no se ha mencionado anteriormente, la capacidad del chancador de pebbles es fundamental. Al estar este equipo acotado a un tonelaje máximo, el molino SAG no debiese evacuar un flujo de pebbles mayor a dicho tonelaje; de lo contrario habrían problemas y algunos de los pebbles evacuados no podrían ser enviados al chancador ni menos a los molinos. En este caso la práctica habitual es simplemente botar al piso el exceso de pebbles que el chancador no es capaz de procesar.

En definitiva el interés debiese estar siempre concentrado en la reducción de los pebbles alimentados al circuito, lo que sumado al efecto negativo de la granulometría intermedia en la potencia consumida por el molino SAG y el consumo específico de energía del mismo, hacen que el parámetro de control que adquiere mayor relevancia hasta el momento sea el porcentaje de granulometría intermedia, +1” -6”, presente en la alimentación al circuito de molienda.

Dado que ya se observó el efecto de los pebbles sobre el rendimiento productivo del circuito, es preciso desarrollar lo propio sobre el rendimiento energético del mismo. La incidencia de los pebbles se ve reflejada de manera más directa en el molino SAG, razón por la cual se estudia la influencia de los pebbles recirculados sobre el consumo específico de energía del molino Semiautógeno. A priori y según lo señalado, se espera evidenciar un efecto negativo de la recirculación de pebbles al molino, debido a que aquello, tal como se demostró anteriormente, reduce el tonelaje de alimentación fresca.

Si se considera que la potencia consumida por el molino SAG no se ve afectada por los pebbles recirculados, lo mencionado en el párrafo anterior implicaría un efecto incremental y sostenido de los pebbles sobre el consumo específico de energía del equipo, sin embargo, se desconoce cómo evoluciona el consumo de potencia en función de los pebbles recirculados al molino SAG, por lo que se requiere de un análisis gráfico que pueda dar cuenta de su efecto.

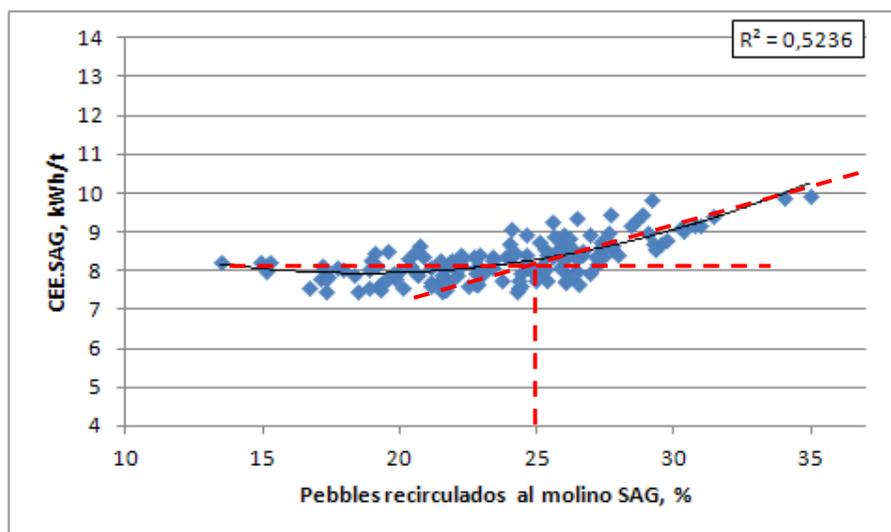


Figura 61. CEE.SAG (kWh/t) en función del porcentaje de pebbles recirculados, respecto a la alimentación fresca.

En la Figura 61 se comprueba la tendencia hacia el incremento del CEE.SAG (kWh/t) con el porcentaje de pebbles recirculados, que se manejaba anteriormente. A pesar de ello, se puede observar que hasta un determinado porcentaje de pebbles recirculados, cercano al 25%, la tendencia de la nube de dispersión se encuentra caracterizada por una pendiente extremadamente baja, adquiriendo una orientación prácticamente horizontal y reflejando, por ende, una escasa influencia de los pebbles recirculados sobre el CEE.SAG (kWh/t). Posteriormente, para valores en el eje “X” superiores al 25%, se evidencia una curva de pendiente positiva, que refleja un efecto incremental de los pebbles recirculados sobre la magnitud del consumo específico de energía del molino SAG.

La razón por la cual el incremento en el CEE.SAG (kWh/t) no se da desde un inicio, reside en las componentes de este índice. Como se demostró anteriormente, el porcentaje de pebbles recirculados influye de manera directa e inversa sobre la alimentación fresca al circuito, por lo que es claro que la sección de pendiente nula, evidenciada en el gráfico de la Figura 61, no se encuentra asociada a la variable de tonelaje y por ende recae sobre el consumo de potencia del molino SAG. Para evidenciar este supuesto y establecer cuál es el efecto de los pebbles recirculados sobre la potencia consumida por el molino SAG, se desarrolla el gráfico de dispersión para estas dos variables. Cabe señalar que las variables de mayor interés a dejar fijas para analizar esta relación, corresponden al tonelaje de alimentación al molino SAG y la granulometría presente en la alimentación fresca.

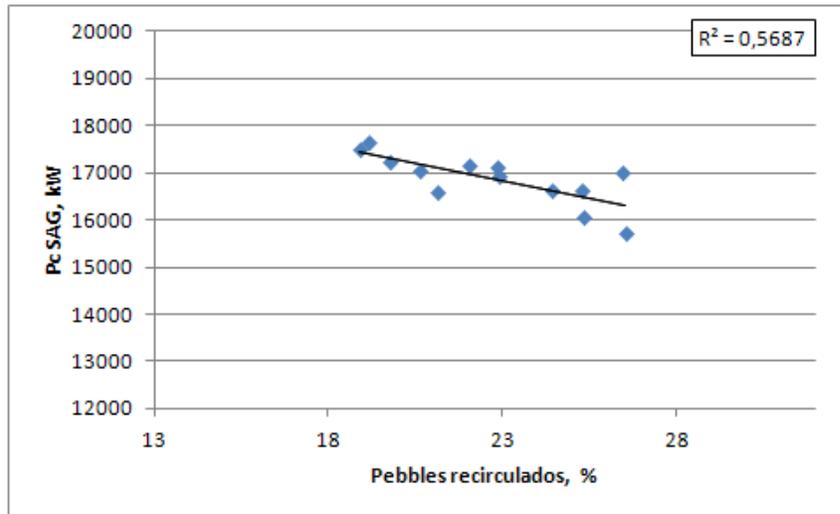


Figura 62. Potencia consumida por el molino SAG en función del % de pebbles recirculados respecto a la alimentación fresca.

Como se observa en el gráfico de la Figura 62, los pebbles recirculados repercuten de manera positiva en la potencia consumida por el molino SAG. Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, los pebbles no representan más que un flujo indeseado, debido a su influencia negativa en el funcionamiento del circuito, por lo que el resultado de la Figura 62 podría parecer contradictorio, pero aquello tiene una explicación lógica y consecuente con los resultados de este estudio.

Los pebbles evacuados por el molino SAG, que son chancados, se suelen triturar en un chancador de pebbles cuyo setting de descarga es de ½". En particular para la planta en estudio, en la operación se busca generar un producto del chancado de pebbles con una granulometría 100% bajo media pulgada. De acuerdo a las categorías de tamaños definidas inicialmente para este trabajo, el flujo de pebbles chancados formaría parte de lo que constituye la granulometría fina (bajo 1"). Fijando la granulometría de alimentación fresca constante, un incremento en el porcentaje de pebbles recirculados (chancados), genera de manera directa un incremento en el porcentaje de granulometría fina total que ingresa al molino SAG.

Lo anterior se debe a que al porcentaje de finos asociados a la alimentación fresca, hay que adicionarle el aporte de granulometría fina proveniente de los pebbles chancados, por lo que un incremento en el porcentaje de pebbles recirculados, a un tonelaje fijo y granulometría de alimentación al circuito constante, genera un efecto homólogo en la fracción de granulometría fina que ingresa al molino SAG.

Con el fin de aclarar lo explicado en el párrafo anterior, se presenta a continuación (ver Tabla 9) un ejemplo numérico. Cabe reiterar que cuando se habla de “pebbles” como porcentaje, sean evacuados o recirculados, la referencia considerada corresponde siempre a la alimentación fresca.

Tabla 9. Incidencia de la recirculación de pebbles en la granulometría efectiva de alimentación al molino SAG.

Caso	Alimentación Fresca		Pebbles Recirculados (t/h)	Pebbles Recirculados (%)	Alimentación al molino SAG	
	Tonelaje (t/h)	-1” (%)			Tonelaje (t/h)	-1” (%)
1	2200	40	264	12	2464	46
2	2200	40	506	23	2706	51

Como se puede observar en el ejemplo de la tabla anterior, manteniendo un flujo de alimentación fresca constante, el incremento en el porcentaje de pebbles recirculados, entre el caso 1 y 2, repercute en la fracción de granulometría fina que se alimenta al molino SAG, sin que la granulometría en la alimentación fresca se haya visto modificada. El efecto hubiese sido el mismo si se dejara constante el tonelaje de alimentación al molino SAG. Cabe mencionar que para el ejemplo de la Tabla 9 se asume que el resto de las granulometrías, intermedia y gruesa, se mantienen constantes en la alimentación fresca.

Como se evidenció anteriormente, un perfil granulométrico más fino en la alimentación fresca, tiende a reducir el consumo de potencia del molino SAG, para un tonelaje de alimentación dado. Consecuentemente y de acuerdo a la Tabla 9, un incremento en el porcentaje de pebbles recirculados, a una granulometría de alimentación fresca y demás variables de consideración constantes, repercute incrementando la fracción de finos alimentados y por ende reduciendo el consumo de potencia del molino SAG, tal como se aprecia en la Figura 62.

A pesar de lo evidenciado, es importante considerar la pendiente en cada caso, esto es, hasta qué punto una disminución en el consumo de potencia del molino SAG puede compensar la reducción en la alimentación fresca generada por el incremento de los pebbles recirculados.

Al observar el gráfico de la Figura 61, la zona relativamente invariante del CEE.SAG(kWh/t) (de un 10 a 25% de pebbles recirculados) indica que la reducción en el tonelaje de la alimentación fresca que se genera con el incremento de pebbles recirculados, se ve compensado por la disminución en el consumo de potencia del molino SAG, que se obtiene de manera paralela.

Posteriormente, para valores superiores al 25 o 26% de pebbles recirculados, la disminución del consumo de potencia que experimenta el molino SAG no logra compensar la pérdida de tonelaje en la alimentación fresca, dando paso a un incremento sostenido en el CEE.SAG (kWh/t), como se puede apreciar en la zona de pendiente positiva de la Figura 61.

Finalmente se puede definir, a partir del gráfico de la Figura 61, un rango operacional óptimo para la tasa de pebbles recirculados al molino. Esta última no debiese superar el 26% del tonelaje de alimentación fresca; valores superiores hacen que la pérdida de tonelaje resulte perjudicial para el perfil energético del molino SAG.

4.3.6. *Presión en los descansos del molino SAG*

La idea de analizar la presión en los descansos en función de otras variables operacionales vinculadas al molino SAG, es la de identificar la influencia de éstas en la evolución del nivel de llenado total del molino. Evidenciar una disminución en la fracción de llenado total del equipo (representada por un decrecimiento de la presión en los descansos del mismo) manteniendo el perfil operacional del circuito y en particular el rendimiento productivo del molino SAG, constituye una instancia trascendental para la optimización del rendimiento productivo de todo el circuito de molienda.

Inicialmente se espera evidenciar un efecto de la velocidad de operación del molino SAG sobre la granulometría y por ende sobre el nivel de llenado del molino. El porcentaje de la velocidad crítica a la que opera el molino SAG es fundamental para determinar el perfil de la conminución que se puede alcanzar; sin embargo, es preciso encontrar la velocidad óptima de operación a la cual se propicie el impacto de los medios de molienda sobre el mineral, que pueda mejorar el perfil de la molienda.

De acuerdo a lo anterior, la hipótesis que se mantiene es que el incremento en la velocidad de operación del molino SAG debiese contribuir a la disminución de la granulometría final del circuito (manteniendo las demás variables constantes), pero sólo hasta cierto punto, luego del cual este incremento se vuelve perjudicial. Lo anterior debido a que, cómo se ha discutido anteriormente, un valor muy alto para la velocidad de operación del molino, N/N_c (%), afecta la trayectoria de los medios de molienda de manera negativa, generando una colisión preferente con los revestimientos del molino y no con el mineral.

Al establecer la relación entre la granulometría del producto final y la velocidad de operación del molino SAG, N/N_c (%), lo discutido en el párrafo anterior se debería ver representado a través de un cambio de pendiente o punto de inflexión en la línea de tendencia definida por los puntos de la nube de dispersión; sin embargo, no se pudo identificar una correlación aceptable, que pueda confirmar el comportamiento discutido entre ambas variables (ver Figura 63, corte izquierdo).

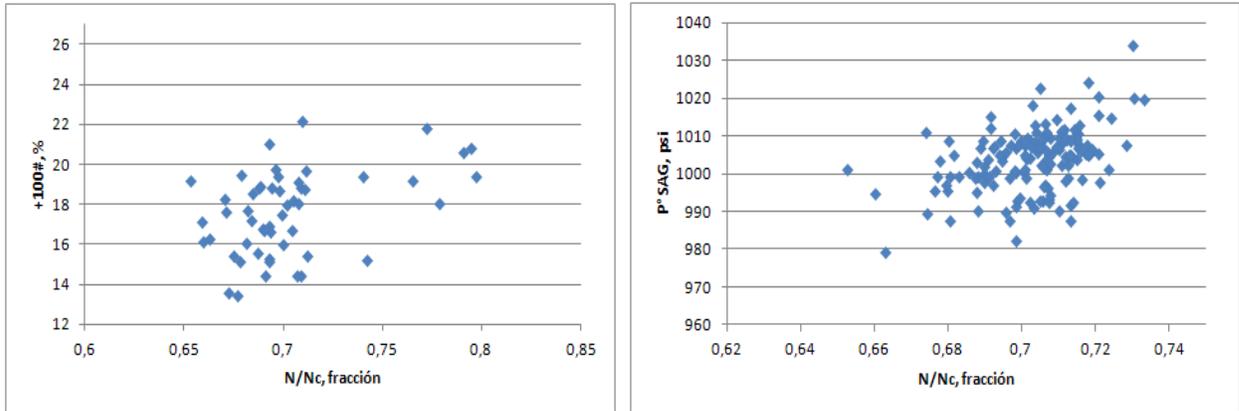


Figura 63. Granulometría final del circuito (izquierda) y P° SAG (psi) (derecha) en función de la velocidad de operación del molino SAG.

Respecto a la influencia de la velocidad de operación del molino SAG sobre la presión en sus descansos, se esperaba encontrar un comportamiento muy parecido al discutido sobre la granulometría del producto final (cambio de pendiente de la curva definida por los puntos), sin embargo, la alta dispersión de los datos considerados (ver Figura 63, corte derecho) no pudo abalar dicho comportamiento.

También se relaciona la presión en los descansos del molino SAG con el porcentaje de sólidos en peso alimentado al mismo, ya que tal como se menciona en el capítulo 2.4, este parámetro (Cp(%)) del molino SAG) incide en el perfil de transporte de la pulpa a través del molino, por lo que resulta lógico esperar una influencia consecuente sobre el nivel de llenado total del molino SAG.

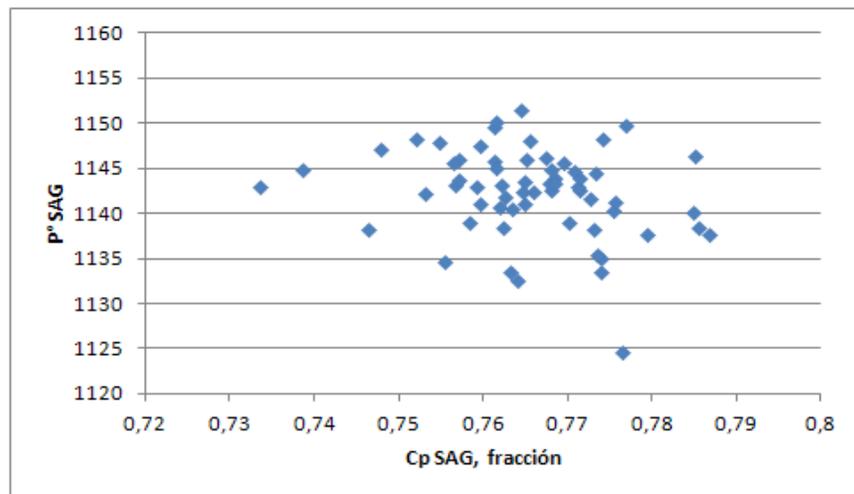


Figura 64. Presión en los descansos del molino SAG en función de la concentración de sólidos en peso en su alimentación.

La alta dispersión de la nube de puntos en la Figura 64, no posibilita un análisis eficiente de los datos asociados. Debido a esto, para el caso de la concentración de sólidos en peso que se alimenta al molino SAG, tampoco es posible corroborar la existencia de una correlación o influencia sobre el perfil de la conminución, por lo menos a partir del nivel de llenado total del molino Semiautógeno.

A pesar de la inexistencia de correlaciones claras, las suposiciones e hipótesis discutidas anteriormente, respecto a la presión en los descansos del molino SAG, constituyen observaciones que debiesen ser chequeadas mediante pruebas directas en la operación o a escala piloto, debido a lo complejo que se vuelve medir su efecto, frente a variables mucho más influyentes, en un circuito de molienda a escala industrial.

4.3.7. Relación entre rangos granulométricos

Al observar cada una de las correlaciones establecidas a lo largo del capítulo 4, se puede constatar que la incidencia de la granulometría fina es opuesta a la de la intermedia en la mayoría de los gráficos generados. Se observa incluso un comportamiento proporcional, pero inverso, es decir, una incidencia de la misma magnitud para estos dos rangos de tamaño, pero en sentidos opuestos. Lo anterior indica la posible existencia de una dependencia lineal entre las granulometrías fina e intermedia. Sumado a lo anterior se encuentra el bajo rango porcentual en cual se halla comprendida la granulometría gruesa, lo que hace que su magnitud no presente variaciones considerables en el tiempo, respecto a los otros dos rangos granulométricos.

Para ratificar lo comentado en el párrafo anterior, se analizan los rangos de tamaños fino, intermedio y grueso, asociados a las correlaciones halladas para la potencia consumida por el molino SAG (Figuras 50 y 51) ya que es, junto con el CEE.SAG (kWh/t), el parámetro en donde la simetría de comportamiento entre los dos rangos granulométricos se da de manera más acentuada.

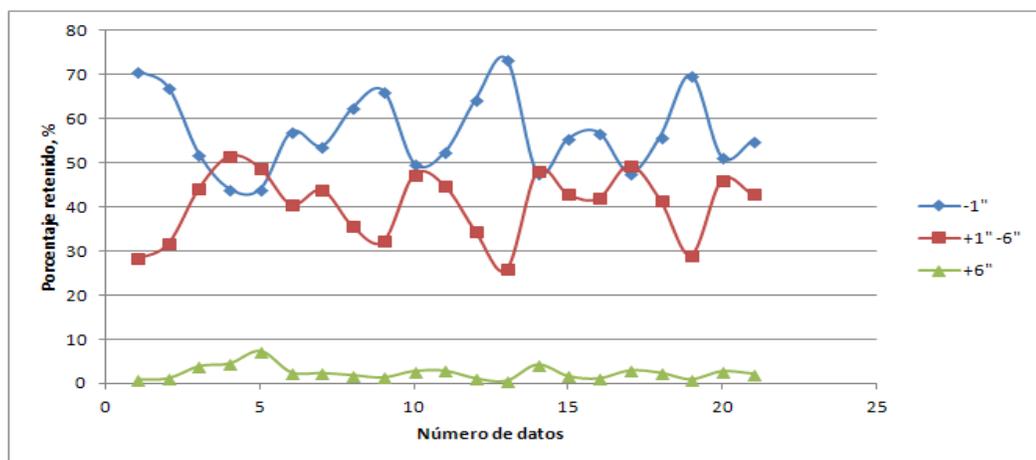


Figura 65. Granulometría presente en la alimentación fresca, para los tres rangos de tamaño.

La granulometría gruesa se encuentra comprendida en un rango que va de 0 a 7,2%, lo que comparado con las otras dos clases de tamaño, que se mueven en un espectro por lejos más amplio, hace que su magnitud parezca prácticamente constante en el tiempo. Si lo anterior fuese estrictamente cierto, es decir, si la granulometría gruesa fuese constante, entonces efectivamente existiría una dependencia lineal entre los otros dos rangos de tamaño, comprobándose la hipótesis discutida en el párrafo anterior.

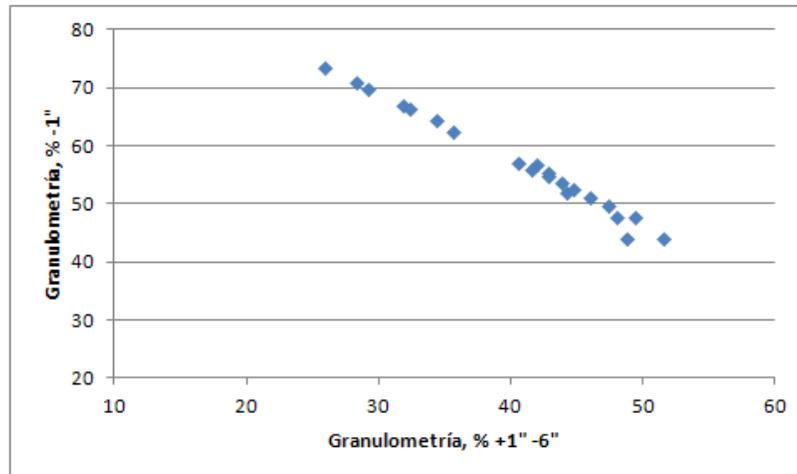


Figura 66. Granulometría fina en función de la intermedia, presentes en la alimentación fresca.

En el gráfico de la Figura 66 se evidencia una clara dependencia lineal entre los dos rangos granulométricos en cuestión (fino e intermedio), lo que comprueba la hipótesis manejada respecto al comportamiento simétrico de las distintas variables, en particular de Pc SAG (kW) y CEE.SAG (kWh/t), en torno a estas dos granulometrías. Respecto a este hecho es claro que la modelación de cualquiera de estos dos parámetros, de potencia o energía específica del molino SAG, debe estar basada en un sólo rango de tamaño, puesto que incluir ambos, tal como se acaba de demostrar, se vuelve redundante.

5. CONSTRUCCIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS

El siguiente capítulo tiene por objetivo diseñar y proponer modelos predictivos que sean una herramienta útil para la determinación del consumo de potencia (P_c SAG) y específico de energía del molino SAG (CEE.SAG), por ser este el equipo de mayor influencia dentro del circuito de molienda SAG.

Un factor primordial que se considera en el desarrollo de cualquier herramienta predictiva, corresponde a la información real disponible. Como se concluye en los capítulos 2 y 4, es la granulometría la variable, dentro de aquellas con información disponible, con mayor valor predictivo sobre el perfil energético/productivo del molino. Es por ello que el desarrollo de los modelos que se desean, debe estar basado de manera preferente sobre este parámetro medido en la operación.

Otro aspecto fundamental en el desarrollo de modelos lo constituye la diversidad de la información, que le confiere a la herramienta predictiva validez para su uso, más allá de lo particular. No obstante la base de datos DB.M1, analizada en el capítulo 4, entrega una gran cantidad de información operacional, se hace necesario enriquecer y complementar dicha base de datos con información proveniente de otras plantas de molienda SAG, permitiendo así configurar modelos que cuenten con el grado de generalidad requerido.

Dado lo complejo de obtener información directa desde plantas de molienda SAG actualmente en operación, la búsqueda de información adicional se concentra, de preferencia, sobre trabajos de tesis y memorias de tipo “Mine to Mill” para circuitos de molienda SAG. El fundamento para desarrollar la búsqueda preferente de los datos sobre este tipo de investigaciones, es que en los estudios Mine to Mill se evalúan medidas, sobre la mina, para optimizar la operación de la planta de molienda, por lo que las variables medidas y estudiadas suelen ser la potencia consumida por el molino SAG, el tonelaje de alimentación y la granulometría presente en la alimentación fresca, que son efectivamente las que se desean obtener.

Previo a la construcción de los modelos, es necesario indicar que aun cuando se pudo evidenciar un efecto de los pebbles recirculados sobre la potencia del molino SAG y el consumo específico de energía del mismo, en ninguna de las bases de datos que se adicionan al estudio es posible encontrar registros de la magnitud de pebbles en el circuito, en ninguna de sus formas (recirculados o evacuados), de manera que, de acuerdo a las consideraciones anteriormente discutidas (disponibilidad de información), se descarta el considerar a éstos como variable para la creación de los modelos de potencia consumida y consumo específico de energía del molino SAG.

5.1. Bases de datos adicionales

Tal como se menciona, se recurre a la búsqueda de información proveniente de distintas faenas de molienda, a partir de investigaciones “Mine to Mill”. La información que se obtiene de esta manera corresponde a datos reales medidos en la planta de molienda, de manera que la base de datos generada goza de un alto grado de representatividad, lo cual agrega valor predictivo a los modelos que se desean obtener.

Se adicionan datos pertenecientes a dos faenas de molienda SAG: minera *Los Bronces*^[23] (ver Anexo A.2, Tablas A2-1 y A2-2) y minera *Los Pelambres*^[24] (ver Anexo A.2, Tabla A2-3). Respecto a la primera, la configuración del circuito cuenta con dos líneas de molienda, cada una con un molino SAG de características distintas, debido a lo cual se considera a ésta como dos bases de datos individuales. La razón de ello responde a las consideraciones y metodología empleadas para el desarrollo de los modelos.

A continuación se despliega una tabla que especifica la nomenclatura seleccionada para referenciar cada base de datos dentro del proceso de creación de modelos en este capítulo. El “Año” asociado a cada base de datos, corresponde al período durante el cual los datos fueron medidos en la planta respectiva. La nomenclatura de las distintas bases de datos comienza desde “DB.M2”, debido a que la faena original, analizada en el Capítulo 4, corresponde a la base de datos “DB.M1”. Por último y tal como se menciona en el párrafo anterior, la faena *Los Bronces* aparece indicada dos veces, como si fuesen dos plantas distintas, pero aquello sólo constituye una caracterización para identificar sus dos líneas de molienda SAG.

Tabla 10. Caracterización de las bases de datos adicionadas para la creación de los modelos predictivos.

Faena	Nomenclatura	Molinos SAG – Dimensiones	Molinos de Bolas	Año
Los Bronces (1)	DB.M2	1 de 34’x17’	2 de 18,8’x28’	2004
Los Bronces (2)	DB.M3	1 de 28’x14’	1 de 24,5’x35’	2004
Los Pelambres	DB.M4	2 de 36’x17’	4 de 21’x33’	2000

Cabe indicar que la información que se utiliza para este trabajo, proveniente de la base de datos DB.M4, es la correspondiente a sólo uno de los dos molinos SAG que posee la planta.

Adicionalmente a la información dada a conocer, se debe indagar respecto a las condiciones operacionales definidas para el molino SAG en cada base de datos, debido a que éstas repercuten considerablemente en las variables que se desean modelar.

Tabla 11. Condiciones operacionales definidas para el molino SAG en cada base de datos considerada para este capítulo.

Bases de datos	N/Nc (%)	Jb (%)	Cp (%)
DB.M1	70,5	19,0	76,2
DB.M2	74,0	13,4	67,0
DB.M3	78,0	13,1	65,4
DB.M4	76,0	13,7	73,0

5.2. Modelo de Potencia Consumida por el molino SAG

Antes de iniciar la construcción de este modelo, es fundamental dejar en claro por qué se desea desarrollar un modelo para el consumo de potencia del molino SAG y otro para el consumo específico de energía del mismo equipo. Aquello podría parecer a priori redundante, por cuanto contar con un modelo para el CEE.SAG (kWh/t), debiese ser suficiente para desarrollar labores de ingeniería, control operacional, optimización de la molienda y dimensionamiento. Además, las faenas cuentan con la demanda productiva o el tonelaje de alimentación fresca que procesan, por lo que la determinación de la potencia consumida por el molino SAG se puede obtener a partir de una simple operación matemática, sobre del modelo de consumo específico de energía, en cuyo caso el modelo de potencia no sería necesario.

A pesar de lo mencionado en el párrafo anterior, es fundamental contar con ambos modelos. En primer lugar y a pesar del buen ajuste que pudiese ofrecer el modelo para el CEE.SAG (kWh/t), es complejo que un dato medido en faena pueda llegar a representar fielmente las características del mineral que se desea procesar, debido a que dicha caracterización se suele llevar a cabo en pruebas de laboratorio, bajo estrictos estándares y condiciones que permiten evidenciar, fidedignamente, las características del mineral que se está analizando.

Referido a lo anterior, la práctica común en las faenas suele ser la caracterización del mineral desde el laboratorio, a través de índices tales como el SPI, Axb o el DWi, que permiten dar con el valor del CEE.SAG (kWh/t).

Si una empresa desea utilizar el modelo de CEE.SAG (kWh/t) para labores de dimensionamiento del molino SAG, pero ya cuenta con una caracterización metalúrgica del yacimiento, con índices como los mencionados en el párrafo anterior, la aplicación de la herramienta predictiva no tendría lugar; en dichas circunstancias el modelo de potencia consumida se hace trascendental, al ser completamente aplicable en un escenario como el planteado.

El primer paso para la construcción del modelo, corresponde a identificar si la tendencia que la potencia ofrece para la base de datos DB.M1, en función de la granulometría de alimentación fresca, se mantiene para los demás circuitos adicionados. Con el fin de corroborar lo anterior, se observa la relación entre el consumo de potencia del molino SAG y la granulometría presente en la alimentación fresca, en un mismo gráfico, para todas las bases de datos. El objetivo de ello es evidenciar, en primer lugar, si la tendencia se mantiene y, en segundo, si el grado de influencia de la granulometría sobre la potencia (pendiente de las curvas) se diferencia considerablemente entre una base de datos y otra.

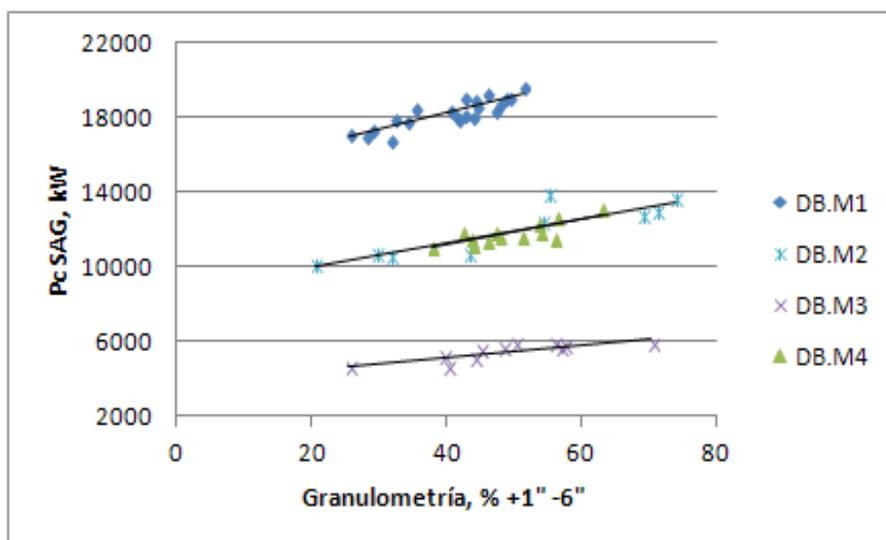


Figura 67. Pc SAG (kW) en función del % +1" -6" presente en la alimentación fresca, para las distintas bases de datos.

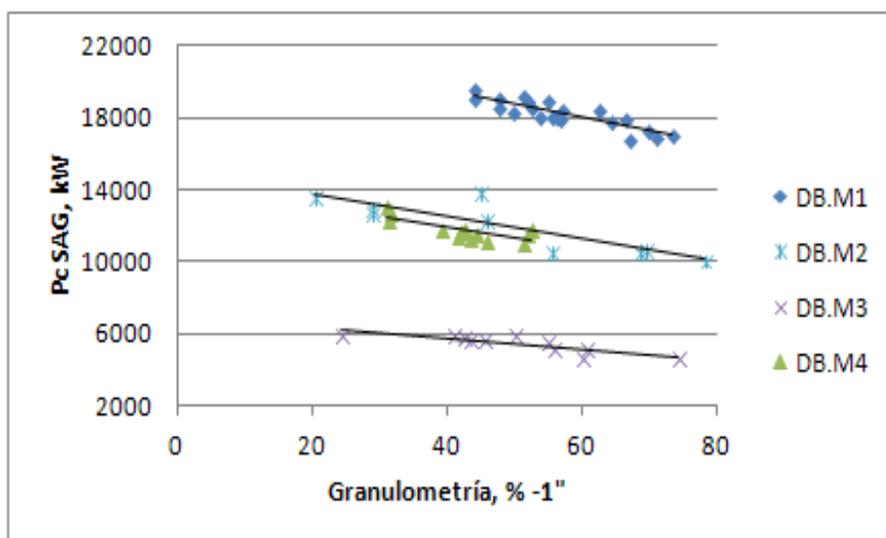


Figura 68. Pc SAG (kW) en función del % -1" presente en la alimentación fresca, para las distintas bases de datos.

En los gráficos de las Figuras 67 y 68 se observa una clara influencia de la granulometría intermedia y fina sobre el consumo de potencia del molino SAG, para cada una de las bases de datos consideradas. Además, se aprecia que las pendientes de cada curva no se diferencian considerablemente. A pesar de existir una tendencia de tipo general, se hace evidente un distanciamiento considerablemente alto entre la posición de una curva y otra, lo que no se debe en lo absoluto a distintos efectos de la granulometría, si no que a una comparación sesgada por las dimensiones del molino SAG en cada base de datos.

Tabla 12. Parámetros de las líneas de regresión para Pc SAG (kW) vs granulometría, en cada base de datos.

Base de datos	Pendiente “m” de la línea de regresión		R ²	
	-1”	+1 -6”	-1”	+1 -6”
DB.M1	-76,6	88,2	0,76	0,75
DB.M2	-62,0	65,2	0,76	0,77
DB.M3	-30,6	34,3	0,72	0,72
DB.M4	-62,9	67,7	0,63	0,64
Desviación Estándar	19,5	22,2	0,061	0,058

Dado que las dimensiones del molino están sesgando el análisis y la comparación que se pretende establecer, se desarrolla una parametrización para la potencia consumida, a una forma que sea comparable entre las distintas faenas y en la que las dimensiones del molino SAG no tengan influencia alguna. Consecuentemente se desarrolla una normalización de las potencias medidas, de acuerdo a las dimensiones del molino en cada circuito considerado, obteniéndose de esta manera el parámetro a observar en función de la granulometría, que se presente a continuación:

$$\text{Parámetro a observar (Eje Y)} = \frac{Pc \text{ SAG}}{D^{2,5} * L} = Pcp$$

La forma en la que se hallan las dimensiones del molino SAG ($D^{2,5} * L$) en el divisor de la expresión anterior, se encuentran ligadas a la ecuación del torque del molino, que define la potencia consumida por el mismo, tal como se analizó en el punto 3.4.

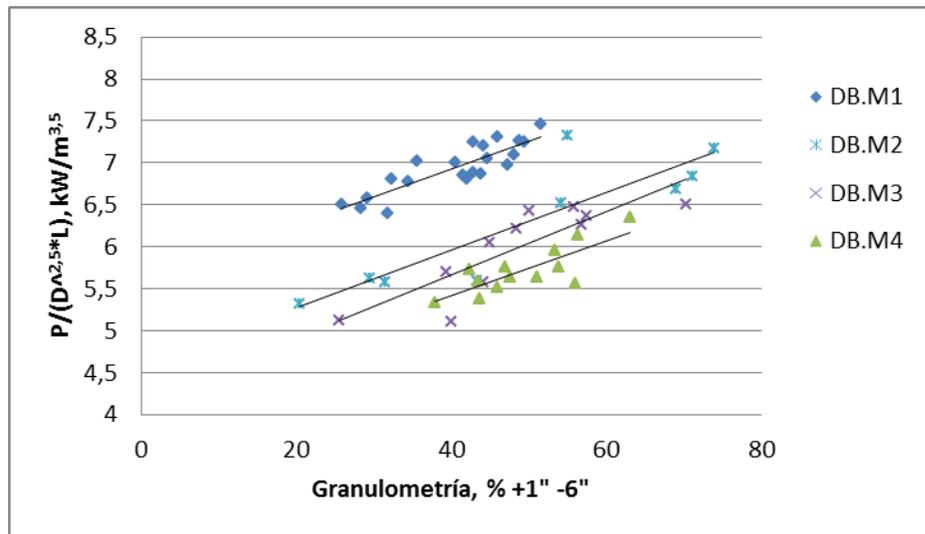


Figura 69. Potencia normalizada (Pcp) en función del % +1" -6" presente en la alimentación fresca.

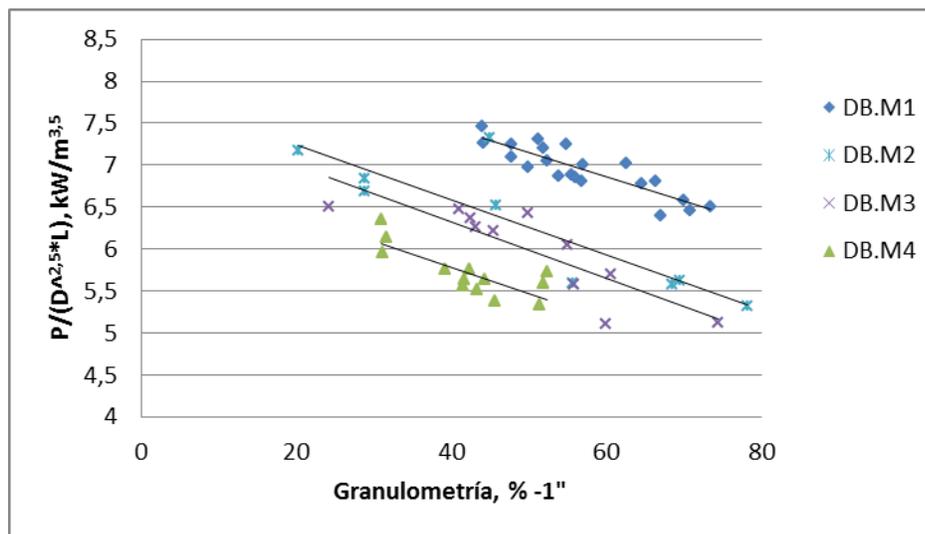


Figura 70. Potencia normalizada (Pcp) en función del % -1" presente en la alimentación fresca.

En los dos últimos gráficos se aprecia un cambio rotundo de las condiciones comparativas para el consumo de potencia del molino SAG; ahora la comparación se realiza sobre unidades completamente distintas y relativamente cercanas, evidenciándose el efecto positivo del factor de escalamiento aplicado. Por otra parte, no sólo la posición de las líneas de tendencia se ve modificada, sino que además la pendiente de cada una, evidenciándose para éstas un grado de similitud mucho mayor respecto al que ofrecían las pendientes de las distintas curvas en las Figuras 67 y 68.

No obstante el comportamiento de las curvas (la pendiente) en las Figuras 69 y 70 pareciese aproximarse estrechamente entre los distintos circuitos, es preciso desarrollar un análisis numérico, con tal de determinar qué tan distinto resulta el comportamiento evidenciado entre los distintos casos.

Tabla 13. Parámetros de las líneas de regresión, para Pcp vs granulometría, en cada base de datos.

Base de datos	Pendiente “m” de la línea de regresión		R ²	
	-1”	+1 -6”	-1”	+1 -6”
DB.M1	-0,029	0,034	0,76	0,75
DB.M2	-0,033	0,034	0,76	0,77
DB.M3	-0,031	0,038	0,72	0,72
DB.M4	-0,034	0,033	0,63	0,64
Promedio	-0,032	0,035	0,72	0,72
Desviación Estándar	0,002	0,002	0,061	0,058

De acuerdo a los datos de la Tabla 13, se corrobora la baja variabilidad que presenta la pendiente de las curvas entre las distintas faenas. La baja desviación estándar que se da para las dos granulometrías analizadas, menor al 5,7% del valor promedio en el caso de la granulometría intermedia, demuestra que el comportamiento de la potencia consumida por el molino SAG frente a la granulometría de alimentación fresca es prácticamente la misma, sin importar el molino ni la base de datos considerada. De esta manera se valida la existencia de un comportamiento genérico, que se mantiene para toda la familia de faenas considerada.

Se postula que el consumo de potencia normalizado del molino SAG, Pcp, varía de manera lineal con la granulometría de alimentación fresca, por lo que esta última se transforma en una variable exógena dentro del modelo a crear, modelo que hasta el momento adquiere la siguiente forma:

$$Pcp = m * granulometría(\%) + n$$

Dado que la granulometría fina e intermedia ejercen un grado de influencia prácticamente idéntico sobre la potencia consumida, se hace necesario determinar cuál o cuáles serán las variables granulométricas consideradas para el modelo: si la granulometría fina, la intermedia o ambas.

Tal como se pudo observar en el capítulo 4, en la base de datos DB.M1 la granulometría fina e intermedia presentan una dependencia lineal, por lo que se concluyó que la predicción sobre la variable “potencia consumida” debía estar hecha en base a sólo un rango granulométrico, por lo menos para ese caso de estudio. Dado que se están considerando bases de datos adicionales, se requiere confirmar si para éstas también se está dando algún tipo de dependencia lineal entre los rangos granulométricos fino e intermedio.

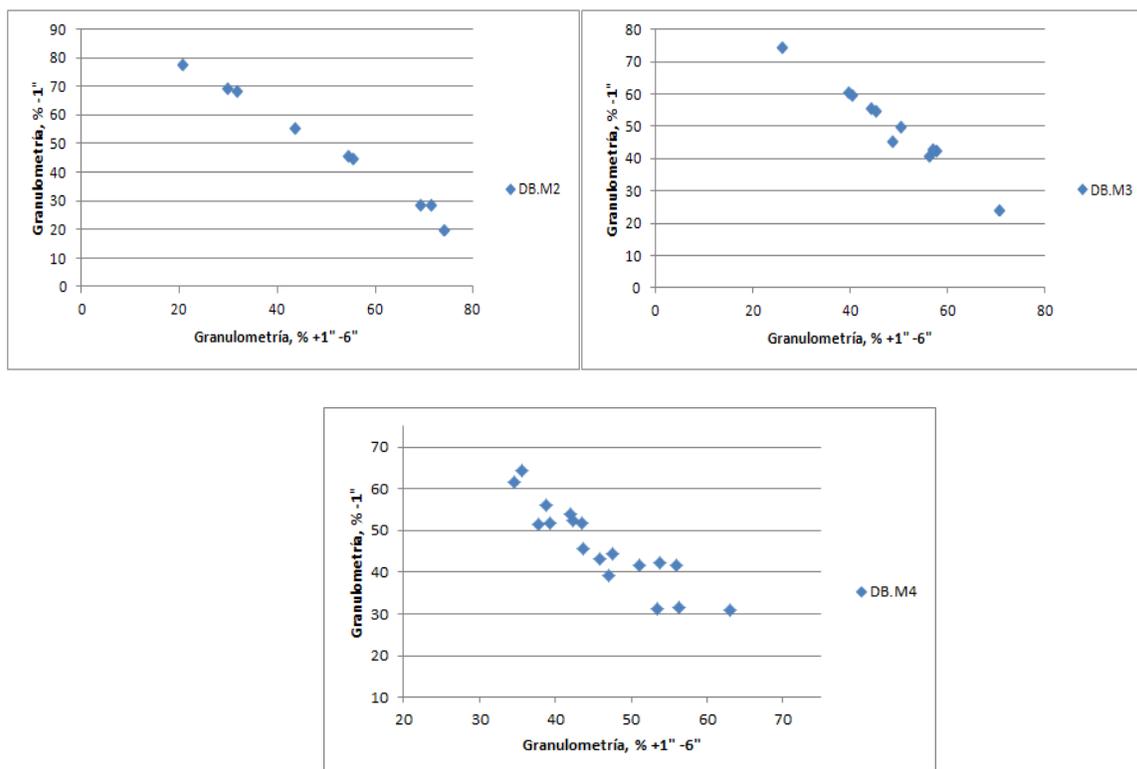


Figura 71. Granulometría fina en función de la intermedia, para las bases de datos adicionales al estudio.

En base a los gráficos de la Figura 71, se concluye que todas las bases de datos adicionales para la creación del modelo, reflejan una dependencia lineal entre la granulometría fina e intermedia, razón por la cual se considera a sólo una de estas como variable exógena dentro del modelo de potencia consumida. Para escoger entre estos dos rangos granulométricos, las consideraciones gráficas no constituyen un parámetro decidor, por cuanto para las dos granulometrías los coeficientes de correlación de las líneas de tendencia (ver Tabla 13) explican prácticamente con la misma magnitud el comportamiento evidenciado.

Respecto a esta última discusión, la mayoría de las publicaciones mencionan que es la granulometría de tamaño crítico la que afecta con mayor incidencia el perfil operacional del molino SAG, en particular su consumo de potencia. Sumado a este hecho se hallan los resultados discutidos en el capítulo 4, en donde se concluyó que la granulometría intermedia es la que generaba mayores problemas para el molino SAG, en su rendimiento energético y productivo.

Otro hecho a considerar, es que si bien el incremento de la granulometría fina posee un efecto positivo en la potencia consumida por el molino SAG, enfocarse exclusivamente en este rango granulométrico podría generar un descuido de los pebbles en el circuito. Un incremento de la granulometría fina alimentada al circuito, se podría estar dando a expensas de una disminución del porcentaje de granulometría gruesa, sin que la fracción de granulometría intermedia se vea modificada, lo cual mantiene vigente los problemas asociados a la recirculación de pebbles en el circuito.

Al definir a la granulometría intermedia como parámetro de control, se logra optimizar el perfil operacional del molino SAG, pero además controlar la presencia de pebbles en el circuito, debido a que, como se comprobó en el capítulo 4, es la granulometría intermedia presente en la alimentación fresca la que influye de manera directa sobre éstos.

Finalmente y de acuerdo a las consideraciones antes discutidas, se define a la granulometría intermedia como la variable a considerar para la generación del modelo de potencia consumida.

$$Pcp = m * \%(+1" -6") + n \quad (17)$$

Dicho esto, el modelo que mejor representa cada una de las líneas de tendencia de la Figura 69, queda bien definido a partir de la pendiente, la granulometría intermedia y el coeficiente de posición de cada curva, tal como se indica en la Ecuación 17.

La baja variabilidad que presentan las cuatro pendientes de las curvas en la Figura 69, sugiere que el comportamiento de la potencia en función de la granulometría intermedia es único, por lo que la magnitud de una pendiente de tipo genérica, válida para todas las bases de datos, debiese hallarse en el rango 0,033-0,038 (ver Tabla 13).

5.2.1. *Determinación de la pendiente para el Modelo de Potencia Consumida*

Para la determinación de la pendiente que se asume como genérica o universal, lo más sencillo es desarrollar la media aritmética de las cuatro pendientes reportadas en la Tabla 13 y quedarse con el valor resultante. A pesar de esto, se debe considerar primero el objetivo y la importancia que adquiere la pendiente para el modelo; su magnitud determinará la calidad predictiva del modelo, por lo que interesa saber cuál es el valor de la pendiente al cual se minimiza el error entre el valor real y el obtenido con el modelo lineal postulado. De acuerdo a esto, el valor promedio de las pendientes no necesariamente correspondería al valor óptimo.

Para determinar el valor de Pcp ofrecido por el modelo lineal en cada base de datos, se requiere de la pendiente y el coeficiente de posición “ n ”, en cada una. La pendiente poseerá un valor candidato, cuya magnitud, según lo discutido, se asume igual para todas las bases de datos. Por otra parte el valor del coeficiente de posición será distinto en cada caso y se determinará a partir del centro de gravedad de la nube de dispersión asociada a cada base de datos y el valor de la pendiente candidata.

El hecho de calcular el coeficiente de posición en cada base de datos respecto al valor del centro de gravedad, se debe a que esta última magnitud es la que representa de mejor manera la nube de puntos asociada a cada molino SAG en el gráfico. Con los valores de “ m ” y “ n ” para cada base de datos, es posible determinar la magnitud para Pcp modelado, la que, comparándola con el valor real medido, permite obtener el valor del error cuadrático. Finalmente, la pendiente candidata “ m ” queda caracterizada por dicho error, luego de lo cual se ingresa un nuevo valor para otra pendiente candidata, repitiendo todo ciclo descrito anteriormente, en un proceso iterativo. Esto se reitera hasta determinar la pendiente asociada al menor error cuadrático total de las cuatro bases de datos.

Para el desarrollo de las iteraciones, dado lo complejo de su realización, se recurre al complemento *Solver*, de *Excel*, con el cual es posible determinar el valor de “ m ” que minimiza aquel error cuadrático global. La utilización de esta aplicación entrega un valor de 0,0348 para la pendiente universal deseada, con lo cual se obtiene el parámetro “ m ” del modelo de potencia consumida por el molino SAG.

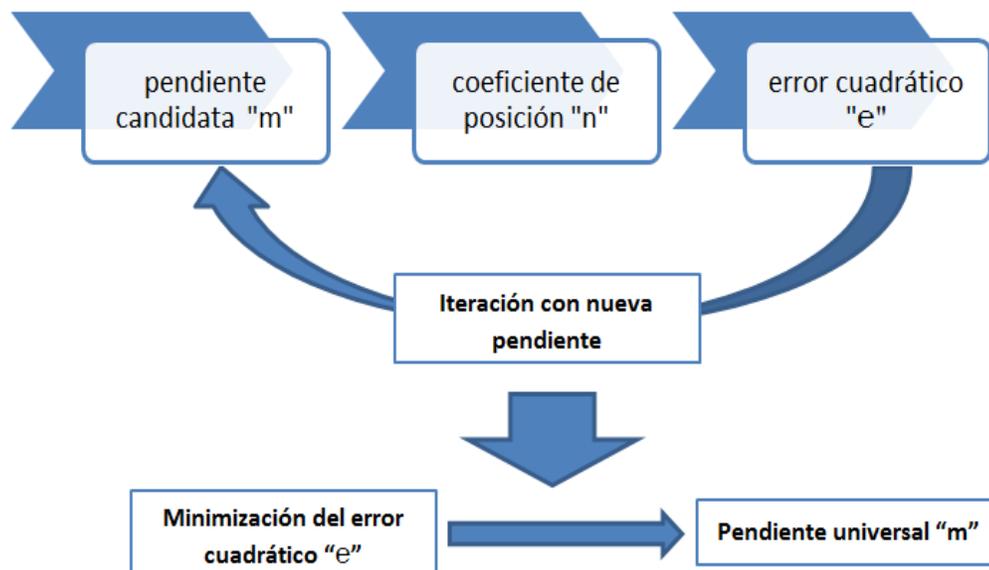


Figura 72. Esquema para el proceso de determinación de la pendiente universal “ m ” en el modelo de potencia consumida.

5.2.2. Determinación del coeficiente de posición para el Modelo de Potencia Consumida

Una vez obtenida la pendiente del modelo, se procede a la determinación del coeficiente de posición del mismo, el que debe quedar expresado en términos genéricos para que el modelo pueda ser usado por cualquier faena y en cualquier condición que se desee. Lo ideal sería obtener un valor constante para el parámetro “ n ” del modelo, al igual que con la pendiente, sin embargo, esto no es posible, debido a la gran diferencia que existe en la posición de las líneas de tendencia, entre las distintas bases de datos, tal como se puede apreciar en la Figura 69.

A continuación se presentan los coeficientes de posición asociados a cada base de datos, determinados a partir de la pendiente universal “ m ” y el centro de gravedad de la nube de puntos correspondiente:

Tabla 14. Pendiente definida para el modelo y los coeficientes de posición derivados de esta, para cada base de datos.

Base de datos	Coefficiente de posición “ n ”	Pendiente “ m ”
DB.M1	5,54	0,0348
DB.M2	4,56	0,0348
DB.M3	4,29	0,0348
DB.M4	4,00	0,0348

Dado que la pendiente entre cada curva es la misma, la variación observada en el coeficiente de posición de la Tabla 14 vendría dado por un cambio de las condiciones operacionales del molino SAG. Esta suposición se basa en que las faenas definen para el molino SAG las condiciones operacionales bajo las cuales operará la mayor parte del tiempo, sin embargo, dichas condiciones no son las mismas entre una faena y otra, debido a lo cual se presume que un cambio de éstas en el molino, sería lo que está influenciando las diferencias de magnitud de “ n ” entre las distintas bases de datos.

Se analizan las principales variables que influyen en la potencia consumida por el molino SAG, para averiguar cuál o cuáles de estas están generando los desplazamientos entre las distintas curvas. La primera que se postula corresponde a la fracción de llenado con bolas en el molino SAG, J_b (%). En primera instancia se cree que la variación del coeficiente de posición “ n ” es directamente proporcional al J_b (%) en cada base de datos, por lo que se relacionan directamente ambos parámetros para evidenciar su posible linealidad.

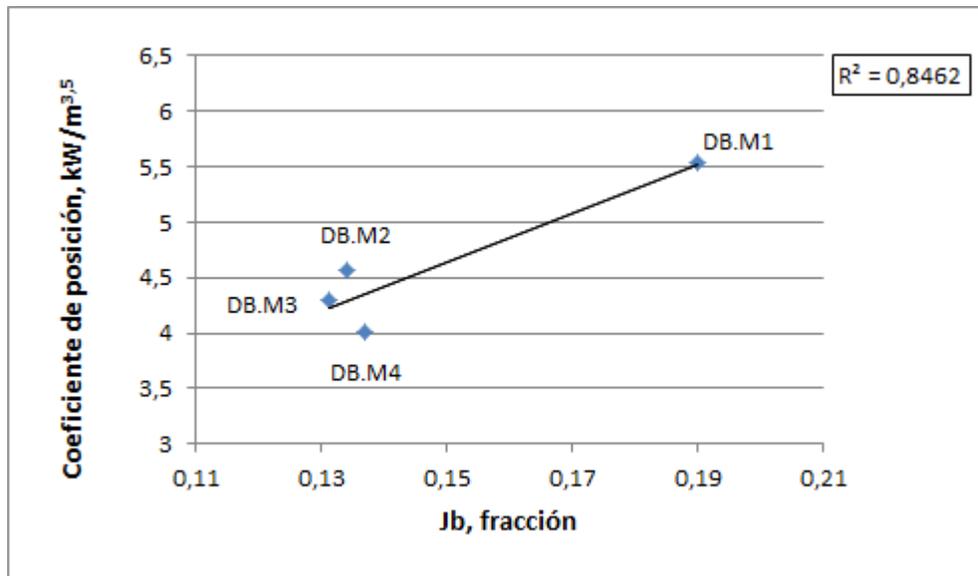


Figura 73. Coeficiente de posición en función del Jb (%) del molino SAG, para cada base de datos.

De acuerdo al gráfico anterior, se verifica que la variación en el coeficiente de posición no se responde de manera exclusiva por un cambio en el nivel de llenado con bolas del molino SAG, debido a la falta de linealidad de los puntos. A pesar de ello es posible desarrollar algunas observaciones respecto al gráfico de la Figura 73:

1. Aun cuando el coeficiente de posición no depende únicamente del nivel de bolas en el molino SAG, este último parámetro influye de manera preponderante, considerando que el punto con el mayor coeficiente de posición se encuentra asociado al molino SAG con mayor nivel de bolas (19%). Posteriormente, los dos valores siguientes para “n”, en orden decreciente, se vinculan a niveles de llenado con bolas en el molino SAG de 13,4% y 13,1% respectivamente.
2. Se podría asumir, en la Figura 73, cierta linealidad entre los tres puntos con mayor valor para “n”, sin embargo, el punto asociado a DB.M4 escapa totalmente de la tendencia lineal.
3. Aun descartando el dato asociado a DB.M4, la linealidad de los tres puntos restantes no es total.

Al evaluar la velocidad de operación del molino SAG para cada base de datos, es posible identificar diferencias considerables. Dado que este parámetro, $N/N_c(\%)$, afecta de manera directa en la potencia consumida por el molino SAG, es necesario considerarlo, además del $J_b(\%)$, como variable influyente en el coeficiente de posición que se desea definir.

De esta manera se cuenta con dos variables operacionales que podrían explicar el comportamiento del coeficiente de posición. Para validar la participación de ambas en el valor de “ n ”, se asume que éstas influyen de manera lineal en dicho parámetro, a partir de lo cual se desarrolla una regresión lineal bivariable. La forma que adquiere el coeficiente de posición, según lo anterior, queda descrita de la siguiente manera:

$$n = \alpha * \frac{N}{Nc} + \beta * Jb$$

Donde α y β corresponden a los factores de peso o coeficientes asociados a cada variable candidata y la magnitud de los parámetros operacionales N/Nc y Jb se halla como fracción. La razón por la que no se adiciona una constante al final de la ecuación, es que si el molino se encuentra detenido (valor de $N/Nc(\%)$ nulo) y sin bolas de acero ($Jb(\%)$ nulo), el equipo necesariamente ejerce un consumo de potencia nulo.

A continuación se observa la comparación entre el valor del “ n ” original y el determinado con el modelo bivariable propuesto anteriormente:

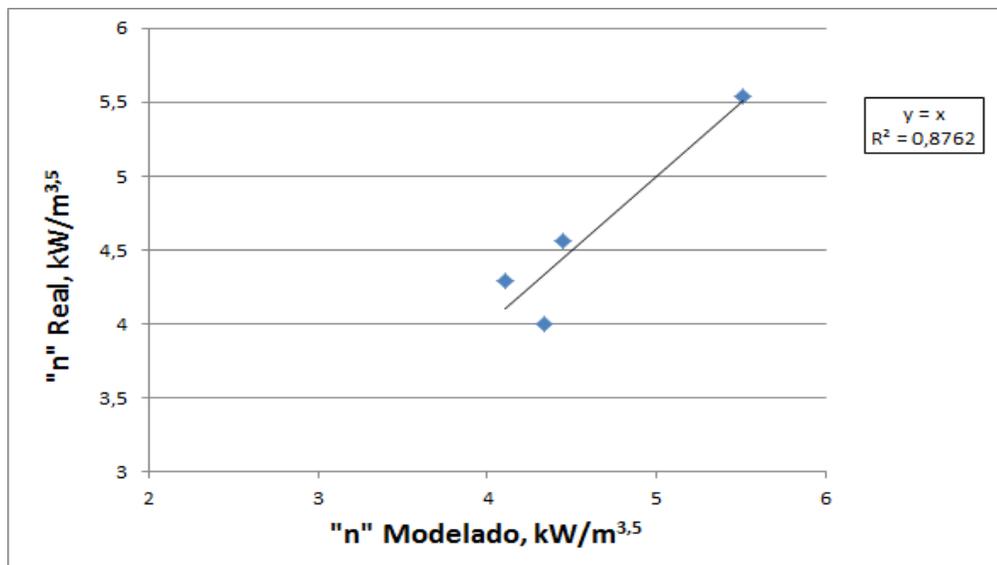


Figura 74. n Real versus n Modelado en función de N/Nc (%) y Jb (%).

De acuerdo al gráfico de la Figura 74, el ajuste aun no es el esperado. Si bien la línea de tendencia representa la igualdad (cruza el origen y posee pendiente igual a 1), el coeficiente de correlación es bajo, considerando que sólo se cuenta con 4 puntos, por lo que los datos no se acercan lo suficiente a la identidad.

Debido a lo anterior, se vuelve necesario el postular una tercera variable operacional que pueda complementar a las dos anteriormente evaluadas. Al respecto, se considera a la variable porcentaje de sólidos en peso alimentados al molino SAG, Cp(%), como la nueva variable candidata, debido a que dicho parámetro influye de manera directa en la densidad de la pulpa y por ende en la carga interna alcanzada por el molino SAG, repercutiendo consecuentemente sobre el consumo de potencia. Además, esta variable incide en el perfil de transporte de la pulpa dentro del molino, modificando con ello el nivel de llenado total, por lo que su influencia, sobre la potencia consumida, debería ser aún más significativa.

Se desarrolla una regresión lineal múltiple, para un modelo de “*n*”, entorno a las tres variables candidatas: N/Nc(%), Jb(%) y Cp(%). Dado que el Cp(%) repercute en la masa del equipo, pero también en el perfil de transporte de la pulpa, no se sabe a ciencia cierta si la incidencia de este parámetro es directa o inversa sobre el coeficiente de posición a modelar. De acuerdo a lo anterior y tras una evaluación del caso, se determina que lo más correcto es considerar “1/Cp” como la tercera variable de ingreso a la regresión, debido a que el coeficiente de posición modelado en torno a las 3 variables, mostraba un mejor ajuste respecto al dato real, considerando el inverso multiplicativo de Cp(%) como tercera variable.

$$n = \alpha * \frac{N}{Nc} + \beta * Jb + \gamma * \frac{1}{Cp}$$

Tal como se aprecia en la expresión anterior, se descarta la participación de una constante para el modelo, debido a que si todas las variables en el mismo son nulas, el equipo se encontraría detenido, en su modalidad autógena, pero además sin mineral, de manera que no debiese existir consumo de potencia alguno por parte del molino SAG. Los resultados obtenidos por el modelo de “*n*” en función de las 3 variables operacionales seleccionadas, se presentan en el gráfico de la Figura 75.

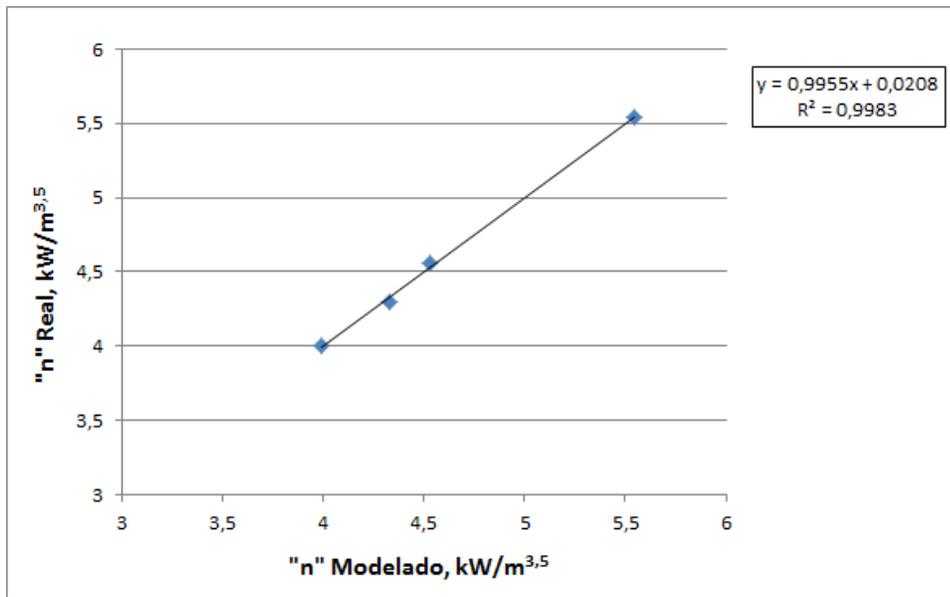


Figura 75. n Real versus n Modelado en función de $N/N_c(\%)$, $J_b(\%)$ y $C_p(\%)$.

Con este último modelo definido para “ n ”, se logra un ajuste de los datos por lejos mejor al ofrecido por los casos anteriores, lo que se puede observar por la línea de tendencia, que es prácticamente la identidad, y el alto coeficiente de correlación obtenido, que explica el 99,8% de la identidad observada, lo que confirma el alto grado de ajuste que se da entre el “ n ” modelado y el real.

Se finaliza con esto el proceso de determinación del coeficiente de posición genérico para el modelo de potencia consumida, el que queda definido por medio de la Ecuación 18:

$$n = -6,7 * \frac{N}{N_c} + 26,4 * J_b + 4 * \frac{1}{C_p} \quad (18)$$

Dado que se cuenta con un coeficiente de posición y pendiente genéricos, se obtiene de manera absoluta la estructura del modelo que deseado, sin embargo, aun resta desarrollar un último paso. La Ecuación 17 describe la variable de potencia normalizada, P_{cp} , y no directamente la potencia consumida por el molino SAG, de manera que para dar con la forma definitiva del modelo de potencia, resta multiplicar la Ecuación 17 completa por el factor de escalamiento “ $D^{2,5} * L$ ”. Con esto se obtiene finalmente la expresión completa para el modelo de potencia consumida por el molino SAG (ver Ecuación 19), en donde D y L poseen unidades de m.

$$P_{c \text{ SAG}}(kW) = (D^{2,5} * L) * \left\{ 0,0348 * \%(+1"-6") + \left[26,4 * J_b - 6,7 * \frac{N}{N_c} + 4 * \frac{1}{C_p} \right] \right\} \quad (19)$$

5.2.3. Validación del Modelo de Potencia Consumida

Una vez que el modelo de potencia consumida ha sido creado, se procede a verificar la calidad del mismo, por medio de un análisis que permita evidenciar la cercanía o dispersión de los datos modelados en torno a los reales.

El primer análisis es de tipo gráfico. Se observa la tendencia ofrecida por la potencia normalizada en función de la granulometría intermedia, para los datos reales y los modelados, en cada una de las bases de datos. En la comparativa de las Figuras 76 y 77 los puntos rojos representan los datos reales y los azules los datos obtenidos con el modelo.

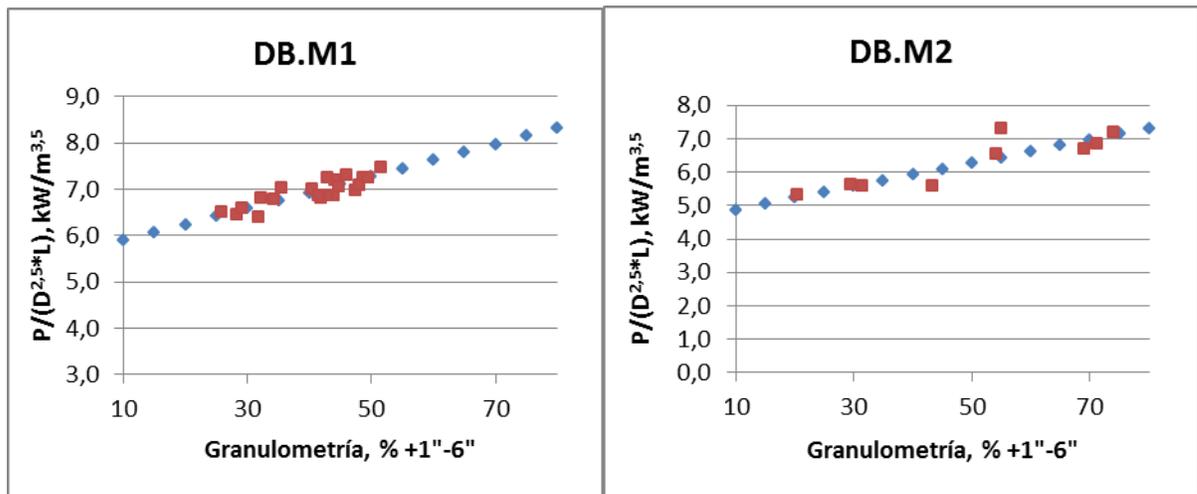


Figura 76. Potencia normalizada en función del % +1" -6" presente en la alimentación fresca.

■ Experimental, ◆ Modelado

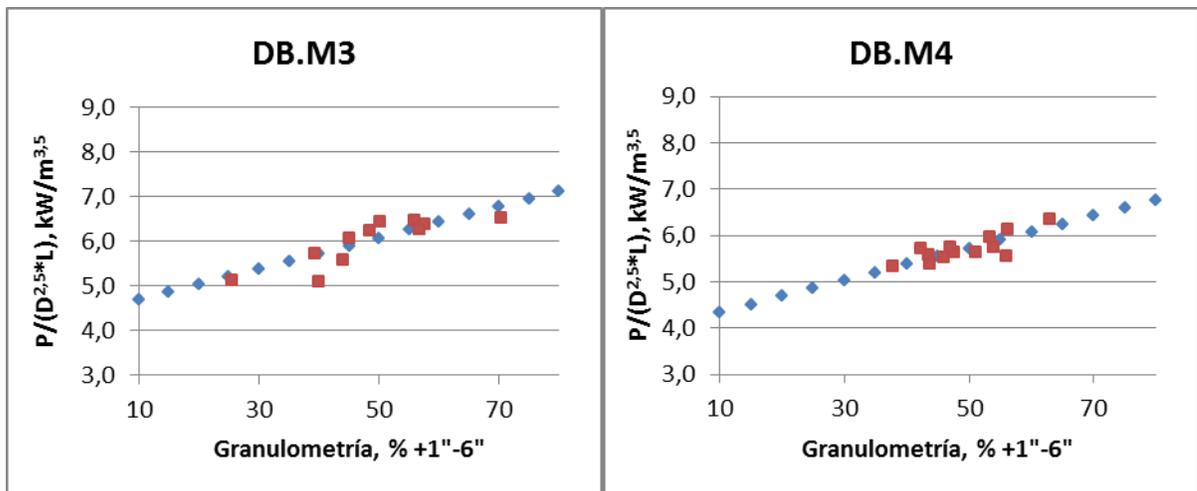


Figura 77. Potencia normalizada en función del % -1" presente en la alimentación fresca.

■ Experimental, ◆ Modelado

Visualmente se evidencia la cercanía entre los datos reales y los que ofrece el modelo lineal, presentando ambos la misma tendencia.

El segundo análisis para la validación del modelo corresponde a la cuantificación de la dispersión de los datos modelados en torno a los reales, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación.

$$Error (\%) = 100 * \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}}}{\bar{x}} \quad (20)$$

Donde:

x_i : dato real

\hat{x}_i : dato modelado

n : número de datos

\bar{x} : media aritmética (datos reales)

Al determinar el valor del error para el modelo en cada una de las bases de datos, los resultados son los siguientes:

Tabla 15. Error del modelo de potencia, evaluado para cada base de datos considerada.

Base de datos	Error(%)
DB.M1	2,1
DB.M2	5,5
DB.M3	4,5
DB.M4	2,9
Valor Promedio	3,7

Se puede observar que el mejor ajuste para el modelo de potencia consumida, se obtiene para las bases de datos DB.M1 y DB.M4, con un valor del error de 2,1% y 2,9% respectivamente, mientras que para las demás bases de datos el valor máximo del error llega sólo a un 5,5%.

El valor del error promedio entre todas las bases de datos, corresponde a un 3,7%. Dado que valores iguales o inferiores al 5%, en modelos de esta naturaleza, se consideran representativos de un buen ajuste, se confirma que el modelo de potencia desarrollado determina con un alto grado de precisión el valor real de la potencia consumida por el molino SAG, por lo que su uso se puede aplicar para labores de ingeniería o de cualquier otra índole correspondiente.

5.3. Modelo de Consumo Específico de Energía del molino SAG

Para la creación de este modelo se sigue exactamente la misma metodología empleada en el caso de la potencia consumida. En primer lugar, se observa el comportamiento del CEE.SAG(kWh/t) en función de la granulometría de alimentación fresca, para todas las bases de datos en un mismo gráfico. En este caso y tal como se definió para el modelo de potencia, el parámetro de entrada para el desarrollo de la herramienta predictiva lo constituye la granulometría intermedia. Los argumentos son exactamente los mismos que los discutidos para el modelo de potencia consumida.

Para este caso no se necesita desarrollar ningún tipo de escalamiento que permita validar la comparación entre las distintas faenas. La razón de ello es que el CEE.SAG (kWh/t) pondera la potencia del molino por su capacidad de tratamiento. De esta manera las dimensiones del molino SAG se encuentran consideradas de manera implícita en la magnitud de esta variable y es posible desarrollar una comparación directa entre las distintas bases de datos.

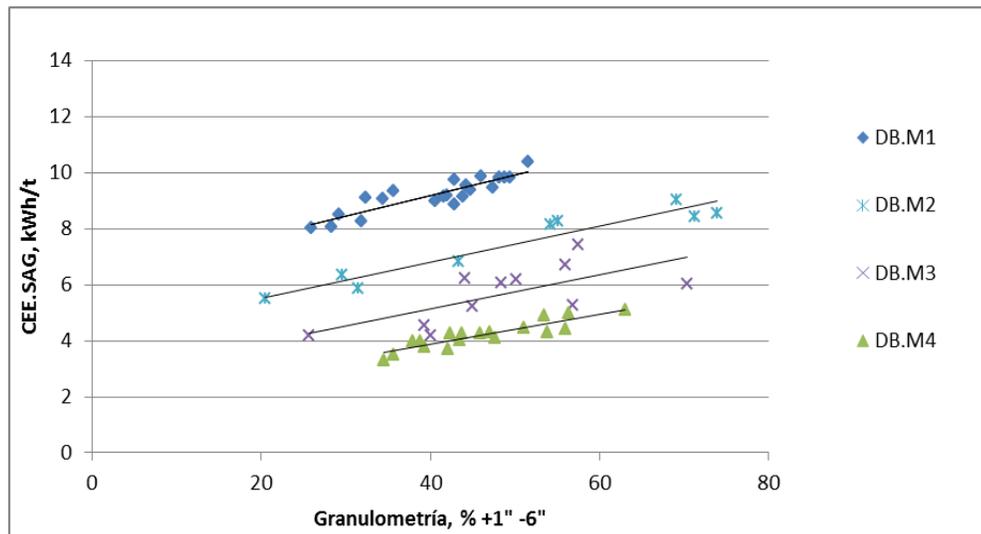


Figura 78. Consumo específico de energía en función del % +1" -6", para las distintas bases de datos.

En este caso también se evidencia un comportamiento genérico para el CEE.SAG (kWh/t) en función de la granulometría intermedia en la alimentación fresca, en todas las bases de datos. Al igual que con la potencia normalizada del molino SAG, el valor adquirido por la variable CEE.SAG (kWh/t) dependerá linealmente de la granulometría intermedia, obteniéndose un modelo de la misma forma que el desarrollado para P_{cp} ($kW/m^{3.5}$), como se muestra a continuación:

$$CEE.SAG = \dot{m} * (+1" - 6") + \dot{n}$$

En este caso se caracteriza a la pendiente y el coeficiente, como \hat{m} y \hat{n} respectivamente, para diferenciarlos de los parámetros correspondientes al modelo de potencia consumida. Se evidencia, en la Figura 78, que las pendientes para las líneas de regresión son similares, por lo que se espera constatar la existencia de un comportamiento de carácter universal en todas las bases de datos, identificado a través de una pendiente genérica.

Tabla 16. Magnitudes de las pendientes y coeficientes de correlación de las líneas de tendencia para el CEE.SAG (kWh/t)

Base de datos	Pendiente “m” de la línea de regresión	R²
DB.M1	0,073	0,79
DB.M2	0,064	0,92
DB.M3	0,061	0,47
DB.M4	0,054	0,81
Promedio	0,063	0,75
Desviación Estándar	0,008	0,19

En este caso la desviación estándar de las pendientes muestra un grado de dispersión, respecto al valor promedio, mayor al del caso de la potencia consumida por el molino SAG. El valor de la desviación estándar para las pendientes, en el gráfico de la Figura 78, corresponde a un 12,7% de la media aritmética entre las mismas, superior a la magnitud alcanzada para el caso de la potencia consumida, de un 5,7%.

A pesar de esta mayor dispersión reportada para las pendientes, aún se considera lo suficientemente pequeña como para asumir que el comportamiento del CEE.SAG (kWh/t) frente a la granulometría, es de carácter universal. Asociado a esta mayor dispersión en la pendiente, se halla lo poco representativo de los puntos asociados a DB.M3, cuyo coeficiente de correlación explica menos del 47% de los datos para el comportamiento evidenciado (ver Tabla 16).

Se procede a la determinación de la pendiente genérica para el modelo de consumo específico de energía del molino SAG. Para ello se aplica la misma metodología utilizada en la determinación de la pendiente “m” del modelo de potencia consumida, por lo que se recurre nuevamente al uso de la aplicación *Solver*. En esta caso y luego de la optimización desarrollada por dicha herramienta, el valor arrojado para la pendiente “ \hat{m} ” es de 0,063, con lo cual se obtiene el primer parámetro del modelo de consumo específico de energía del molino SAG.

Como se puede ver en la Figura 78, no todas las curvas calzan en la misma posición. Existe, al igual que en la potencia consumida por el molino SAG, un desplazamiento que sólo afecta la posición de las distintas curvas. La explicación que se maneja para esto es la misma que la discutida en el modelo de potencia, es decir, existe un cambio de las condiciones bajo las que se encuentra operando el molino SAG, entre una faena y otra, que genera los desplazamientos de las curvas, evidenciados en la Figura 78.

Tabla 17. Pendiente genérica y coeficientes de posición asociados, para cada base de datos.

Base de datos	Coefficiente de posición “n”	Pendiente “m”
DB.M1	6,65	0,063
DB.M2	4,28	0,063
DB.M3	2,57	0,063
DB.M4	1,28	0,063

En este caso, al igual que en el de la potencia consumida, se observa una relación del coeficiente de posición con el nivel de llenado con bolas, $J_b(\%)$, del molino asociado a cada base de datos.

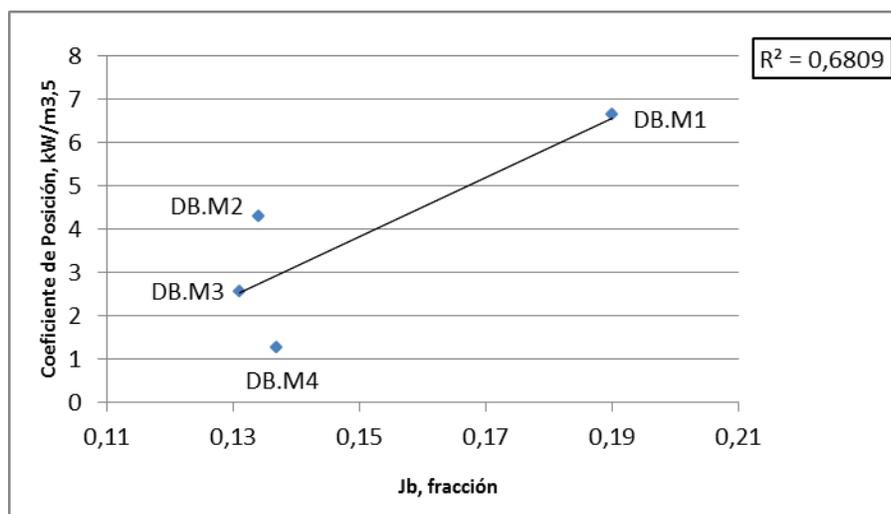


Figura 79. Coeficiente de posición n en función del J_b (%) para cada base de datos.

A partir de la Figura 79 se aprecia claramente que el coeficiente de posición de las curvas no depende exclusivamente del porcentaje de llenado con bolas en el molino SAG. Otro factor importante de observar, es que en este caso el coeficiente de correlación es muy bajo, mucho más que el ofrecido en el mismo contexto (ver Figura 73) para el caso de la potencia consumida, lo que ratifica la falta de linealidad entre “ n ” y $J_b(\%)$.

Dado lo anterior, se adiciona la segunda variable de consideración, la velocidad del molino SAG, como variable exógena para el coeficiente de posición. Se desarrolla la regresión lineal bivariable y se comparan los resultados modelados con los originales.

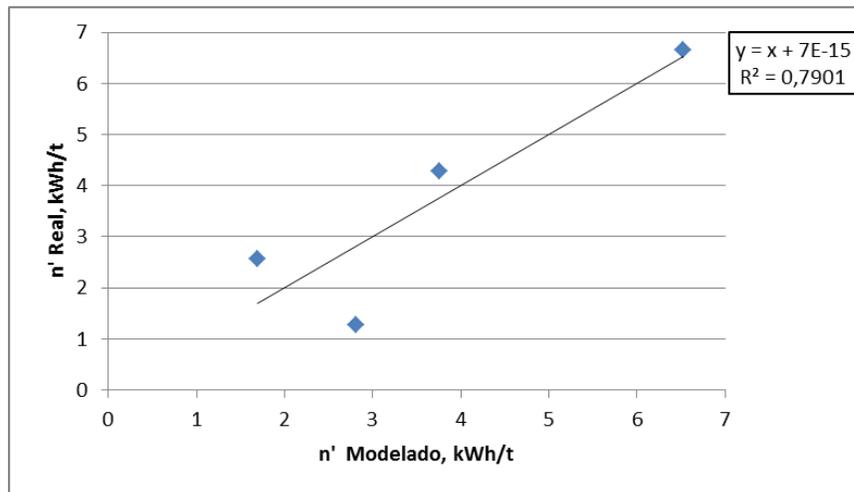


Figura 80. \hat{n} Real versus \hat{n} Modelado con el modelo vibariable en función de N/Nc (%) y Jb (%).

Aun cuando la línea de regresión de la Figura 80 representa la igualdad y el coeficiente de correlación podría ser considerado como aceptable, la alta dispersión asociada a la poca cantidad de puntos observados, hace que se descarte la posibilidad de un modelo lineal bivariable que explique la magnitud del coeficiente de posición “ \hat{n} ”. Dado lo anterior, se adiciona la tercera variable en consideración, el Cp(%) de la pulpa en el molino SAG, para el desarrollo de una regresión lineal en función de las tres variables seleccionadas. En este caso y para mantener a los dos modelos en un mismo formato, el ingreso de esta tercera variable a la regresión es a través de su inverso multiplicativo (1/Cp).

Para la realización de la regresión lineal, no se considera la adición de una constante. La lógica es exactamente la misma que la considerada para el “n” del modelo de potencia consumida, ya que en este caso se está analizando una variante directa de este parámetro. La condición que hace que el modelo de potencia consumida se reduzca a cero, genera el mismo efecto en el modelo de CEE.SAG (kWh/t), razón por la cual el modelo en función a 3 variables para “ \hat{n} ”, no debe considerar una constante.

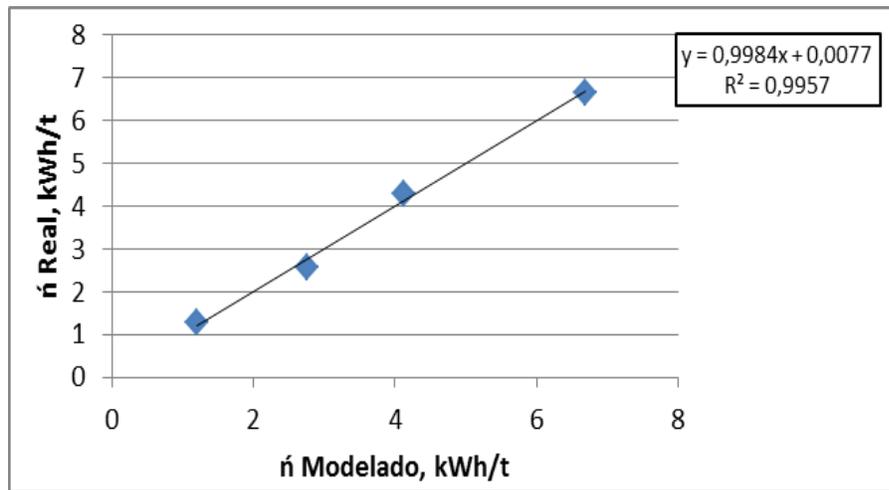


Figura 81. \dot{n} Real versus \dot{n} Modelado con el modelo trivariable, en función de $N/N_c(\%)$, $J_b(\%)$ y $C_p(\%)$.

En este caso, la adición del parámetro $C_p(\%)$ a la regresión ayuda ampliamente a explicar la variable que se desea describir, lo que se puede apreciar por el alto coeficiente de correlación en el gráfico de la Figura 81 (correlación del 99,6%) que representa la baja dispersión de los puntos respecto a la igualdad. Con esto se da término al proceso de determinación del “ \dot{n} ” para el modelo de consumo específico de energía del molino SAG, lo que sumado a la obtención de la pendiente “ \dot{m} ” para el mismo, define por completo la forma de la ecuación predictiva para este índice (ver Ecuación 21).

$$CEE.SAG\left(\frac{kWh}{t}\right) = 0,063 * \%(+1'' - 6'') + \left[75,3 * J_b - 45 * \frac{N}{N_c} + 18,3 * \frac{1}{C_p}\right] \quad (21)$$

En este caso, la forma del modelo es mucho más sencilla que la obtenida para el caso de la potencia consumida, debido a que no existe un factor que pondere toda la expresión, lo que constituye una ventaja frente al modelo anterior (simplicidad). En ambos casos, el amplio factor de peso asociado al nivel de llenado con bolas en el molino SAG, $J_b(\%)$, deja ver la mayor influencia de este parámetro en el perfil energético/productivo del molino, frente a las demás variables consideradas (N/N_c y C_p).

Dado que la granulometría fina es prácticamente el complemento porcentual de la intermedia, debido a la poca variabilidad de la granulometría gruesa, es posible obtener un modelo para el CEE.SAG (kWh/t), únicamente en función de la granulometría fina (ver Ecuación (*21)). Esto otorga mayor flexibilidad a la utilización del modelo de consumo específico de energía, permitiendo ajustarse a cualquiera de los dos rangos granulométricos usualmente utilizados para caracterizar la alimentación fresca de las plantas de molienda en operación.

$$CEE.SAG\left(\frac{kWh}{t}\right) = -0,057 * \%(-1'') + \left[83,9 * J_b - 44,8 * \frac{N}{N_c} + 21,4 * \frac{1}{C_p}\right] \quad (* 21)$$

5.3.1. Validación del modelo de Consumo Específico de Energía del molino SAG

Se procede a evaluar la calidad del modelo creado, midiendo la desviación de los datos modelados frente a los reales. Para ello, en primera instancia se evalúa la forma que ofrecen los datos modelados frente a los reales, a través del gráfico de CEE.SAG (kWh/t) en función de la granulometría intermedia. La idea de este análisis gráfico es identificar que tan bien siguen los puntos calculados con el modelo, a los datos reales. En las Figuras 82 y 83 los datos de color rojo representan los valores reales y los de color azul los obtenidos a partir del modelo.

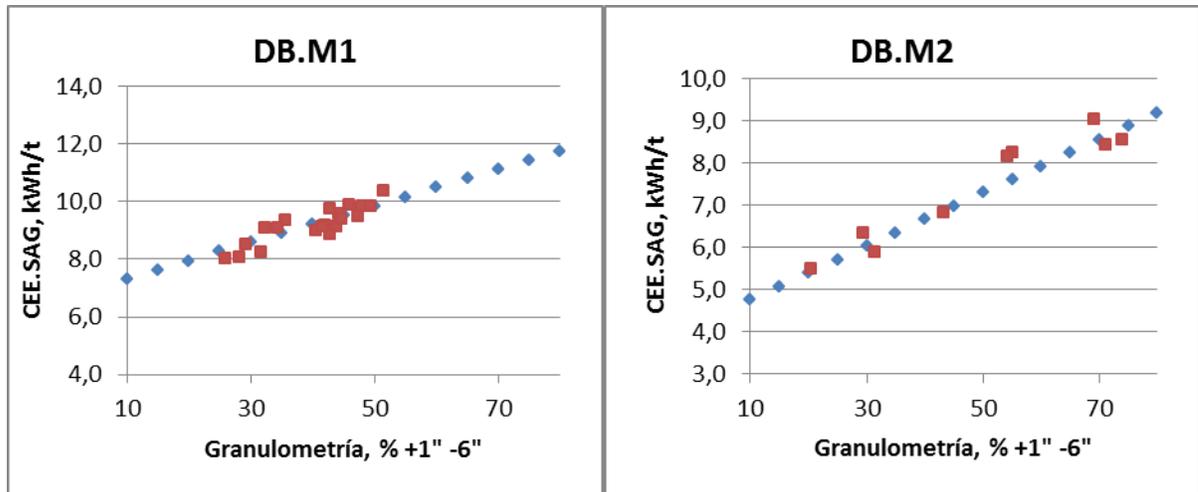


Figura 82. Consumo específico de energía en función de la granulometría intermedia, para DB.M1 y DB.M2.
■ Experimental, ♦ Modelado

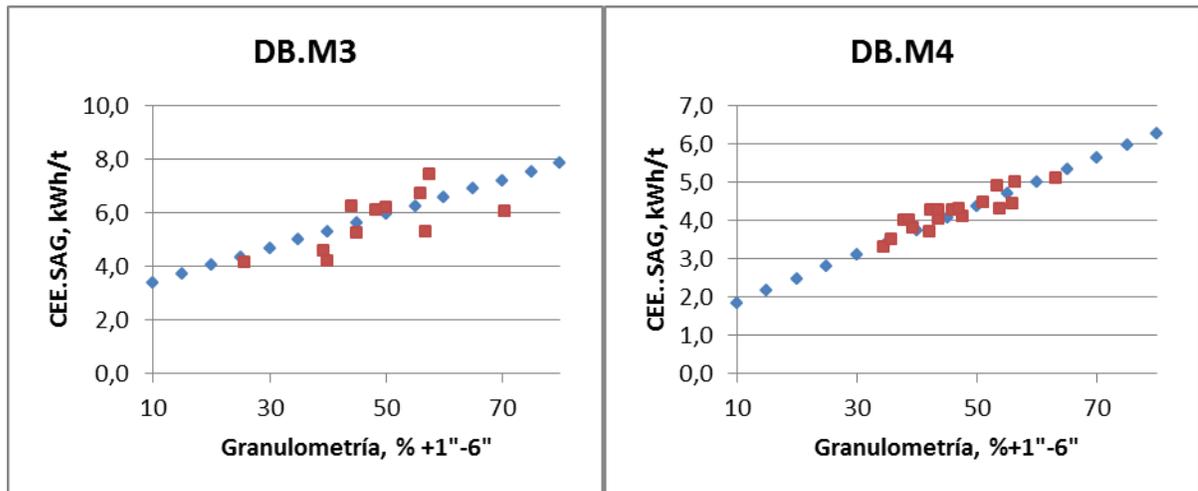


Figura 83. Consumo específico de energía en función de la granulometría intermedia, para DB.M3 y DB.M4.
■ Experimental, ♦ Modelado

Se puede apreciar, en los gráficos de las Figuras 82 y 83, el buen ajuste ofrecido por el modelo, al seguir los datos modelados la misma tendencia ofrecida por los datos reales de color rojo. A pesar de ello, es claro evidenciar visualmente cuáles serán las bases de datos respecto a las cuales el modelo presentará un mayor error.

En DB.M3 se aprecia, según lo que indica el gráfico ubicado a la izquierda en la Figura 83, la gran dispersión de los datos reales respecto a los modelados, sin embargo, esto se debe a un problema procedente de la base de datos asociada.

DB.M3 presenta una alta dispersión en sus datos, la que se pudo apreciar inicialmente por el mal ajuste del CEE.SAG (kWh/t) en función de la granulometría intermedia, con un coeficiente de correlación inferior al 47% (ver Tabla 16). Considerando que el modelo planteado es de tipo lineal, los datos generados por el mismo se ajustan de manera perfecta a una línea recta, por lo que resulta evidente que al compararlo con los datos reales de DB.M3, que de por sí presentan una alta dispersión, se observe una ajuste inferior al deseado.

Al determinar el valor del error para el modelo de CEE.SAG (kWh/t) en cada una de las bases de datos, los resultados son siguientes:

Tabla 18. Error del modelo de consumo específico de energía, para cada base de datos.

Base de datos	Error(%)
DB.M1	3,1
DB.M2	5,2
DB.M3	13,4
DB.M4	5,5
Valor Promedio	6,8

El error promedio obtenido para el modelo de consumo específico de energía del molino SAG, alcanza el 6,8%, superior al 5% requerido para validar un buen ajuste. Lo anterior se debe al mayor error calculado para DB.M3, de un 13,4%, el que supera en más del doble a cada una de las 3 bases de datos restantes. Este resultado refleja lo comentado respecto a la Figura 83, en donde es posible observar el alto grado de dispersión de los datos reales para DB.M3 en torno al modelo propuesto.

El alto error observado en la base de datos DB.M3, es consecuencia de la gran dispersión ofrecida al relacionar el consumo específico de energía con la granulometría intermedia en la alimentación fresca, tal como lo indica la Figura 78. La línea de regresión que mejor se ajusta a los puntos de esta relación, corresponde a la ofrecida por la aplicación *Excel*, de manera que cualquier otra recta o modelo lineal que intente representar la tendencia de los datos de DB.M3, tendrá un ajuste peor o igual. Dado que el coeficiente de correlación R^2 , obtenido para la línea de regresión sugerida por el programa *Excel*, explica sólo el 47% de los datos para DB.M3, representar dicha tendencia mediante un modelo lineal, cualquiera sea éste, conllevará a resultados poco satisfactorios.

Respecto al modelo de consumo específico de energía en función de la granulometría fina, definido por la Ecuación (*21), éste presenta un error promedio del 7%, siendo levemente superior al error observado en el modelo de CEE.SAG (kWh/t) en función de la granulometría intermedia, hecho que abala aún más la preferencia por la granulometría intermedia como input del modelo y como parámetro de control en la operación.

Los resultados permiten confirmar que el comportamiento ofrecido por el consumo específico de energía del molino SAG en función de la granulometría, al estar asociada la primera de manera directa con el tonelaje de alimentación fresca, no es del todo representativo. Lo anterior se debe a la variabilidad que afecta al tonelaje de alimentación fresca al circuito, provocada por parámetros e influencias internas, pero también externas. La magnitud del tonelaje de alimentación fresca se manipula directamente y se somete a las decisiones y criterios de quienes controlan la operación, por lo que esta variable estará provista de un mayor ruido y por tanto un mayor sesgo que la potencia consumida.

5.4. Modelo adicional para el tonelaje de alimentación fresca

Dado que se cuenta con un modelo predictivo para la potencia consumida por el molino SAG y otro para el consumo específico de energía del mismo, por medio de ambos es posible modelar el tonelaje de alimentación fresca a la planta. La razón de esto reside en la forma del consumo específico de energía, correspondiente al cociente entre la potencia consumida por el molino SAG y el tonelaje de alimentación fresca, de manera que la modelación de esta última correspondería a una división entre los dos modelos construidos anteriormente, según la siguiente expresión:

$$Gsf \left(\frac{t}{h} \right) = \frac{Pc \text{ SAG } (kW)}{CEE.SAG \left(\frac{kWh}{t} \right)}$$

Dejando cada uno de los términos del lado derecho expresados según la ecuación del modelo que los define, se llega a la siguiente fórmula:

$$Gsf(t/h) = \frac{(D^{2,5} * L) * \left\{ m * \%(+1'' - 6'') + \left[26,4 * Jb - 6,7 * \frac{N}{Nc} + 4 * \frac{1}{Cp} \right] \right\}}{\dot{m} * \%(+1'' - 6'') + 75,3 * Jb - 45 * \frac{N}{Nc} + 18,3 * \frac{1}{Cp}} \quad (22)$$

El modelo propuesto corresponde exactamente a la división entre los modelos de potencia consumida y consumo específico de energía del molino SAG, por lo que queda definido en función de las mismas variables que han sido consideradas anteriormente, entre las cuales la más importante corresponde a la granulometría intermedia presente en la alimentación fresca.

A pesar de que el álgebra del modelo es un tanto compleja, los resultados ofrecidos por el mismo resultan satisfactorios. En los gráficos de las Figuras 84 y 85 se aprecia las tendencias ofrecidas por los datos reales (en rojo) y los datos generados por el modelo (en azul) para el tonelaje de alimentación fresca en función de la granulometría intermedia.

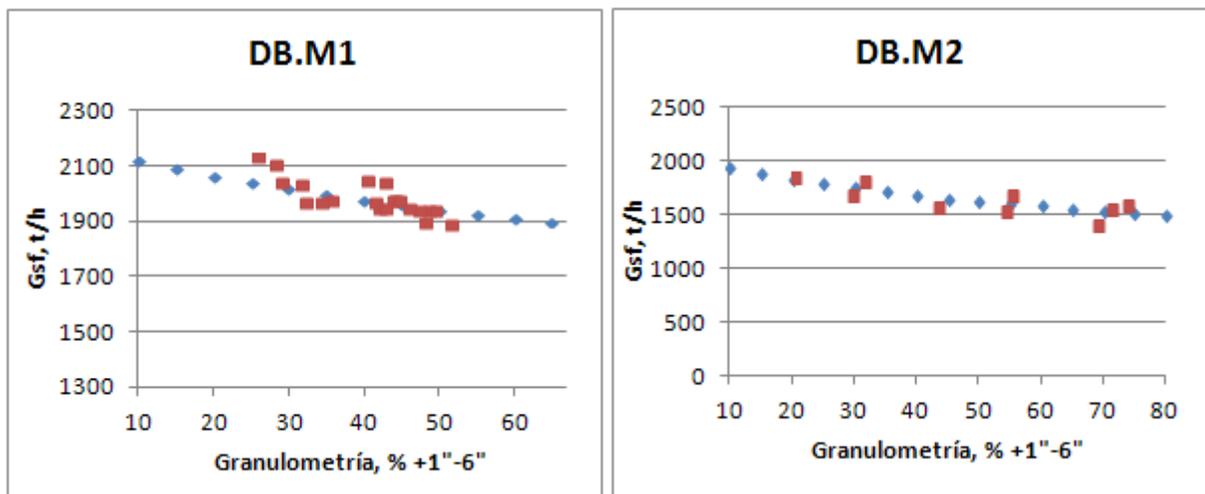


Figura 84. Alimentación fresca en función del % +1'' -6'' presente en la misma, para DB.M1 y DB.M2 respectivamente.

■ Experimental, ♦ Modelado

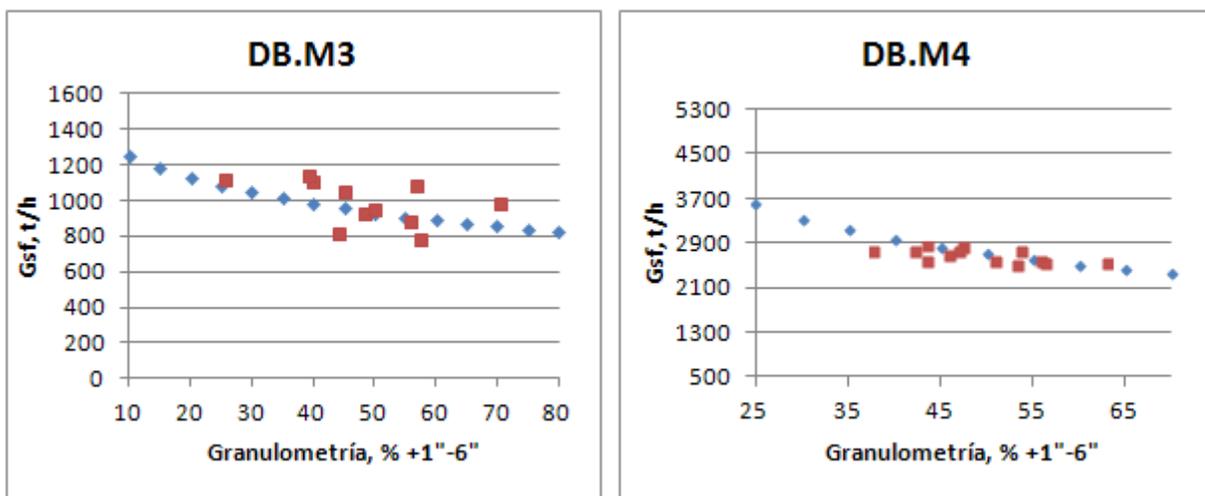


Figura 85. Alimentación fresca en función del % +1"-6" presente en la misma, para DB.M3 y DB.M4 respectivamente.
 ■ Experimental, ◆ Modelado

Es posible evidenciar visualmente, que el ajuste del modelo de tonelaje a los datos reales es satisfactorio en la mayoría de los casos, sin embargo, en DB.M3 los puntos ofrecen una dispersión muy alta. Lo anterior se debe meramente a una propagación de errores, principalmente el asociado a los datos modelados de CEE.SAG (kWh/t) para DB.M3, que adquiere un valor de 13,4%. Al desarrollar la división con el modelo de potencia, la magnitud de este error se propaga hacia la predicción del tonelaje de alimentación fresca para DB.M3.

El cálculo del error para el modelo de tonelaje, permite obtener los resultados indicados en la Tabla 19.

Tabla 19. Error del modelo de tonelaje de alimentación fresca, calculado para cada base de datos.

Base de datos	Error(%)
DB.M1	2,1
DB.M2	4,9
DB.M3	11,8
DB.M4	4,9
Valor Promedio	5,9

Tal como se había comentado, el mayor error para el modelo del tonelaje de alimentación fresca se registra para la base de datos DB.M3, con un valor de 11,8%, correspondiendo al doble de la magnitud del error promedio.

Por otra parte, el error del modelo para cada una de las demás bases de datos es inferior al 5%, por lo que para éstas el ajuste del modelo resulta satisfactorio, siendo el mejor aquel asociado a la base de datos DB.M1, con 2,1% de error.

En base a los resultados obtenidos, DB.M3 representa el caso con mayores problemas de ajuste para los modelos de consumo específico de energía y tonelaje de alimentación fresca. A pesar de ello, la misma base de datos no ofrece problemas similares respecto al modelo de potencia consumida, en donde el valor del error fue de un 4,5%, magnitud representativa de un buen ajuste. De acuerdo a esto es posible evidenciar que la variable “potencia consumida” por el molino SAG sufre de muchas menos perturbaciones externas que la alimentación fresca y el consumo específico de energía del molino SAG; por ende constituye un parámetro mucho más confiable, que otorga a su modelo una mayor calidad predictiva.

Al considerar que los valores de tonelaje en DB.M3 no son representativos, parecería consecuente descartar esta base de datos del estudio, sin embargo, aquello no es posible debido a que la información asociada al consumo de potencia de su molino SAG si resulta representativa. Además, el descartar esta base de datos acotaría a sólo tres los escenarios en los que se basa la construcción de los modelos, disminuyendo con ello el grado de generalidad requerido para su validación.

En base a lo discutido en el párrafo anterior, se podría pensar en considerar todas las bases de datos para la elaboración del modelo de potencia consumida y descartar, para la construcción del modelo de CEE.SAG (kWh/t), la base de datos DB.M3, sin embargo, con esto no sería posible desarrollar el modelo de tonelaje a través del cociente (Ecuación 22), debido a que los modelos involucrados en la división no estarían correlacionados de acuerdo a la misma información base.

Para corroborar si existe un problema asociado a la representatividad de los datos del tonelaje de alimentación fresca, se analiza este último en función de la granulometría intermedia en la alimentación fresca para DB.M3. En caso de que los datos sean representativos, debiese observarse una disminución (pendiente negativa) en la capacidad productiva de la planta con el incremento de la granulometría intermedia en la alimentación fresca, con un coeficiente de correlación aceptable (igual o superior al 50%).

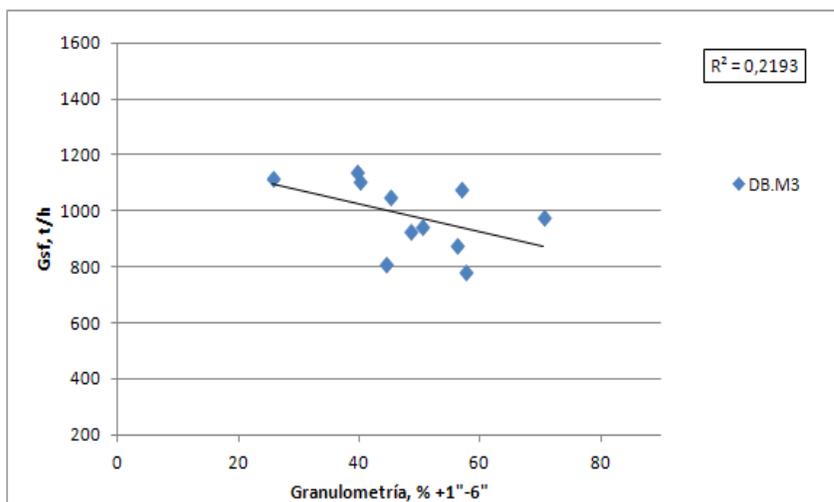


Figura 86. Alimentación fresca en función del % +1"-6" presente en la misma, para la base de datos DB.M3.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 86, el comportamiento es consecuente con lo discutido en el párrafo anterior (pendiente negativa), sin embargo, el coeficiente de correlación explica tan sólo el 22% de los datos, demasiado bajo para validar la existencia de una relación o tendencia entre estas dos variables. Lo anterior indica que los datos de tonelaje de alimentación fresca no son representativos para esta base de datos, por ende su influencia dentro del estudio se vuelve negativa.

Para verificar lo que ocurre en el caso de la granulometría fina y descartar cualquier problema asociado particularmente al rango intermedio, se evalúa la influencia de los finos, % -1", sobre el tonelaje de la alimentación fresca. En este caso, para que los datos fuesen representativos, el porcentaje de granulometría fina en la alimentación fresca debería ayudar a incrementar la capacidad de tratamiento de la planta, obteniéndose una curva de pendiente positiva.

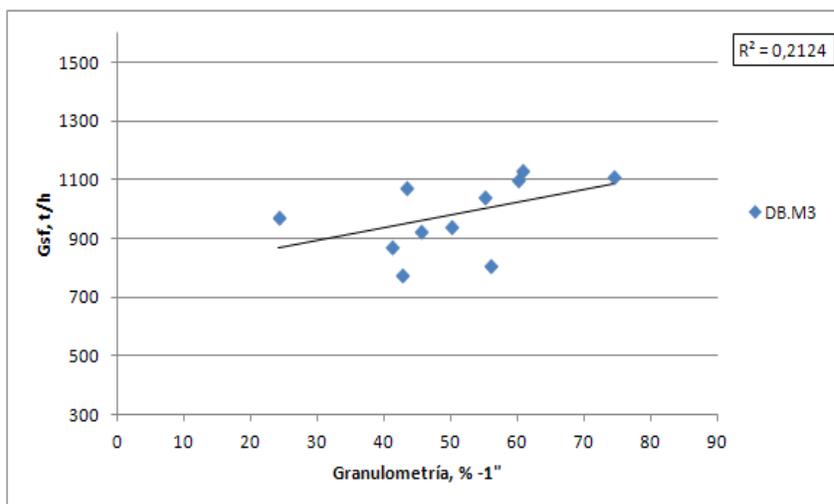


Figura 87. Alimentación fresca en función del % -1" presente en la misma, para la base de datos DB.M3

En el caso de la granulometría fina, se evidencia el comportamiento esperado sobre la alimentación fresca, sin embargo, el bajo coeficiente de correlación, que explica en este caso el 21% de los datos, es inaceptable para validar la tendencia observada. Finalmente, tanto para la granulometría fina como la intermedia en DB.M3, los resultados sobre el tonelaje de alimentación fresca son altamente dispersos y poco representativos, apreciándose la amplia influencia de perturbaciones externas sobre el sistema evaluado.

De manera paralela a la obtención del modelo de tonelaje descrito por la Ecuación 22, se procede a la creación de otro modelo para predecir la misma variable, utilizando datos directos de tonelaje de cada base de datos y por tanto siguiendo la misma metodología empleada para la creación de los modelos de potencia consumida y consumo específico de energía del molino SAG. Se observa en primer lugar el comportamiento del tonelaje de alimentación fresca en función de la granulometría intermedia, para las distintas bases de datos.

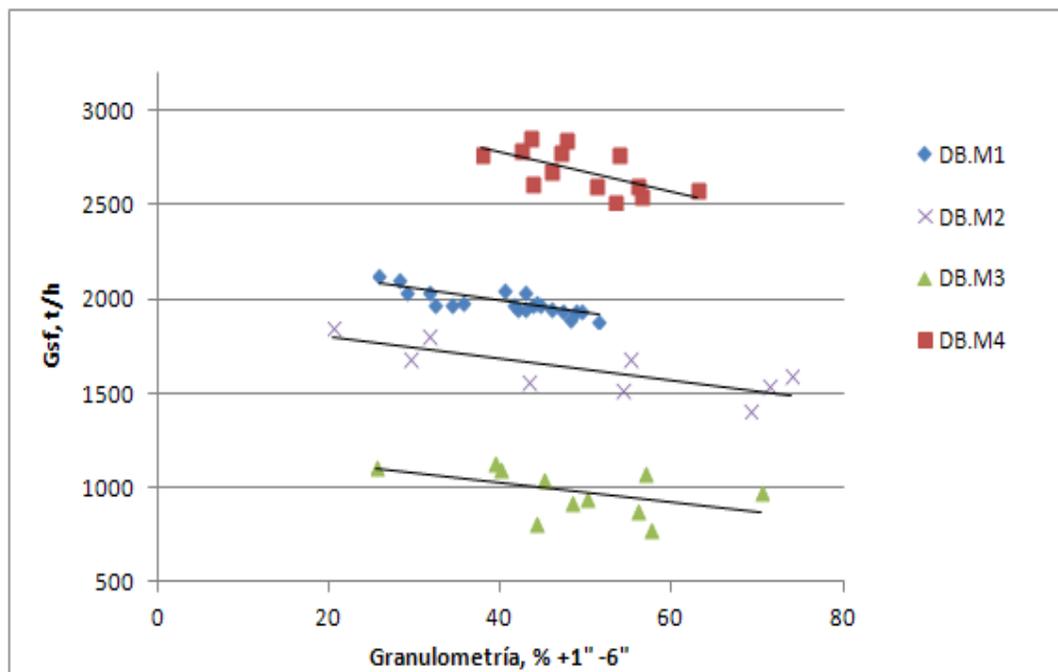


Figura 88. Tonelaje de alimentación fresca en función del % +1" -6" presente en la misma, para cada caso.

Como se aprecia en el gráfico de la Figura 88, la tendencia para todas las bases de datos es exactamente la misma, es decir, existe una influencia negativa de la granulometría intermedia sobre la capacidad de tratamiento del circuito de molienda. A pesar de esto, las diferencias de pendiente entre cada curva evidencian una influencia distinta de la granulometría sobre el tonelaje de alimentación fresca, al pasar de una base de datos a otra, por lo que no es posible identificar un comportamiento de tipo genérico.

Tabla 20. Parámetros de las líneas de regresión, para Gsf (t/h) en función del % +1” -6” presente en la alimentación fresca.

Base de datos	Pendiente “m” de la línea de regresión	R ²
DB.M1	-6,49	0,64
DB.M2	-5,63	0,62
DB.M3	-4,97	0,22
DB.M4	-10,54	0,39
Promedio	-6,91	0,47
Desviación Estándar	2,50	0,20

De acuerdo a las pendientes (ver Tabla 20) y el alto valor de la desviación estándar para las mismas, correspondiente al 36% del valor promedio, se comprueba que el comportamiento del tonelaje de alimentación fresca en función de la granulometría considerada, no es de tipo genérico, por lo que no es viable la creación de un modelo siguiendo la misma metodología empleada para el caso de la potencia y el consumo específico de energía del molino SAG.

Si se creara un modelo predictivo para el tonelaje de alimentación fresca de acuerdo a la metodología discutida en el párrafo anterior, se estaría asumiendo la existencia de una pendiente de validez universal, que por tanto se ajusta a todas las bases de datos. Dado que esto no ocurre, el modelo obtenido se vería ampliamente sesgado, acoplándose a los resultados de algunas faenas y desfasándose bruscamente respecto de otras.

6. FORMAS DE USO PARA LOS MODELOS DESARROLLADOS

El objetivo principal en el desarrollo de los modelos creados, corresponde a adicionar la granulometría de alimentación fresca como variable de control en la optimización del perfil energético y productivo del molino SAG, tanto para plantas en operación como para futuros proyectos. En este capítulo se busca orientar al lector respecto a los posibles usos para los modelos creados, en vías a lo comentado anteriormente.

6.1. Modelo para el Consumo Específico de Energía del molino SAG

6.1.1. Dimensionamiento

Un pronóstico del consumo específico de energía del molino SAG, en función de la granulometría intermedia presente en la alimentación fresca, permite desarrollar labores de ingeniería para el dimensionamiento de molinos SAG.

Cuando se requiere dimensionar el molino SAG para el procesamiento de un mineral dado, es usual contar con el valor del consumo específico de energía de dicho mineral. Este valor se obtiene derivado de distintas pruebas desarrolladas a escala piloto o desde el laboratorio. Entre las pruebas de conminución más conocidas y utilizadas se encuentran el SPI, DWT, SMC y más recientemente el SAGDesign. Dado que el consumo específico de energía del molino SAG representa la cantidad de potencia requerida por unidad de tonelaje de mineral procesado, la potencia total requerida por el molino Semiautógeno para moler un determinado flujo másico o satisfacer el plan productivo para la planta, estará determinada de la siguiente manera:

$$Pc\ SAG_{requerida}(kW) = CEE.SAG \left(\frac{kWh}{t} \right) * Gsf \left(\frac{t}{h} \right)$$

Gsf (t/h) corresponde a la alimentación fresca o la demanda productiva para la planta, por lo que en este caso el valor obtenido de Pc SAG (kW), refleja la potencia total requerida para moler el mineral, asociado a la meta productiva. Con este último parámetro se determinan las dimensiones del o los molinos SAG requeridos, igualando la magnitud de éste con algunas de las ecuaciones convencionales de potencia y despejando posteriormente las dimensiones del molino (diámetro y largo).

$$Pc\ SAG = Modelo\ convencional\ de\ consumo\ de\ potencia = (D^{2,5} * L) * f(Jt, Jb, \rho_{apc}, \frac{N}{Nc})$$

Dejando las dimensiones en un sólo lado:

$$(D^{2,5} * L) = \frac{Pc \text{ SAG}}{f(Jt, Jb, \rho_{apc}, \frac{N}{Nc})} \rightarrow \text{Se obtienen } D \text{ y } L$$

Fijando una relación D:L para el molino SAG (usualmente entre 1 y 2) y definiendo las condiciones operacionales del mismo $(Jt, Jb, \rho_{apc}, \frac{N}{Nc})$, se pueden despejar las dimensiones del o los molinos requeridos para cumplir con las demandas productivas.

El modelo de CEE.SAG (kWh/t) es fundamental para el desarrollo de etapas tempranas de ingeniería, tales como un Estudio de Perfil o Conceptual, en donde el nivel de caracterización del yacimiento aun no es completo y no se cuenta con índices que permitan determinar el valor efectivo del consumo específico de energía del mineral. En dicho caso, conociendo la granulometría asociada al Stockpile de la planta, se puede determinar el valor para este parámetro y así desarrollar el posterior dimensionamiento del molino SAG.

El valor predicho por el modelo, para el caso comentado en el párrafo anterior, es fundamental, debido a que en etapas tempranas de ingeniería el interés principal está en estimar el costo total que implica llevar a cabo el proyecto. Para ello, el contar con las dimensiones de los equipos, en particular las del molino SAG, es fundamental para una mejor estimación de los costos, especialmente los de inversión. Por otra parte, el uso del modelo de CEE.SAG (kWh/t) permite independizar a la empresa de ingeniería y a la misma planta, del laboratorio que desarrolla las pruebas para la estimación de este parámetro, ahorrando con ello los costos y el tiempo asociados a su realización.

6.1.2. Control de la operación

Otro uso fundamental para el modelo, corresponde al que se puede llevar a cabo en la optimización y el control de la operación. En las plantas de molienda se suelen desarrollar planes de tipo mensual e inclusive semanal, para cumplir con determinadas metas. La meta productiva es una de las principales a cumplir, sin embargo, también se fijan planes para otros parámetros de la operación, tales como el consumo de agua, granulometría final del producto, consumo de potencia de los molinos, consumo específico de energía, entre otros.

Dicha programación se desarrolla a partir del modelo de bloques completo del yacimiento, en donde éste y el mineral asociado se encuentran caracterizados con un alto nivel de detalle. Al contar con las pruebas metalúrgicas e índices derivados de las mismas, es posible establecer el perfil energético del mineral a tratar. De acuerdo a esto y junto con el tonelaje de alimentación fresca que se debe procesar, se hace un pronóstico respecto al consumo específico de energía que debiese reportarse en la operación.

Si el valor del CEE.SAG (kWh/t) es mayor al que se espera obtener de acuerdo a la planificación, se estaría trabajando fuera de las condiciones esperadas y por lo tanto de manera ineficiente. Si bien se desea satisfacer la demanda productiva esperada para la planta de molienda, es necesario no sobrepasar por ello el consumo específico de energía establecido, debido a que los costos asociados a este insumo son cada vez más altos.

Para este tipo de situaciones se puede establecer un rango granulométrico, enfocado en la granulometría intermedia, que debe ser alimentado a la planta de molienda para no escapar del perfil energético determinado por la planificación. De esta manera se logra optimizar la operación, cumpliendo con el programa y las metas establecidas. Para lo anterior se deben fijar además los parámetros operacionales bajo los que trabaja el molino SAG ($Jt, Jb, \rho_c, \frac{N}{N_c}$). En este caso, el control de la granulometría para cumplir con el plan establecido, deberá desarrollarse sobre la mina, en particular sobre la tronadura, la que deberá modificarse para consolidar la granulometría calculada con el modelo.

Otra alternativa para cumplir con el rango granulométrico sugerido por el modelo de CEE.SAG (kWh/t), corresponde a la aplicación de una etapa de pre-chancado sobre el mineral proveniente del Stockpile. En este caso, el flujo de alimentación fresca a la planta, previo a molienda SAG, se clasifica con un harnero de doble bandeja, en donde la abertura de la malla superior corresponde al tamaño grueso (6") y la abertura de la malla inferior corresponde al tamaño fino (1"). De esta forma, se pre-clasifica el mineral de tamaño intermedio y se envía a una etapa de chancado. Posteriormente, el producto chancado, junto con el sobre tamaño del harnero (granulometría +6") y el bajo tamaño del mismo (granulometría -1"), es alimentado al molino SAG. De esta forma se logra controlar y reducir el porcentaje de granulometría intermedia alimentado a molienda SAG.

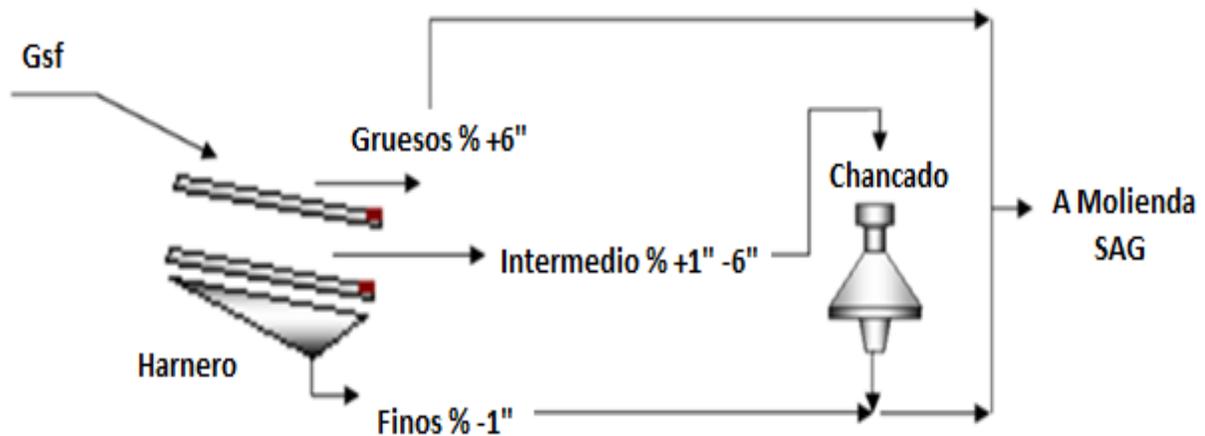


Figura 89. Esquema de un pre-chancado y sus flujos asociados.

6.2. Modelo para el Consumo de Potencia del molino SAG

6.2.1. Dimensionamiento

Si ya se cuenta con el valor del CEE.SAG (kWh/t) del mineral en el yacimiento, se puede determinar el consumo de potencia requerida para posteriormente desarrollar el dimensionamiento del o los molinos SAG necesarios. En este caso, el modelo para el CEE.SAG(kWh/t) no tendría utilidad, por cuanto dicho valor ya se encontraría disponible directamente a partir de pruebas metalúrgicas. Para este tipo de casos el modelo de potencia consumida adquiere utilidad, al poder utilizarse para determinar las dimensiones del molino SAG, en lugar de las ecuaciones convencionales de potencia consumida. La ventaja de este modelo, respecto a los modelos de potencia convencionales, es que considera como variable de entrada la granulometría de alimentación fresca, debido a lo cual determina las dimensiones del molino que cumple con las demandas productivas, pero que además se ajusta de mejor manera al perfil granulométrico del mineral alimentado.

Al acudir a los modelos convencionales de consumo de potencia del molino SAG para desarrollar labores de dimensionamiento, no se considera en éstos el efecto de la granulometría. Lo anterior resulta adverso para el funcionamiento del futuro molino que se está diseñando, ya que tal como se ha demostrado, la granulometría presente en la alimentación fresca influye de manera trascendental en el consumo de potencia, o de otro modo, en la capacidad productiva del equipo.

En el caso de una planta que procesa mineral con granulometría intermedia considerablemente alta, si se utilizara un modelo de potencia convencional, éste determinará las dimensiones del molino SAG que podrá alcanzar su máximo consumo de potencia, sin poder satisfacer al mismo tiempo las demandas productivas que se esperan para la planta. Como se menciona, esto se debe al desarrollo de un dimensionamiento que no considera la incidencia de la granulometría, que acota la capacidad de tratamiento del molino, para un mismo consumo de potencia. En dicho escenario el molino SAG se encontraría sub-dimensionado, lo que conllevaría a serios problemas, muchas veces irreversibles, tales como un cierre de la planta, post puesta en marcha de las operaciones.

El incidente asociado al ejemplo del párrafo anterior, se puede prevenir con la utilización del modelo de potencia construido, el que adecúa las dimensiones del molino a las características granulométricas del mineral a procesar. Para su utilización en dimensionamiento, se deben seguir una serie de pasos secuenciales, cada uno de los cuales se detalla a continuación.

Previo a la explicación, cabe mencionar que el modelo de potencia, para labores de dimensionamiento, tiene una labor correctiva. Su objetivo es corroborar si la potencia con la que se dimensionará el molino SAG a instalar, cumple con las demandas granulométricas de la alimentación, ya que si no se considera la granulometría en la potencia requerida para dimensionar el molino, este último podría terminar sub o sobre dimensionado.

Paso N°1: Determinación de la potencia requerida

Se determina la potencia total requerida para moler el mineral, a partir de la demanda productiva para la planta (Gsf) y el consumo específico de energía del mineral (CEE.SAG), este último calculado a partir de pruebas metalúrgicas desarrolladas en laboratorio o a escala piloto (asumiendo que ya han sido desarrolladas).

$$Potencia\ Requerida = P_R = Gsf * CEE.SAG$$

Paso N°2: Factor Ponderador

Dado que aún no se cuenta con las dimensiones del molino, se procede a estimar la magnitud de la potencia normalizada, $\left(\frac{P}{D^{2,5} * L}\right)$, la que se calcula a partir del modelo de potencia (Ecuación 19), para las condiciones de diseño, es decir, aquellas que tienen relación con la granulometría de alimentación fresca que se desea procesar, y para las condiciones estándar, bajo las cuales se obtuvo el valor del CEE.SAG (kWh/t).

Para lo anterior se asume que la determinación del CEE.SAG, independiente de la prueba, se desarrolló en base a una granulometría de tipo estándar, que para este caso se asumirá de igual magnitud que el porcentaje de granulometría intermedia promedio entre las cuatro bases de datos (45,8%), debido a que a partir de éstas se obtuvo el modelo de potencia.

$$\left(\frac{P}{D^{2,5} * L}\right)_{Diseño} : \text{considera el \% + 1"-6" a procesar por el molino SAG}$$

$$\left(\frac{P}{D^{2,5} * L}\right)_{Estándar} : \text{considera el \% + 1"-6" definido como estándar (45,8\%)}$$

En base a lo anterior, es posible obtener un factor ponderador (FP), que permite dar cuenta del efecto de la granulometría sobre la potencia, tomando como referencia la estándar:

$$FP = \frac{\left(\frac{P}{D^{2,5} * L}\right)_{Diseño}}{\left(\frac{P}{D^{2,5} * L}\right)_{Estándar}}$$

Paso N°3: Determinación de la potencia requerida efectiva.

Obteniendo el valor de FP es posible observar si el efecto de la granulometría sobre la potencia requerida resulta perjudicial ($FP > 1$), o beneficioso ($FP < 1$). Se procede a ponderar la potencia requerida, calculada en el Paso N°1, por dicho factor, obteniendo la “potencia requerida efectiva” para procesar el mineral:

$$Potencia\ Requerida\ Efectiva = P_{Ref} = P_R * FP$$

Esta potencia cuenta con las consideraciones granulométricas requeridas para evaluar y dimensionar el futuro molino SAG, pudiendo resultar de magnitud superior o inferior a P_R .

Paso N°4: Determinación de las dimensiones del molino SAG

Se iguala P_{Ref} con alguno de los modelos convencionales de potencia, como por ejemplo la Ecuación 5, evaluando para las condiciones operacionales deseadas (se asumen valores para J_b , J , N/N_c , C_p). Cabe indicar que tanto en éste paso, como en el N°2, se asumen las mismas condiciones operacionales para el molino SAG. Finalmente, utilizando la metodología clásica de dimensionamiento, se despejan las dimensiones del molino SAG, obteniéndose D y L :

$$P_{Ref} = P_c\ SAG(modelo\ convencional)$$

→ se obtienen D y L para el molino SAG

Finalmente se obtienen las dimensiones definitivas del molino requerido (D_2, L_2), el que cumple con las demandas productivas y granulométricas, evitándose con ello cualquier tipo de problema provocado por la variabilidad de tamaño del mineral durante la operación.

6.2.2. Modelamiento

Es recurrente en ingeniería acudir a distintas aplicaciones computacionales de simulación para representar lo que ocurre en una operación de molienda normal y predecir el resultado de las variables operacionales involucradas en el sistema. Uno de los aspectos más importantes que se espera por parte de estos simuladores, es que puedan desarrollar una buena representación de la realidad y que por ende puedan predecir con un alto nivel de precisión el valor de las distintas variables operacionales, en particular las referidas al perfil energético del circuito y del molino SAG.

El modelo de potencia consumida, en este caso, es útil para evaluar el dimensionamiento hecho para una planta de molienda SAG. En dicho caso el circuito ya se encontraría dimensionado, por lo que el uso del modelo busca chequear que el molino SAG sugerido para la planta cumpla con las demandas productivas de diseño.

Si se evalúa la situación, y el modelo de potencia consumida indica que la incidencia de la granulometría intermedia en el molino SAG es tal, que éste requiere consumir una potencia mayor a la que le permite su capacidad máxima (alrededor del 90% de su potencia instalada), entonces claramente el molino SAG seleccionado no es el requerido, pues se encuentra subdimensionado. En dicho caso la planta requiere necesariamente de un molino SAG de mayor envergadura, o bien que la granulometría de alimentación fresca deba modificarse para que el molino seleccionado pueda procesar el tonelaje exigido para la planta, ya que de lo contrario el plan productivo no podría satisfacerse.

La gran ventaja comparativa del modelo de potencia respecto a simuladores para molienda tales como el *JK SimMet*, reside en que su uso es gratuito, mientras que para la utilización de los simuladores computacionales se debe adquirir una patente de alto costo. Además, su uso debe ser desarrollado por personal experimentado, debido a que la interfaz y características de estos simuladores requieren de un entrenamiento previo, así como también de un amplio conocimiento y relativa experiencia con el programa. Sin embargo, es necesario mencionar que el uso para simulación del modelo de potencia se encontraría ampliamente limitado, debido a que se orienta estrictamente a la predicción del consumo de potencia del molino SAG.

Otra forma de uso para el modelo de potencia está orientada al escalamiento que se debe desarrollar para el modelamiento y/o simulación de procesos de molienda. Los simuladores utilizan como dato de entrada la función selección o la tasa de fractura del mineral, “Si”. Este parámetro se determina a través de índices obtenidos desde el laboratorio, a través de pruebas piloto o incluso desde molinos en operación, razón por la cual se requiere de un escalamiento que permita obtener el valor del “Si” respecto a las condiciones reales del molino que se desea representar en la simulación.

$$Si = Si^E * \frac{P}{H}$$

Lo que se busca con el escalamiento es obtener, por medio de la potencia (P), el Holdup del molino (H) y la función selección específica (Si^E), una función selección, Si, que sea lo más cercana o característica de la operación, para que el simulador pueda representar a ésta de la manera más fidedigna posible. Dado que el modelo de potencia que se desarrolla en este trabajo considera la granulometría intermedia en la alimentación, el escalamiento y por tanto la estimación del Si, se logran con un nivel de precisión mucho mayor al de la práctica común, lo que adiciona a las labores de simulación y/o modelamiento de procesos en este ámbito, un nivel de confiabilidad mucho mayor.

6.3. Modelo para el tonelaje de alimentación fresca

El modelo creado para la predicción del tonelaje de alimentación fresca se puede utilizar para la implementación de estrategias “Mine to Mill”. La idea es establecer, a partir de la demanda productiva a la planta, cuál es la granulometría en la alimentación fresca que se debe obtener para cumplir con el tonelaje exigido al circuito de molienda. En este caso la planta ya contaría con el molino SAG operando, de manera que el objetivo es poder ajustar las condiciones previas a la molienda para que este equipo, a partir de la granulometría alimentada, pueda satisfacer la demanda productiva sin inconvenientes.

Como ejemplo, se podría estar detectando una incapacidad por parte de la planta para cumplir con el tonelaje de alimentación fresca fijado por la planificación. En este caso, se debería utilizar el modelo de tonelaje de alimentación fresca para calcular el porcentaje de granulometría intermedia que se debe alimentar a la planta para satisfacer las demandas productivas. Posteriormente, con esta información, la mina debería implementar políticas y estrategias orientadas en particular al proceso de tronadura (incremento del factor de carga en los tiros, modificaciones sobre la malla de tronadura, etc.), con tal de obtener un producto más fino y así dar con la granulometría sugerida por el modelo de tonelaje.

Otras opciones, alternativas o complementarias a la tronadura, para lograr un determinado perfil granulométrico de alimentación al circuito de molienda, se pueden aplicar durante los procesos posteriores a la tronadura y previos al molino SAG.

Una de las opciones alternativas corresponde a la modificación de las características del chancado primario con el objetivo de contribuir a una granulometría más fina en su producto, lo que se logra usualmente reduciendo el Setting o abertura de descarga del chancador. Otra medida discutida anteriormente la constituye la implementación de una etapa de pre-chancado, con lo cual se logra un alto grado de control y reducción de la granulometría intermedia alimentada al circuito. Una tercera alternativa la constituye el aprovechamiento de la segregación de tamaños en el Stockpile para desarrollar una alimentación más selectiva al circuito de molienda, que permita obtener un perfil granulométrico preferente en la alimentación fresca.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Actualmente la optimización energética de la molienda SAG se ha transformado en un aspecto crucial a considerar, en virtud de los altos precios de la energía y escasés creciente del suministro de ésta a nivel nacional. El factor más relevante para desarrollar una optimización en el circuito de molienda SAG, es contar con una herramienta que permita predecir el perfil energético de los equipos involucrados, en particular del molino SAG. Las herramientas utilizadas suelen ser pruebas en plantas piloto, muy costosas, y simuladores computacionales, que no siempre ofrecen buenos resultados.

Por otra parte es posible encontrar modelos que predicen la potencia consumida por el molino SAG, sin embargo, éstos no consideran variables tan relevantes como la granulometría, la que, tal como se ha demostrado en este estudio, repercute sobremanera en el funcionamiento del molino SAG.

El análisis bibliográfico, en particular el realizado sobre la SAG Conference 2011, brinda información crucial para identificar los parámetros operacionales más relevantes del circuito de molienda SAG. Por otra parte, la revisión exhaustiva de la SAG Conference 2011 constituye una guía fundamental en el ámbito analítico del presente trabajo, por cuanto permite orientar y acotar el estudio de la gran cantidad de variables disponibles en la base de datos principal analizada (DB.M1).

Se logra obtener información completa y actualizada (datos del 2012) de una planta de molienda SAG de cobre, correspondiente a la base de datos DB.M1, mientras que la búsqueda bibliográfica desarrollada sobre trabajos “Mine to Mill” permite adicionar otras 3 bases de datos, correspondientes a DB.M2, DB.M3 y DB.M4, cuya información es menos reciente. Todas son faenas nacionales de molienda SAG para minerales de cobre, aún en operación.

El estudio desarrollado sobre la base de datos DB.M1 permite identificar comportamientos y correlaciones claras entre los parámetros fundamentales del circuito de molienda SAG. Entre éstos destacan la gran influencia de la granulometría fina (-1”) e intermedia (+1” -6”) presente en la alimentación fresca, tanto en la potencia consumida por el molino SAG como en el consumo específico de energía del mismo.

Se pudo identificar, para DB.M1, la relación que existe entre la granulometría final del circuito y el CEE.SAG (kWh/t), mediante la cual es posible fijar el rendimiento productivo del circuito de molienda para cumplir con las demandas granulométricas del producto final, en caso de presentarse problemas asociados a una granulometría muy gruesa en el producto, que pueda estar perjudicando los procesos de concentración posteriores.

Se pudo identificar, en DB.M1, la influencia de los pebbles recirculados al molino SAG, en la potencia consumida por el equipo y el consumo específico de energía del mismo, CEE.SAG(kWh/t). A partir de esta evidencia se pudo establecer que el máximo flujo de pebbles recirculados al molino SAG, no debe superar el 26% de la alimentación fresca a la planta; valores superiores conllevan a un incremento injustificado del CEE.SAG (kWh/t).

VARIABLES tales como la dureza del mineral y los pebbles recirculados al molino SAG, no estuvieron disponibles durante el estudio, por lo que se debió descartar su consideración para la elaboración de las herramientas predictivas. A pesar de que DB.M1 si contaba con información respecto al flujo de pebbles, no ocurrió lo mismo para las demás bases de datos, razón por la que no es posible validar un comportamiento de tipo genérico para este parámetro.

Se evidencian comportamientos de tipo universal, para todas las bases de datos consideradas, respecto al consumo de potencia del molino SAG y el consumo específico de energía del mismo, en función de la granulometría fina e intermedia presente en la alimentación fresca. Lo anterior permite el desarrollo de 3 modelos predictivos que consideran, como variable predominante, la granulometría intermedia de la alimentación fresca: un modelo para el consumo de potencia del molino SAG, P_c SAG (kW); otro para el consumo específico de energía del mismo equipo, CEE.SAG (kWh/t); y por último, un modelo para el tonelaje de alimentación fresca a la planta, G_{sf} (t/h).

La capacidad predictiva de los 3 modelos es satisfactoria, siendo el de potencia consumida por el molino SAG el de mayor confiabilidad, con un error promedio de 3,7% respecto a las 4 bases de datos. Por otra parte, el modelo de CEE.SAG (kWh/t) resulta ser el de peor ajuste respecto a los datos reales, con un error de 6,8%. Este mayor error se debe a la perturbación, por parte de variables no consideradas (problemas con las bombas del circuito, embancamiento de un espesador, disponibilidad de mineral, entre otros), a la que se ven expuestos los datos de tonelaje utilizados para la creación del modelo de consumo específico de energía.

El modelo de tonelaje de alimentación fresca, que corresponde al cociente entre los modelos de P_c SAG (kW) y CEE.SAG (kWh/t), presenta un error de 5,9% respecto a los datos reales, considerado aceptable para labores de estimación.

Se logra incorporar con éxito la variable granulometría en las 3 herramientas predictivas, constituyendo un aporte inédito dentro del área de investigación abordada. En cuanto al modelo de potencia consumida, el uso de la herramienta permitiría predecir con un mayor grado de precisión que los modelos convencionales, las dimensiones del o los molinos SAG requeridos en un proyecto, disminuyendo riesgos de sub-dimensionamiento que puedan llevar al cierre de una planta.

El modelo de tonelaje permitiría implementar estrategias Mine to Mill para satisfacer las demandas productivas, sin tener que incurrir en largos y costosos estudios para la determinación de la granulometría óptima.

Finalmente el modelo de consumo específico de energía logra determinar la granulometría de alimentación requerida para optimizar el rendimiento de la planta, incrementando su capacidad de tratamiento, bajo un mismo consumo de potencia del molino SAG, lo que se puede lograr por medio de la tronadura, de una etapa de pre-chancado, aprovechando la segregación de tamaños del Stockpile o bien por medio de modificaciones hechas al chancado primario.

Dado lo extenso del estudio, no se pudieron desarrollar análisis de sensibilidad para los modelos creados, así como tampoco evaluaciones económicas para determinar los beneficios a obtener con su uso. Este trabajo se enfoca en la evidencia de una variable preponderante en la operación y en el inicio de su incorporación dentro de herramientas predictivas como las desarrolladas. Por ende, el presente estudio podría perfeccionarse con la adición de análisis de tipo técnico-económico, desarrollados sobre faenas de molienda SAG actualmente en operación.

7.2. Recomendaciones

Si bien en el presente trabajo se orienta respecto de las formas de uso para los modelos creados, cabe mencionar algunas consideraciones adicionales:

- Respecto al modelo de potencia consumida por el molino SAG, se recomienda orientar su uso preferentemente para dimensionamiento, ya que constituye la práctica habitual para este tipo de modelos en ingeniería. Lo anterior se basa además, en la ventaja de este modelo, que considera la granulometría de alimentación, otorgando mayor confiabilidad al diseño de molinos SAG y evitando posibles sub-dimensionamientos.
- Se recomienda utilizar el modelo de consumo específico de energía para el molino SAG principalmente para el control de la operación, en base a la planificación energética y productiva que se desarrolla sobre la planta de molienda.
- Se recomienda utilizar el modelo de tonelaje de alimentación fresca paralelo a la implementación de una etapa de pre-chancado. La instalación de esta etapa al circuito no es compleja y ayuda a mejorar ampliamente el perfil granulométrico en la alimentación fresca al circuito, para obtener la granulometría requerida. Evidentemente es necesario desarrollar un análisis económico, previo a la instalación de un pre-chancado, para evidenciar si los costos asociados a la adquisición e instalación de chancadores, harneros y correas, se justifica con los beneficios esperados.

Dado que las bases de datos adicionales (DB.M2, DB.M3, DB.M4) no constituyen datos actualizados, como los obtenidos para el caso de DB.M1, se recomienda enriquecer la información y el estudio actual con información que goce de un mayor nivel de actualización. Paralelamente se recomienda adicionar a los modelos, variables que no fueron consideradas, tales como la dureza del mineral y la presencia de pebbles en el sistema, las que podrían añadir a éstos una mayor capacidad predictiva, pero también cambios en su forma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Casali, A., Kracht, W., 2012. *Fundamentos de Procesos Mineralúrgicos*. Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [2] Magne, L., Valdemar, W. 1999. *Molienda Semiautógena: Operación, Mantenimiento y Control*. Centro Tecnológico de Molienda SAG y Sistemas Eléctricos, pp. 2-27.
- [3] Latchireddi, S. 2002. *Modelling The Performance of grates and pulp lifters in Autogenous and Semi-autogenous Mills*. University of Queensland, pp. 6-8.
- [4] Jones, S., Fresko, M. 2010. *Autogenous and Semiautogenous mills*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC, pp. 5-7.
- [5] Austin, L., Concha, F. 1994. *Diseño y Simulación de circuitos de Molienda y clasificación*. Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED, pp. 313-346.
- [6] Maleki, M., Yahyaei, M., Banisi, S. 2011. *Converting AG to SAG mills: the Gol-E-Gohar iron ore company case*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [7] Santos, L.T., Gomes, M.P., Gomides, R., Pignaton, T., Phillips, W. 2011. *Kinross Paracatu, Start-Up and Optimization of SAG Circuit*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [8] Royston, D. 2011. *Kinross Paracatu, start-up and optimization of SAG circuit*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [9] Yang, Y., Yang, C., Tian, L. 2011. *SABC Circuit Operations at Eldorado's Jinfeng Gold Mine*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [10] Castillo, G., Bissue, C. 2011. *Evaluation of Secondary Crushing Prior to SAG Milling at Newmont's Phoenix Operation*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.

- [11] Allaire, A., Runnels, D., Sylvestre, Y., Fournier, J., Robichaud, F. 2011. *Increased SAG Grinding Capacity At Goldex Secondary Crushing Of SAG Mill Feed*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [12] Machado, L., Mendonça, A., Fonseca, R., Rosa, M. 2011. *SAG Mill Operations in Sossego Mine*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [13] Dance, A., Mwansa, S., Valery, W., Amonoo, G. y Bisiaux, B. 2011. *Improvements in SAG Mill Throughput From Finer Feed Size at Newmont Ahafo Operation*. . International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [14] Wirfiyata, F. y Mccaffery, K. 2011. *Applied Geo-Metallurgical Characterisation For Life Of Mine Throughput Prediction At Batu Hijau*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [15] Putland, B., Kock, F y Siddall, L. 2011. *Single Stage SAG/AG Milling Design*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [16] Markstrom, S. 2011. *Commissioning and Operation of the AG Mills at the AITIK Expansion Project*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [17] Amoah, C., Kock, F. y Khalil, D. 2011. *Optimization Of The Damang Mine*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [18] Bird, M., Powell, M., Hilden, M. 2011. *Adapting Mill Control to Account for Liner Wear on the Cadia 40ft Mill*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [19] Mainza, A., Lombard, M., Bepswa, P., Arthur, S., Yeboah, J., Nutor, G. y Boakye, V. 2011. *The Change In Operating Philosophy After Converting The Comminution Circuit From a Single Stage Sag Mill To A Sag/Ball Mill Circuit, The Tarkwa Experience*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.

- [20] M. Bueno, M., M.S. Powell, M., T. Kojovic, T., J. Worth, J., Shi, F., Niva, E., Adolfsson, G., Henriksson, M., Partapuoli, Å., Wikström, P., Tano, K. y Fredriksson, A. 2011. *The Dominance Of The Competent*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [21] Powell, M., Perkins, T. y Mainza, A. 2011. *Grindcurves Applied to a Range of SAG and AG Mills*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [22] Bueno, M., Lane, G. 2011. *A Review Of 10 Years Of AG/SAG Pilot Trials*. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC.
- [23] Díaz, G. 2004. *“Estudio de las variables mina-planta y su incidencia en el tratamiento horario en molino SAG” División Los Bronces*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [24] Ordoñez, C. 2002. *Proyecto: “De la Mina al Molino” en minera Los Pelambres*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

ANEXOS

Anexo A.1: Estadísticas Operacionales para DB.M1

Se presentan a continuación las estadísticas operacionales para DB.M1, utilizada principalmente en el Capítulo 4. En primera instancia se dan a conocer las gráficas de dispersión en el tiempo, para las variables más importantes, tanto para los datos originales (sin limpiar) como para los obtenidos luego del proceso de limpieza o datos limpios. Cabe recalcar que las estadísticas de esta planta corresponden a las del año 2012, por lo que sólo se indican en las gráficas el día y mes del año correspondiente. Posteriormente se adicionan las estadísticas quincenales para la base de datos en cuestión.

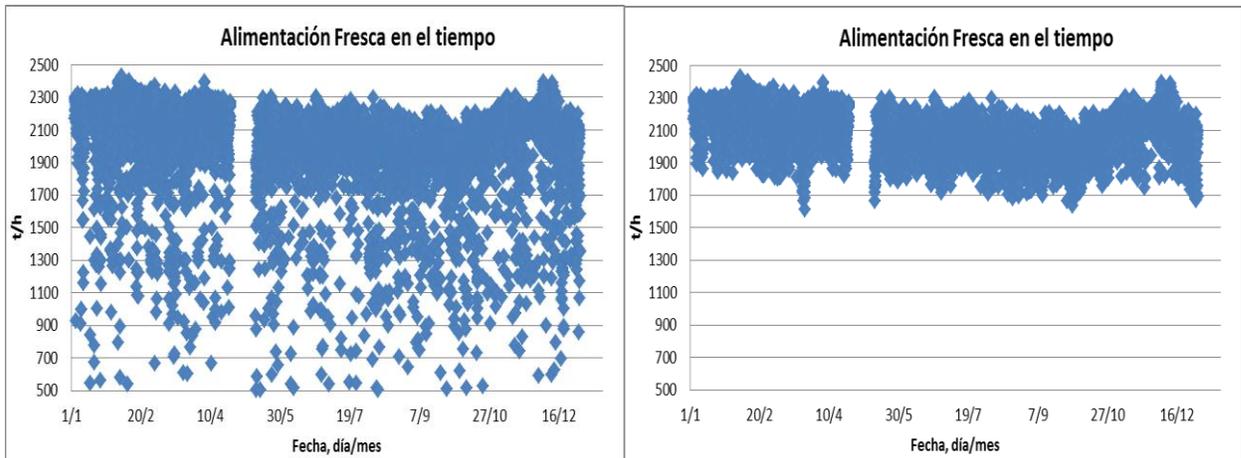


Figura A1- 1. Alimentación fresca en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y los datos limpios (derecha).

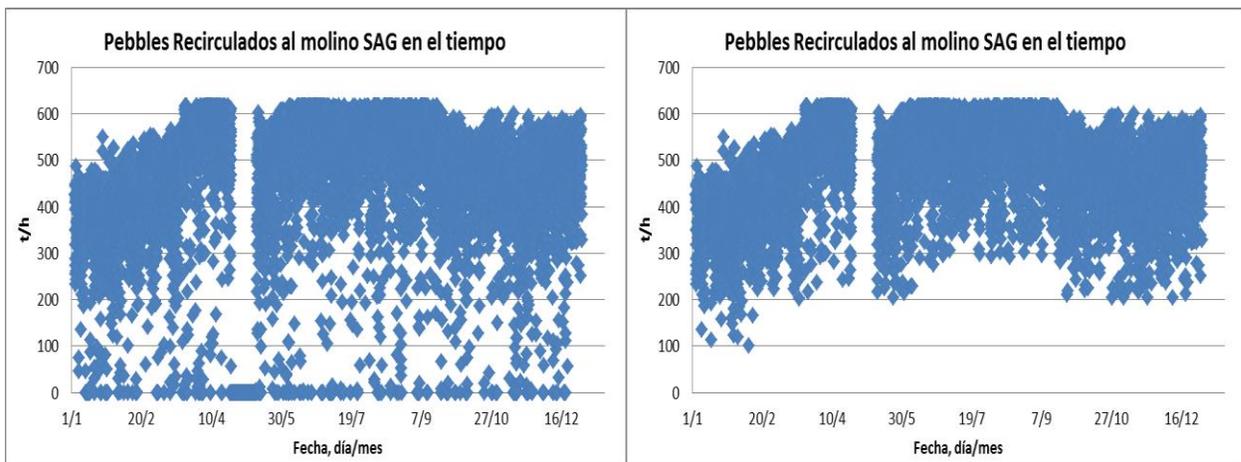


Figura A1- 2. Pebbles Recirculados al molino SAG en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

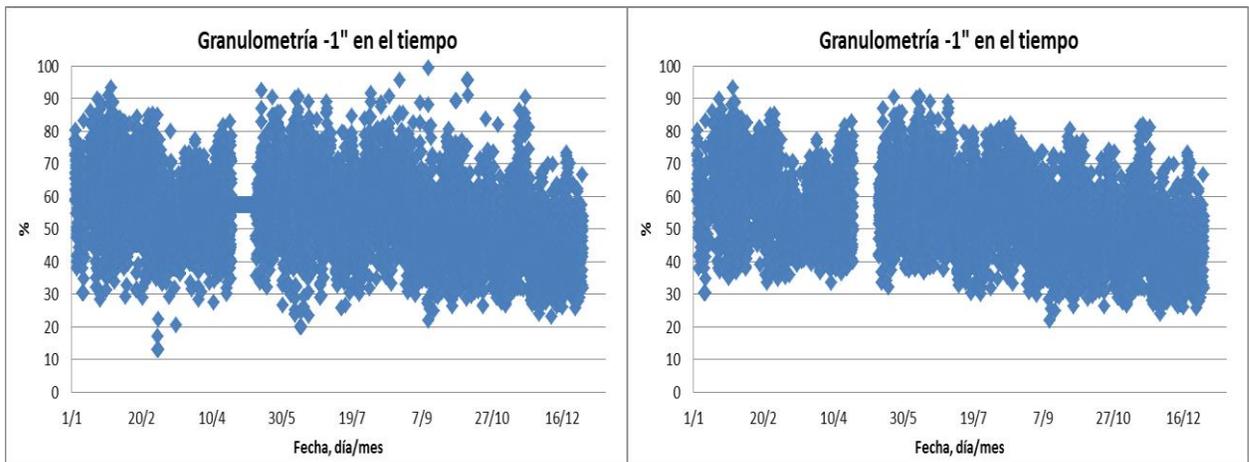


Figura A1- 3. Granulometría fina en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y limpios (derecha).

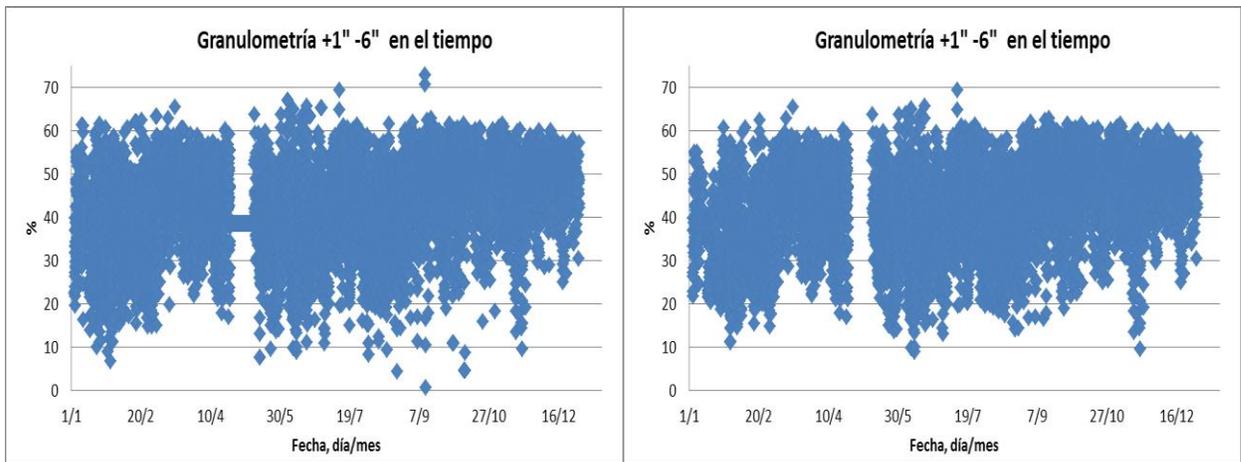


Figura A1- 4. Granulometría intermedia en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

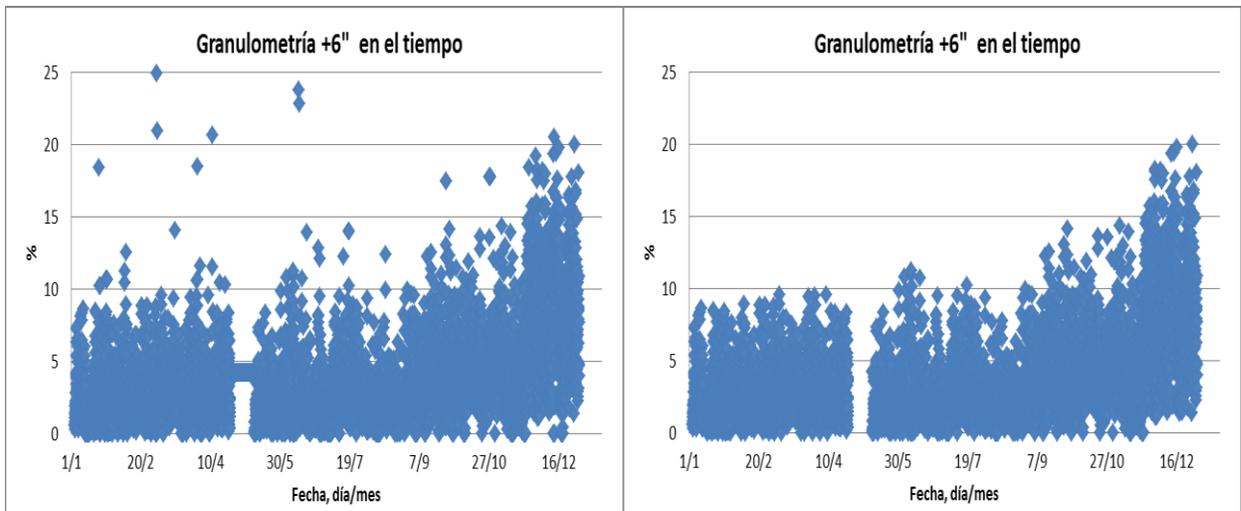


Figura A1- 5. Granulometría gruesa en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

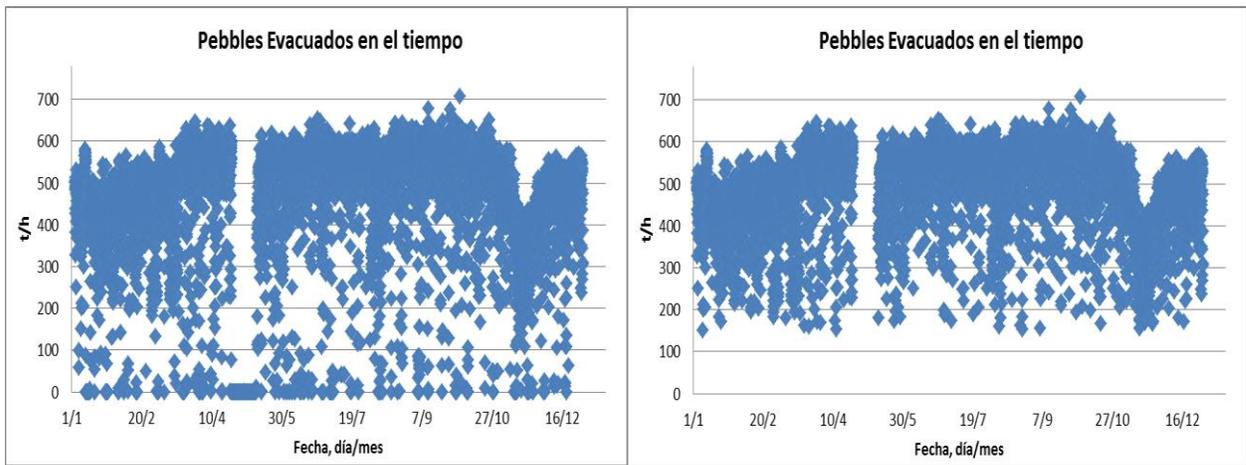


Figura A1- 6. Pebbles evacuados del molino SAG en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

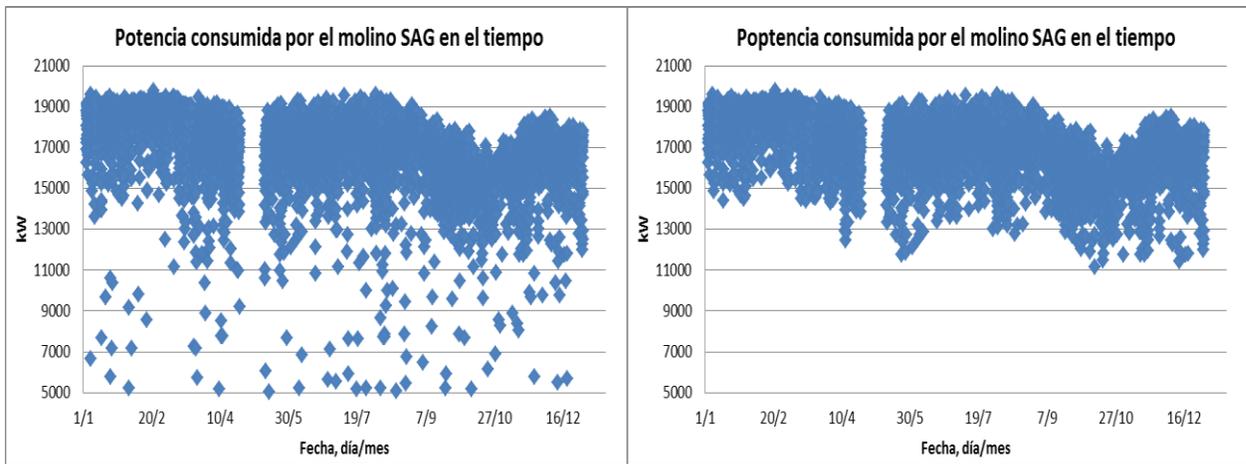


Figura A1- 7. Potencia consumida por el molino SAG en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

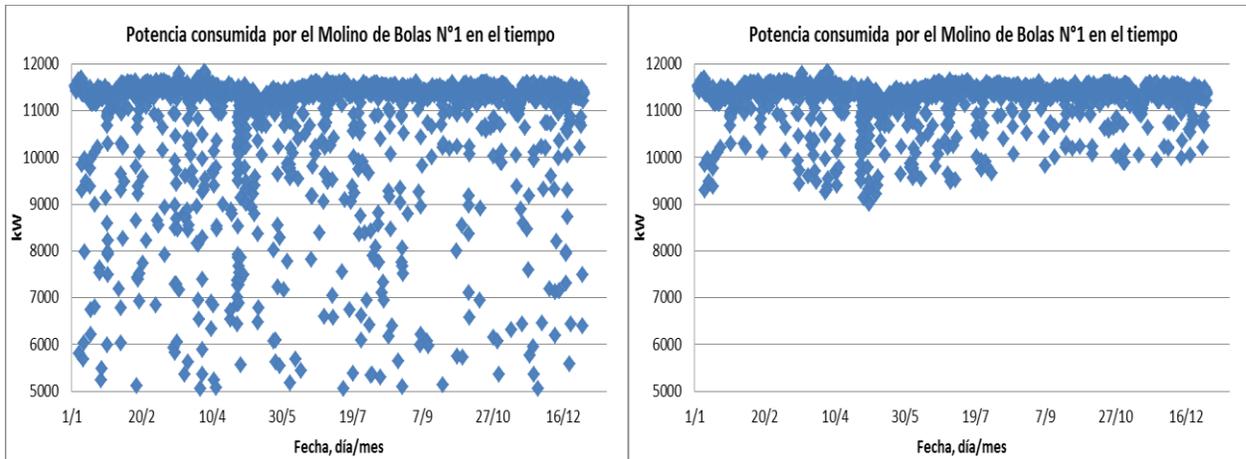


Figura A1- 8. Potencia consumida por el molino de Bolas N°1, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

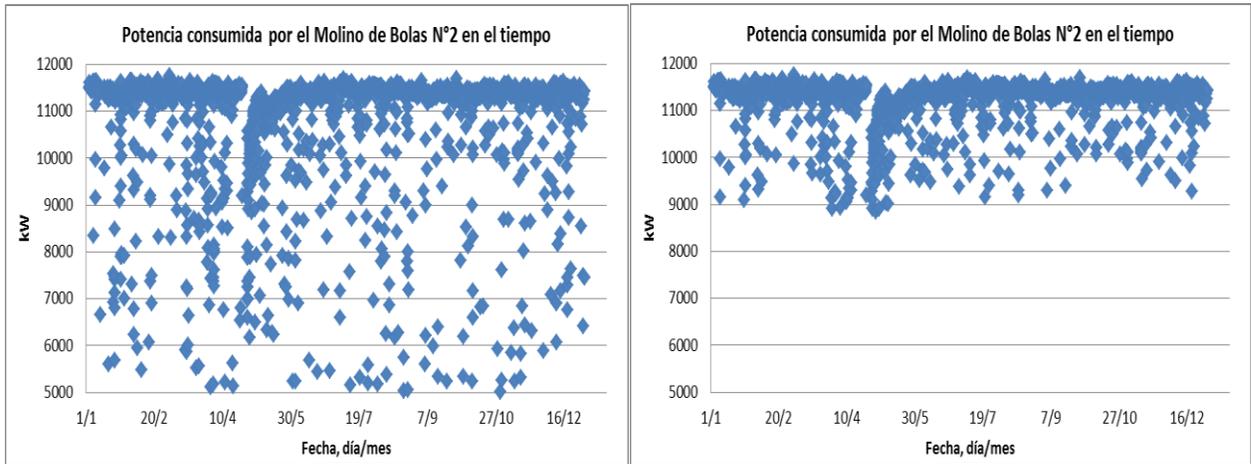


Figura A1- 9. Potencia consumida por el molino de Bolas N°2, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

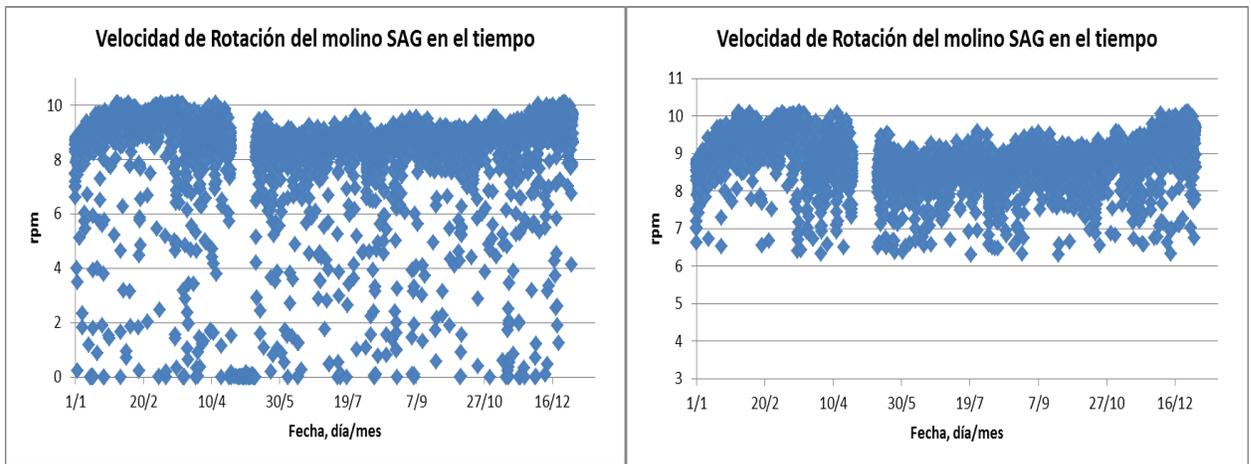


Figura A1- 10. Velocidad de rotación del molino SAG en el tiempo, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

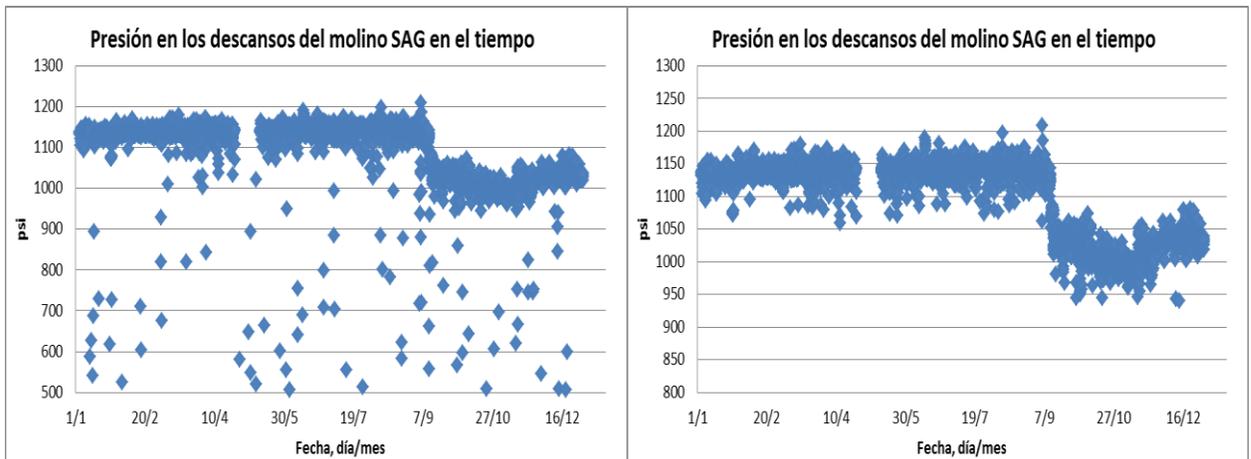


Figura A1- 11. Presión en los descansos del molino SAG, para los datos originales (izquierda) y los limpios (derecha).

Tabla A1- 1. Estadísticas operacionales quincenales de DB.M1, para 12 de las variables medidas en la operación.

Mes	Quincena	Variables operacionales y sus unidades respectivas											
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
		t/h	%	%	%	t/h	t/h	kW	kW	kW	rpm	m ³ /h	psi
Enero	1	2196,1	57,7	39,9	2,7	421,1	347,4	17755,6	11410,7	11463,9	8,2	419,7	1135,8
	2	2202,2	64,3	34,1	2,0	416,0	353,1	18051,8	11279,0	11320,0	9,1	533,3	1131,3
Febrero	1	2257,0	60,9	37,0	2,2	442,4	390,5	18718,9	11446,0	11447,1	9,4	673,6	1138,0
	2	2271,1	74,0	30,4	1,5	448,4	382,2	18272,4	11381,7	11398,1	8,1	396,7	1137,3
Marzo	1	2123,5	57,5	41,2	2,5	452,0	436,3	18634,1	11475,1	11437,4	9,4	613,3	1137,4
	2	2077,9	54,8	43,9	2,7	524,9	518,8	17570,3	11444,2	11347,6	8,5	574,8	1137,8
Abril	1	2157,2	55,9	42,1	2,6	546,0	558,4	17244,0	11420,2	11315,0	8,6	571,3	1144,9
	2	2100,5	55,6	43,1	3,0	532,8	542,6	16523,7	11273,0	11197,7	8,3	326,1	1138,0
Mayo	1	1973,9	57,5	41,6	2,1	481,7	473,2	16611,0	11132,2	10904,6	6,1	126,1	1141,3
	2	2050,7	60,7	37,4	2,1	522,6	478,9	17011,9	11252,9	11235,9	8,3	594,4	1141,1
Junio	1	2086,2	60,9	37,8	2,7	527,3	513,2	16843,4	11292,8	11322,3	8,1	553,4	1141,7
	2	2039,2	61,1	37,7	1,9	547,2	548,6	17109,5	11411,4	11385,3	8,4	579,3	1142,3
Julio	1	2027,6	55,5	42,2	2,6	544,8	525,2	17373,2	11477,9	11463,9	8,4	526,1	1145,0
	2	2067,2	55,1	42,2	2,7	546,6	531,4	17441,2	11396,5	11402,3	8,6	595,5	1144,4
Agosto	1	1999,0	61,8	36,2	1,9	505,0	546,0	16634,2	11450,8	11406,3	8,0	542,5	1142,7
	2	1946,2	56,0	40,9	2,4	557,1	543,3	17485,6	11415,4	11412,9	8,5	582,8	1138,7
Septiembre	1	1953,3	48,2	47,2	3,8	553,6	533,8	16773,9	11364,0	11339,6	8,5	531,4	1106,1
	2	1969,8	49,2	46,5	4,1	554,4	472,5	15628,2	11392,3	11386,4	8,5	533,4	1035,8
Octubre	1	1952,4	46,7	48,7	4,5	535,8	462,9	15521,7	11350,9	11319,5	8,4	505,7	1017,4
	2	2027,5	47,6	48,2	4,2	532,1	475,0	15078,7	11432,2	11404,7	8,6	540,0	1001,8
Noviembre	1	2136,9	46,4	48,6	4,8	457,6	432,9	15795,2	11313,4	11354,6	8,4	545,2	998,1
	2	2141,5	47,0	46,6	5,9	367,8	432,3	16491,9	11418,4	11364,4	8,7	559,2	1019,2
Diciembre	1	2173,3	40,8	50,4	9,0	461,6	460,9	16741,0	11417,9	11395,3	9,0	602,9	1035,7
	2	2022,3	42,8	49,1	8,1	472,5	484,1	16405,3	11362,2	11383,5	9,3	585,8	1034,6
Promedio Anual		2081,3	54,9	42,2	3,4	498,0	476,8	2416,5	60,2	6,9	41,0	18,3	2457,2

Tabla A1- 2. Estadísticas operacionales quincenales de DB.M1, para las variables operacionales asociadas a los hidrociclones del circuito de molienda.

Mes	Quincena	Variables operacionales y sus unidades respectivas									
		V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22
		m ³ /h	%	Psi	%	%	m ³ /h	%	Psi	%	%
Enero	1	1917,1	60,7	6,7	-----	21,5	2173,9	56,4	6,6	-----	12,8
	2	2489,1	60,1	6,5	-----	22,3	2619,2	55,9	6,7	-----	15,8
Febrero	1	2716,9	61,4	6,5	-----	22,3	2677,8	55,7	6,8	-----	9,9
	2	1601,0	58,5	6,5	-----	19,0	1612,2	54,7	6,5	-----	16,5
Marzo	1	2487,2	59,6	6,7	-----	20,1	2572,6	55,0	6,7	-----	15,2
	2	2423,9	60,6	7,0	-----	20,7	2294,2	54,2	6,6	-----	12,9
Abril	1	2328,9	60,2	6,9	-----	20,5	2725,3	55,9	6,8	-----	16,3
	2	1935,7	58,8	6,2	-----	19,7	1837,2	55,9	6,7	-----	16,0
Mayo	1	1684,7	56,4	6,1	-----	17,6	1905,2	51,5	6,1	-----	5,3
	2	2458,0	59,7	6,8	41,2	17,7	2873,3	55,0	6,7	40,6	16,0
Junio	1	2565,4	61,4	6,8	42,6	20,1	2698,7	54,3	6,8	41,0	14,4
	2	2444,4	60,4	7,2	41,9	18,7	2809,1	54,8	7,0	42,0	14,3
Julio	1	2362,4	59,7	7,2	41,1	16,8	2675,4	54,8	7,1	41,9	12,7
	2	2446,1	59,1	7,2	40,3	15,2	2727,6	54,7	7,3	40,4	14,0
Agosto	1	2487,0	60,2	7,0	40,9	16,9	2274,9	54,7	7,0	37,5	16,6
	2	2520,1	59,5	7,2	40,6	16,3	2460,4	53,5	6,9	35,7	13,8
Septiembre	1	2443,9	59,3	7,3	40,2	16,1	2248,7	54,3	6,8	37,5	15,8
	2	2517,8	59,3	7,3	41,2	17,5	2626,5	54,1	7,0	38,1	14,7
Octubre	1	2493,3	59,9	7,0	40,4	16,2	2447,4	54,8	7,1	37,3	13,9
	2	2652,8	61,7	6,8	41,7	17,9	2483,6	54,6	6,7	36,7	13,6
Noviembre	1	2620,1	61,8	7,3	41,3	17,4	2618,7	55,9	7,3	40,0	17,2
	2	2733,2	63,0	7,4	41,2	17,2	2606,8	54,5	7,0	38,6	13,0
Diciembre	1	2816,6	61,9	7,3	41,0	16,9	2529,5	54,2	7,0	38,8	11,4
	2	2849,8	61,0	7,2	39,9	15,7	2473,9	52,8	6,8	38,4	11,8
Promedio Anual		2416,5	60,2	6,9	41,0	18,3	2457,2	54,7	6,8	39,0	13,9

La lista de variables descritas en las estadísticas anteriormente revisadas, se definen a continuación, en la Tabla A1- 3.

Tabla A1- 3. Simbología para la lista de variables descritas en las estadísticas operacionales quincenales.

Variable	Descripción
V1	Tonelaje de alimentación fresca
V2	Fracción de granulometría retenida -1"
V3	Fracción de granulometría retenida +1" -6"
V4	Fracción de granulometría retenida +6"
V5	Pebbles Evacuados del molino SAG
V6	Pebbles Recirculados al molino SAG
V7	Potencia consumida por el molino SAG
V8	Potencia consumida por el molino de Bolas N°1
V9	Potencia consumida por el molino de Bolas N°2
V10	Velocidad de rotación del molino SAG
V11	Flujo de agua alimentado al molino SAG
V12	Presión en los descansos del molino SAG
V13	Flujo de alimentación Hidrociclones 1
V14	Cp (%) en la alimentación a Hidrociclones 1
V15	Presión en la alimentación a Hidrociclones 1
V16	Cp (%) del producto de Hidrociclones 1
V17	Porcentaje sobre 100# en el Overflow o producto de Hidrociclones 1
V18	Flujo de alimentación Hidrociclones 2
V19	Cp (%) en la alimentación a Hidrociclones 2
V20	Presión en la alimentación a Hidrociclones 2
V21	Cp (%) del producto de Hidrociclones 2
V22	Porcentaje sobre 100# en el Overflow o producto de Hidrociclones 2

Anexo A.2: Bases de Datos adicionales

Para la creación de los modelos predictivos, se acudió a datos operacionales de distintas faenas de molienda SAG. La información utilizada se detalla a continuación, utilizando la misma simbología descrita en la Tabla A1- 3, pero adicionando una nueva variable, correspondiente al consumo específico de energía del molino SAG, CEE.SAG (kWh/t), caracterizada como V23.

1. Datos aportados por DB.M2

Corresponde a la primera línea de molienda SAG de la faena *Los Bronces*^[23]. Las dimensiones del molino SAG son de 34 pies de diámetro por 17 pies de largo. Cabe recalcar que la información obtenida para esta base de datos data del 2004, por lo que el orden de magnitud para algunas de las variables, puede haber cambiado considerablemente en el tiempo.

Tabla A2- 1. Datos operacionales asociados a DB.M2.

V1 (t/h)	V2 (%)	V3 (%)	V4 (%)	V7 (kW)	V23 (kWh/t)
1686,0	69,5	29,5	1,0	10686,0	6,3
1562,0	55,6	43,3	1,1	10631,0	6,8
1844,0	78,2	20,5	1,3	10116,0	5,5
1802,0	68,5	31,5	0,0	10594,0	5,9
1685,0	44,9	55,1	0,0	13909,0	8,3
1406,0	28,8	69,1	2,1	12707,0	9,0
1592,0	20,3	73,9	5,8	13633,0	8,6
1539,0	28,8	71,2	0,0	12984,0	8,4
1522,0	45,8	54,2	0,0	12398,0	8,1

2. Datos aportados por DB.M3

Ésta base de datos corresponde a la segunda línea de molienda SAG de *Los Bronces*^[23]. En este caso, las dimensiones del molino SAG son de 28 pies de diámetro por 14 pies de largo, considerablemente inferior al molino asociado a la primera línea de molienda (DB.M2).

Tabla A2- 2. Datos operacionales asociados a DB.M3.

V1 (t/h)	V2 (%)	V3 (%)	V4 (%)	V7 (kW)	V23 (kWh/t)
810,0	55,9	44,1	0,0	5057,0	6,2
1105,0	60,0	40,0	0,0	4630,0	4,2
1116,0	74,4	25,6	0,0	4647,0	4,2
1139,0	60,7	39,3	0,0	5180,0	4,5
1048,0	55,0	45,0	0,0	5492,0	5,2
779,0	42,5	57,5	0,0	5782,0	7,4
876,0	41,0	55,9	3,1	5872,0	6,7
929,0	45,4	48,4	6,2	5643,0	6,1
1079,0	43,2	56,8	0,0	5685,0	5,3
943,0	49,9	50,1	0,0	5832,0	6,2
979,0	24,2	70,4	5,4	5903,0	6,0

3. Datos aportados por DB.M4

Finalmente se adicionan la información obtenida a partir de la base de datos DB.M4, correspondiente a la planta de molienda SAG de minera *Los Pelambres*^[24]. En este caso se considera la información correspondiente a uno de los dos molinos SAG de 36 pies de diámetro por 17 pies de largo, considerablemente grandes. Al igual que en el caso de los datos asociados a la planta de molienda SAG de *Los Bronces*, se advierte que la información asociada a esta faena, que se utilizó en el trabajo, data del año 2001, de manera que las magnitudes y rangos de medición para algunas variables, pudieron verse afectados considerablemente en el tiempo.

Tabla A2- 3. Datos operacionales asociados a DB.M2.

V1 (t/h)	V2 (%)	V3 (%)	V4 (%)	V7 (kW)	V23 (kWh/t)
2758,0	51,4	37,9	10,8	11032,0	4,0
2857,0	51,8	43,5	4,7	11542,3	4,0
2838,0	44,3	47,6	8,1	11635,8	4,1
2679,0	43,3	45,9	10,8	11385,8	4,3
2783,0	52,5	42,3	5,2	11827,8	4,3
2607,0	45,7	43,7	10,6	11131,9	4,3
2771,0	39,2	47,0	13,8	11887,6	4,3
2759,0	42,3	53,9	3,8	11891,3	4,3
2599,0	41,6	56,0	2,5	11487,6	4,4
2602,0	41,7	51,1	7,2	11657,0	4,5
2513,0	31,1	53,4	15,5	12313,7	4,9
2538,0	31,6	56,3	12,1	12690,0	5,0
2571,0	30,9	63,0	6,1	13112,1	5,1
-----	56,2	38,8	5,0	-----	4,0
-----	51,7	39,3	9,0	-----	3,8
-----	61,5	34,5	4,0	-----	3,3
-----	64,4	35,6	0,0	-----	3,5
-----	54,0	42,0	4,0	-----	3,7

Anexo A.3: Descripción del lugar de Trabajo

1. Historia

La compañía Hatch fue fundada en Canadá, el año 1955, como una empresa contratista de ingeniería civil que contaba con apenas seis empleados. Uno de sus primeros proyectos fue el diseño y gestión de los túneles para el tren subterráneo en Toronto, un desafío de gran envergadura considerando que era la primera vez que se implementaba un avance de este tipo en el sistema de transporte público en Canadá, marcando con ello el despegue de la compañía a través del tiempo. En 1964 Hatch ya contaba con 112 empleados en Canadá.

En 1968 Hatch se expande internacionalmente, abriendo una nueva sucursal en República Dominicana; durante la década de los 70 continuó esta tendencia con oficinas en Estados Unidos, Sudáfrica, Australia y Trinidad y Tobago, a la vez que expandía su rubro y abarcaba distintas áreas de la ingeniería.

Durante la década de los 90 Hatch logró posicionarse en los cinco continentes con nuevas sucursales en Brasil, Chile, Reino Unido, China y Rusia consolidándose como una de las empresas más grandes a nivel mundial en los ámbitos de consultoría e ingeniería, con más de 9000 empleados en 65 oficinas repartidas por el orbe, administrando programas y proyectos cuyo valor agregado alcanza los 40 billones de dólares.

El año 1998 Hatch comienza a operar en Chile, contando actualmente con oficinas en Santiago y Antofagasta, ofreciendo servicios de consultoría de procesos y de negocios, tecnologías de la información, ingeniería, gestión de proyectos y administración de la construcción a las industrias minera, metalúrgica, de energía y de infraestructura.

Hatch Chile cuenta a la fecha con diversas áreas o unidades para abarcar su amplia gama de especialidades: Consultoría (riesgos), Environmental service group, Energía, Hatch water, infraestructura, Mining and Mineral Processing, No ferrosos y Soporte Operacional.

2. Propietarios

Hatch no posee propietario único, ya que es una compañía de propiedad de sus empleados, vale decir, existe el sistema en que los empleados tienen amplios derechos como propietarios por su participación como accionistas de la firma.

3. Ubicación

La oficina central de Hatch Chile se encuentra ubicada en Avda. El Bosque Norte #500, Piso 12, Las Condes, Santiago.

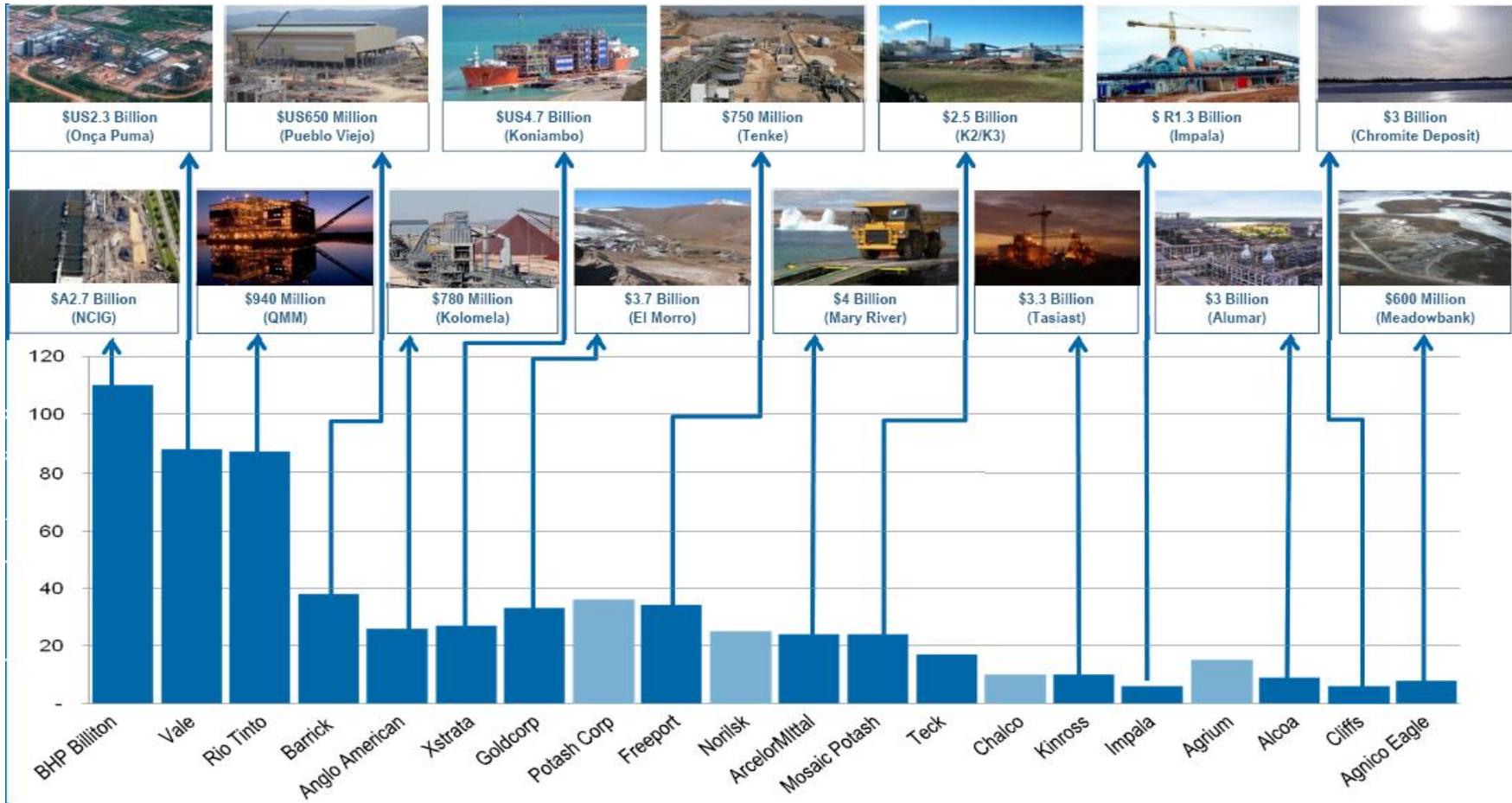
4. Servicios

Hatch sirve a sus clientes prestando servicios de consultoría, ingeniería de diseño, tecnología, ambientales, soporte operacional, gestión de proyectos y administración a los sectores de minería, metalurgia, energía e infraestructura, a nivel mundial. Actualmente la firma administra proyectos de capital por más de US\$50 mil millones.

Su base internacional de clientes es atendida por más de 9000 profesionales distribuidos en sus más de 65 oficinas por todo el mundo.

5. Estadísticas de Entrega de Servicio

Actualmente la firma administra proyectos de capital por más de US\$35 billones en más de 150 países, con más de 9.000 empleados distribuidos en sus 65 oficinas en el mundo, en la siguiente gráfica se pueden apreciar los distintos proyectos asociados a cada cliente y sus niveles de inversión:



6. Estructura Organizacional de Hatch



Figura A3- 1. Organigrama de áreas de Hatch

El diagrama global de Hatch, mostrado en la figura anterior, muestra las tres unidades de negocio principales, que son Energía, Infraestructura y Minería, a través de las cuales se tienen transversalmente los servicios que apoyan a cada una de éstas, entre los cuales se tienen el PDG(Project Delivery Group), Business Practices y Shared Services.

Con tal de tener un enfoque distinto acerca de cómo se organiza Hatch, se presenta un organigrama alternativo en donde se puede apreciar cómo es que se trabaja y se desarrollan los proyectos en la compañía.

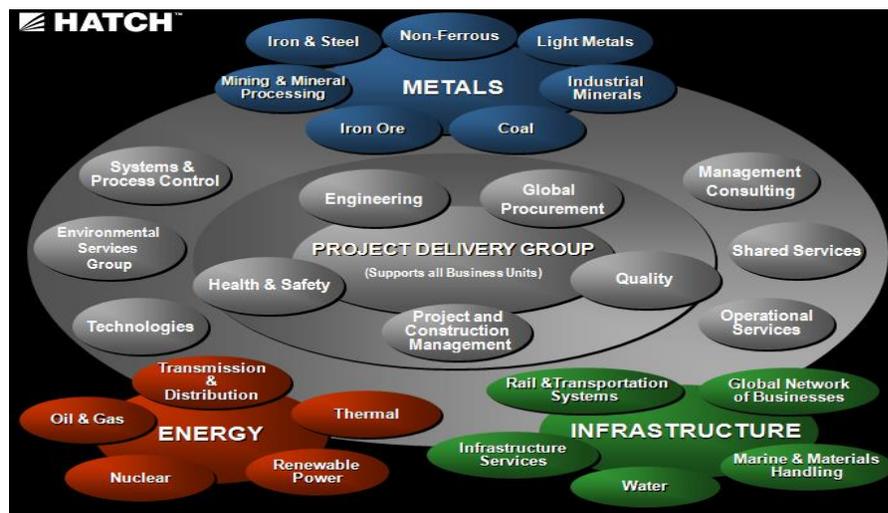


Figura A3- 2. Organigrama Hatch-Divisiones

Por último, una imagen más generalizada se presenta a continuación, con un organigrama global en donde el CEO, John Bianchini, tiene contacto directo con los líderes mundiales de cada disciplina, los que a su vez mantienen contacto con los líderes regionales, con el objetivo de consolidar un trabajo alineado, en el que se tenga una jerarquía directa entre las distintas áreas a nivel mundial.

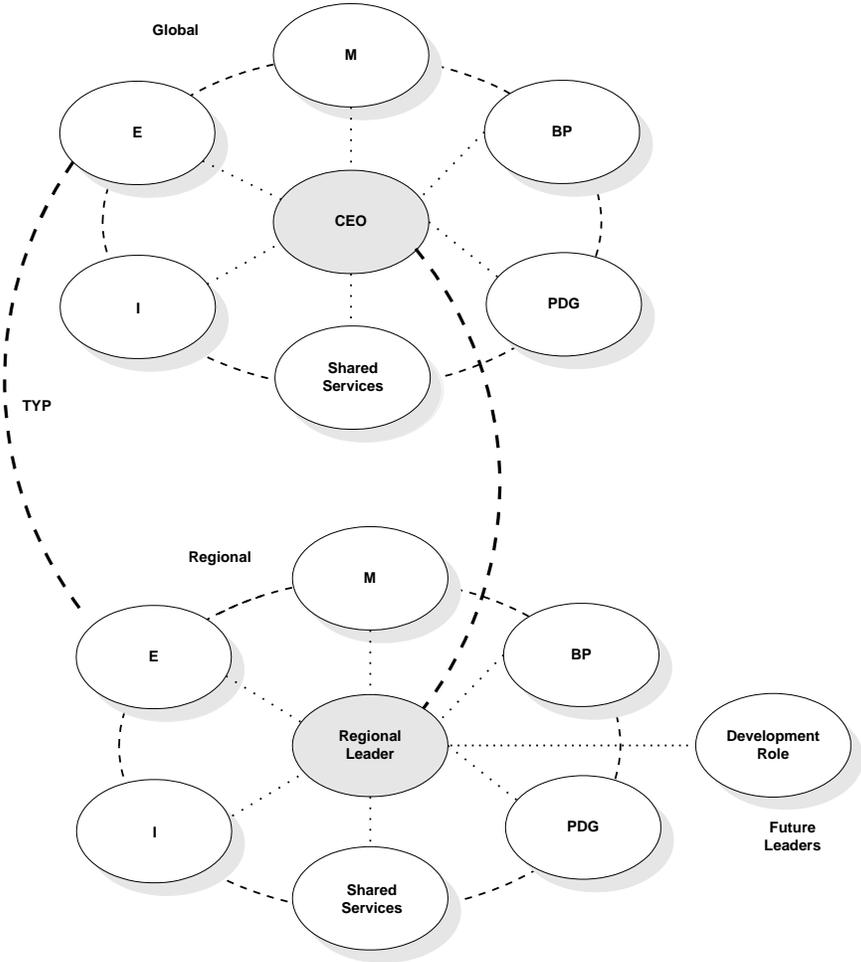


Figura A3- 3. Organigrama Hatch Global.

