

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO OPERACIONAL DE
REVESTIMIENTOS HÍBRIDOS EN MOLINO SAG DE 40X26'**

**Proyecto de trabajo de titulación presentado en conformidad a los
requisitos y reglamentos requeridos para obtener el título de
Ingeniera Civil Metalúrgico**

**Profesor Guía: Manuel Cabrera C.
Correferente: Patricio Rojas- Tega Industries**

**CARLA KARINA BARRUETO GUARDA
2021**

RESUMEN

Uno de los principales problemas operacionales en el procesamiento de minerales es el alto consumo de insumos como revestimientos y bolas de acero, pudiendo llegar a representar entre el 30 y 50% del OPEX de una operación minera. Donde los principales insumos dentro del proceso de molienda húmeda corresponden a agua, energía eléctrica y el acero utilizado en medios de molienda y en revestimiento de molinos.

El alcance de este proyecto corresponde al análisis de la reducción del OPEX en molienda SAG por el uso de revestimientos híbridos producidos por Tega Industries frente a revestimientos 100% de acero fundido producidos por otras empresas proveedoras de la minería. Los revestimientos híbridos corresponden a insertos de metal en matriz de caucho.

Este análisis se realiza mediante el modelamiento empírico de la demanda de potencia y consumo de energía específica. Utilizando como metodología la regresión lineal múltiple de datos operacionales de cuatro campañas de un molino SAG de 40x26 ['] en las cuales se utilizaron tanto revestimientos híbridos como de acero fundido.

En las primeras tres campañas se utilizó revestimiento híbrido sólo en la mitad del anillo de descarga del molino, siendo este un 17% del total del cilindro, llegando al final de campaña con piezas de acero fracturadas y mostrando desgaste en los revestimientos híbridos, por lo que en la campaña cuatro se tomó la decisión de utilizar revestimiento híbrido en la totalidad del anillo de descarga, en la mitad del anillo central y en la mitad del anillo alimentación, ocupando un 67% del cilindro, llegando al final de la campaña sin piezas fracturadas. Esto permitió operar a mayor velocidad aumentando el rendimiento del molino SAG.

Las variables utilizadas en los modelos corresponden a velocidad del molino, nivel de llenado de bolas, porcentaje de sólidos, distribución de tamaño de mineral, índice de dureza Axb y como variable no estudiada en literatura se incorpora el peso del revestimiento total como única diferencia cuantificable, siendo aproximadamente una diferencia de 13% en peso entre ambos tipos de revestimiento.

Los modelos muestran un ajuste de 89,85% y de 57,31%, para la demanda de potencia y consumo específico de energía respectivamente. La reducción de OPEX por uso de revestimiento híbrido considerando CEE, rendimiento y precio de revestimiento corresponde a 8.6 [MMUSD].

ABSTRACT

Due to the high energy consumption of milling, it is desirable to improve the efficiency of this process. One alternative to reduce the energy consumption is through balanced design and selection of liners.

This project provides the analysis of OPEX reduction in SAG mill due to the use of hybrid liners produced by Tega Industries versus cast steel liners produced by other mining supplier companies.

This analysis is performed by empirical modeling of power demand and specific energy consumption (SEC). Using as methodology the multiple linear regression of operational data from four campaigns of a 40x26 ['] SAG mill in which both hybrid and cast steel linings were used.

In the first three campaigns, hybrid lining was used only in the half of the mill discharge ring, representing 17% of the total cylinder, reaching the end of the campaign with fractured steel parts and only showing wear in the hybrid liners, therefore decided that in campaign four to use hybrid lining in the entire discharge ring, in the half of the central ring and in the half of the feed ring, occupying 67% of the cylinder, reaching the end of the campaign without fractured parts. This allowed to operate at a higher speed increasing the performance of the SAG mill.

The variables used in the models correspond to mill speed, percentage of ball charge, percentage of solids, mineral size distribution, mineral hardness index (Axb) and as a variable not studied in the literature the weight of the total liner is incorporated as the only quantifiable difference between hybrid liners and steel liners being approximately a difference of 13% in weight between both types of liners.

The models show an adjustment of 89.85% and 57.31%, for power demand and specific energy consumption respectively. The OPEX reduction due to the use of hybrid liner considering SEC, performance and liner cost corresponds to 8.6 [MMUSD].

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento es para mi Madre, por haber sido siempre mi mayor motivación, por ser mi ejemplo de fuerza y inculcarme a perseguir mis propósitos. A mi Padre por alentarme en mi carrera y expresar siempre su orgullo hacia mí.

A mis hermanos por su apoyo emocional, a Eduardo por ser mi ejemplo para seguir.

A mi profesor guía Manuel Cabrera por su disposición y compromiso. A la empresa Tega Industries por la posibilidad de realizar la memoria con ellos, a Patricio Rojas por su gran apoyo en este proceso.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	8
1.1. Hipótesis.....	9
1.2. Objetivos	10
2. CONTEXTO Y MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Molino Semi-Autógeno (SAG)	12
2.2. Revestimientos para molino SAG.....	15
2.3. Materiales para revestimientos molino SAG.....	17
2.4. Demanda de potencia molino SAG	19
2.4.1. Modelo de demanda de potencia de M. Silva, A. Casali.....	19
2.5. Consumo de Energía Específica molino SAG	21
2.5.1. Modelo de consumo de energía específica de M. Silva, A. Casali.....	21
3. SELECCIÓN DE VARIABLES OPERACIONALES A ESTUDIAR	23
3.1. Velocidad molino SAG.....	23
3.2. Distribución de Tamaño.....	24
3.3. Dureza del mineral	24
3.4. Nivel de llenado de bolas y concentración de sólidos	25
3.5. Peso de los revestimientos.....	26
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	29
4.1. Datos operacionales.....	29
4.1.1. Peso del revestimiento	31
4.2. Desarrollo de modelos.....	33
5. ANÁLISIS DE DATOS OPERACIONALES.....	36
5.1. Limpieza de datos	36
5.2. Correlación de variables.....	38
6. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS.....	41
6.1. Modelo de Demanda de Potencia	41
6.2. Modelo de Consumo de Energía Específica	44
6.3. Modelo de Tonelaje de Alimentación.....	45

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
7.1. Análisis de Demanda de Potencia.....	47
7.2. Análisis de Consumo de Energía Específica	48
7.3. Análisis de Tonelaje de Alimentación	49
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
8.1. Conclusiones.....	53
8.2. Recomendaciones.....	54
Referencias	55

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El proceso de conminución, considerando chancado y molienda, es uno de los procesos industriales que requiere mayor consumo de energía del mundo. La conminución de minerales utiliza al menos un 3% de la producción global de electricidad, y según la CEEC (Coalition for Energy Efficient Comminution), esto corresponde, en promedio, a más del 50% del consumo energético en una minera y a un 10% del costo total de producción [1].

En diversas investigaciones se ha mencionado la baja eficiencia energética de tanto la molienda convencional como la semiautógena (SAG), indicando que del total de energía consumida sólo el 3-5% es utilizado para la disminución de tamaño. Esto se explica porque la energía se pierde en forma de ruido, calor, desgaste y vibraciones [2] [3].

Los molinos utilizan revestimientos en la totalidad de su interior, con el objetivo de proteger el equipo y entregar energía de manera eficiente a la carga para su tratamiento. La vida útil de estos revestimientos está limitada y determinada por el desgaste que sufren durante su operación. Este desgaste cumple un papel importante en la eficiencia global y el costo del procesamiento del mineral [4].

Dependiendo del tamaño del molino y del mineral que se procesa, se puede diseñar un revestimiento híbrido, el cual corresponde a una base de caucho con insertos metálicos en sectores críticos de desgaste del revestimiento [5].

Dentro de los beneficios de tipo estructurales de los revestimientos híbridos se encuentra su menor peso, menor cantidad de piezas y su diseño que permite el apernado exterior. Estas características disminuyen riesgos en la minería por tener piezas con menor peso y poder realizar el apernado desde el exterior del molino. Además, se logran disminuir los tiempos de parada del proceso debido a que al tener menor peso se pueden realizar piezas más grandes teniendo menor cantidad de piezas que cambiar [6]. Por otro lado, la principal desventaja de estos revestimientos es su precio, llegando a ser un 100% más caros que los

revestimientos de acero, costando para el caso del molino en este estudio cerca de los 2.5 MMUSD.

En cuanto al comportamiento operacional de estos dos tipos de revestimientos no se encuentran estudios que los correlacionen con las variables principales de la molienda. En este campo se encuentran principalmente estudios sobre la influencia del desgaste en la eficiencia de molienda [7], y la influencia de las variables operacionales en el consumo energético [8].

Al tener la desventaja de precio tan mayor se hace necesario el estudio de la variación de OPEX entre ambos tipos de revestimiento para analizar si contrarresta al precio. Éste considerará la cuantificación de la diferencia en consumo específico de energía (CEE) [kWh/t], y rendimiento [t/h].

En este estudio se desarrollan modelos empíricos de demanda de potencia, CEE y rendimiento, incluyendo la variable de peso de revestimiento para identificar el tipo de revestimiento. Además, se incorporan variables operacionales que se consideren influyentes en el proceso.

Se utilizan datos de cuatro campañas operacionales en SAG de 40x26', donde durante las primeras 2 campañas se usó principalmente revestimiento de acero, y en los dos siguientes revestimientos híbridos producidos por Tega Industries.

1.1. Hipótesis

El uso de revestimientos híbridos en molienda SAG trae ventajas operacionales como un menor consumo energético, generando un beneficio económico cuantificable.

1.2. Objetivos

Objetivo principal

Evaluar las ventajas operacionales del uso de revestimientos híbridos frente a revestimientos de acero.

Objetivos específicos

1. Definir la influencia del tipo de revestimiento en el Consumo de Energía Específica a través de un modelo empírico.
2. Estimar si se genera una diferencia en el tonelaje procesado debido al tipo de revestimiento, a partir de modelos empíricos de consumo de energía específica y demanda de potencia.
3. Cuantificar el beneficio económico del uso de revestimientos híbridos frente a revestimientos de acero.

2. CONTEXTO Y MARCO TEÓRICO

En esta investigación se analizan cuatro campañas de un molino SAG de 40x26 ['], durante las cuales se utilizó tanto revestimiento híbrido como de acero, con el objetivo de evaluar las ventajas operacionales del uso de revestimiento híbrido.

Durante las primeras tres campañas se revistió solo un 17% con revestimiento híbrido, estando únicamente en la mitad del anillo de descarga del mineral. En estas campañas se pudo observar que los revestimientos de acero se fracturaban antes del término de campaña, teniendo que utilizar menores velocidades para la molienda. Mientras que los revestimientos híbridos instalados en el anillo de descarga del mineral sólo presentaban desgaste común de la operación.

Debido a estos resultados, para la cuarta campaña la empresa minera decidió instalar revestimientos híbridos en la totalidad del anillo de descarga, la mitad del anillo central y la mita del anillo de alimentación, revistiendo en total un 67% del cilindro. Terminando la campaña sin fractura en ellos y pudiendo aumentar la velocidad de operación.

Por este aumento en la velocidad de operación, se podía predecir que con el cambio a revestimientos híbridos se lograba una mayor capacidad de tratamiento de mineral. Pero este análisis se complicaba debido a las distintas variables que pueden influir en la capacidad de tratamiento, como el tamaño del mineral, su dureza, etc.

Para poder evaluar las ventajas operacionales del uso de revestimientos híbridos es que en este estudio se formulan modelos empíricos con las distintas variables que influyen en el proceso de molienda SAG, realizando regresión lineal múltiple a datos operacionales, incluyendo la variable revestimiento como el peso del revestimiento, siendo este el que diferencia numéricamente el revestimiento híbrido del revestimiento de acero.

2.1. Molino Semi-Autógeno (SAG)

La molienda SAG corresponde a una molienda semi-autógena, en la cual se reduce el tamaño del mineral utilizando como medio de molienda el mineral de tamaño grande y bolas de acero de gran diámetro, preparándolo para un circuito de reducción de tamaño aguas abajo. El mineral es alimentado al molino con agua y la molienda ocurre en un medio pastoso. En este proceso los medios de molienda también reducen su tamaño, por lo que el sistema es muy inestable [9].

El comportamiento de la carga de un molino, la distribución de velocidades y presiones se puede observar en la Figura 1, donde se señalan las diferentes zonas dentro del molino en movimiento.

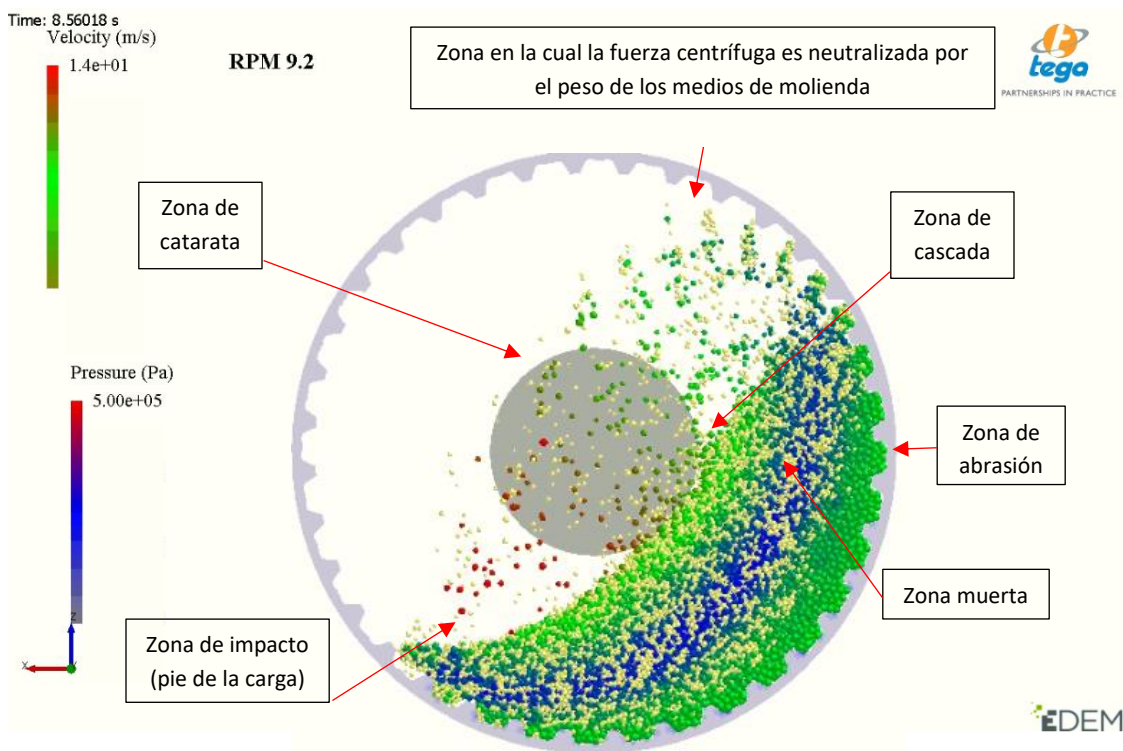


Figura 1: Simulación EDEM de movimiento de carga y su distribución de velocidad y presión.

Las zonas de alta presión coinciden con las zonas de mayor abrasión, y las zonas de alta velocidad coinciden con las de impacto. A menores velocidades se produce una cascada que favorece la molienda por abrasión y la producción de finos. Al

aumentar la velocidad, las bolas o minerales más grandes se separan en el punto más alto, cayendo en catarata en una trayectoria parabólica, favoreciendo la molienda por impacto.

Los mecanismos de molienda dentro de un molino SAG son determinados en gran medida por el movimiento de la carga, y corresponden a:

1. Molienda por Impacto.

Como se observa en la Figura 2 a), en la molienda por impacto la fragmentación se produce debido al choque entre el medio de molienda (mineral o bola) y partículas. Se logran altas tasas de tratamiento y operan en torno al 75% sólidos. Es favorecida por alimentaciones gruesas (+4,25"), consume alta energía, produce tamaños medios y es reforzada con lifters nuevos y/o altos. Normalmente, se busca como solución a problemas de molinos con alta carga.

2. Molienda por Compresión y Abrasión.

En la molienda por compresión y abrasión, como se grafica en la Figura 2 b), las partículas se desmenuzan debido a fuerzas de compresión o fricción, que se generan entre dos superficies duras o entre partículas [10]. Es favorecida por alimentaciones ricas en material intermedio y fino, produce tamaños finos y es reforzada con revestimientos gastados y/o bajos.

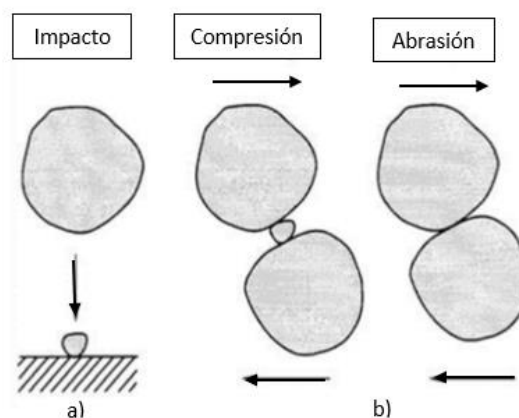


Figura 2: Mecanismos de molienda molino SAG. a) Molienda por Impacto, b) Molienda por compresión y abrasión.

Fuente: MolyCop

Las perturbaciones asociadas a un molino SAG corresponden al tipo de mineral, el operador, sistema experto, el nivel de carga (J_c), nivel de bolas (J_b), el trommel o harnero, las parrillas del molino y su abertura, el revestimiento (geometría y material), el porcentaje de sólidos ($\%C_p$), la abertura de la parrilla, el % de pebbles, la velocidad y la disponibilidad del stock pile. En una configuración común de molienda (SABC-2), corresponderán a variables controladas en las zonas expuestas en la Figura 3.

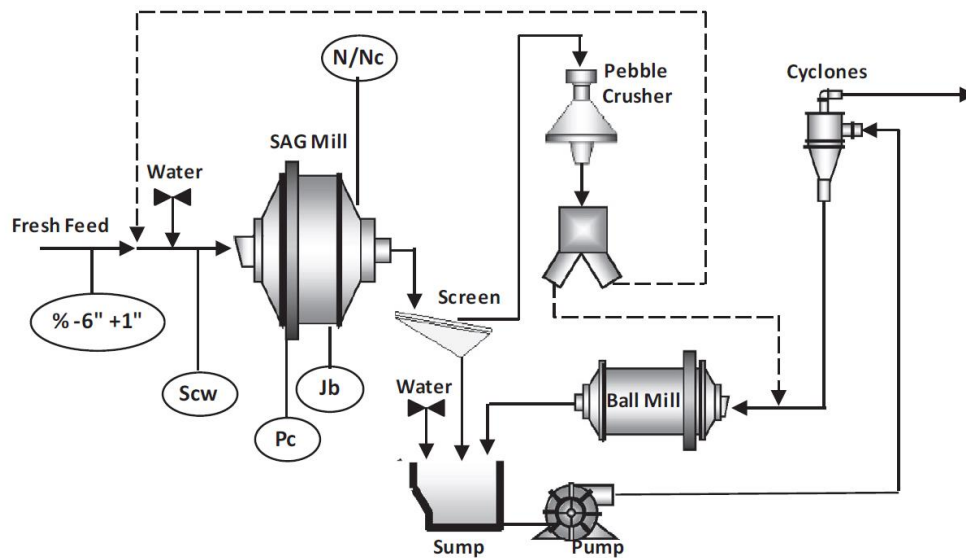


Figura 3: Circuito SABC-2 de molienda. Fuente: M. Silva, A. Casali

Las condiciones que generan un alto consumo de bolas y potenciales daños al revestimiento corresponden a [11]:

1. Alto nivel de llenado de bolas (J_B).
2. Bajos niveles de carga total (J_c).
3. Bajo porcentaje de sólidos en alimentación ($\%C_p$).
4. Altas velocidades de operación unidas a bajo nivel de carga.
5. Problemas de diseño o control de calidad de revestimientos.

Además del cambio de comportamiento dependiendo de la zona transversal del molino, también se observa una diferencia en cuanto a la zona longitudinal. Se tendrá que en la zona de alimentación ocurrirá una mayor abrasión y a medida

que nos acercamos a la zona de descarga se presenciara un mayor impacto sobre los revestimientos.

Esto ocurre debido a la segregación de la carga en el anillo de alimentación, generando una “cama” de mineral, la cual protege al revestimiento del impacto, generando abrasión debido al continuo movimiento del mineral. La formación de esta “cama” se puede observar en la Figura 4.

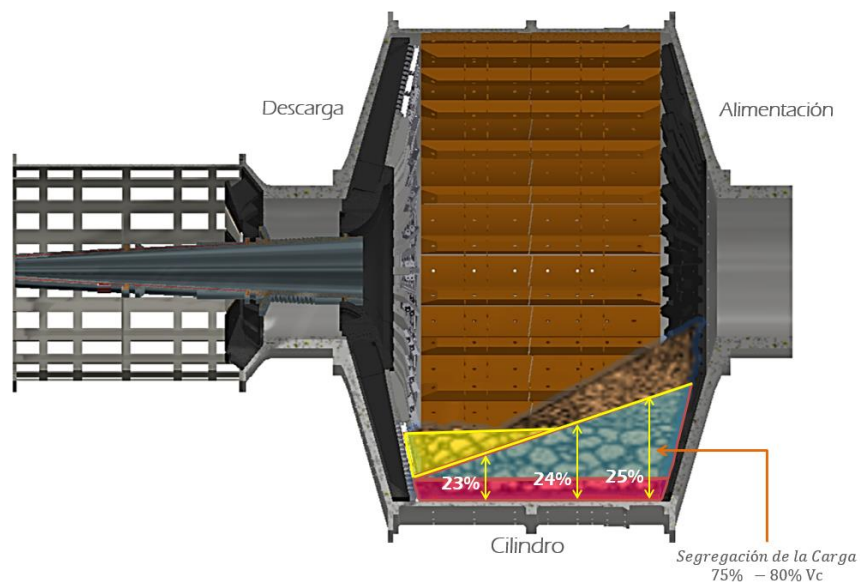


Figura 4: Segregación de la carga en Molino SAG. Fuente: Tega Industries Spa.

2.2. Revestimientos para molino SAG

Los revestimientos de molino cumplen el rol de proteger la coraza de acero del impacto y abrasión al que se enfrenta, además de influenciar el movimiento y comportamiento de la carga [7].

Por su parte, cada sección del revestimiento apunta a tareas específicas, estas secciones son indicadas en la Figura 5.

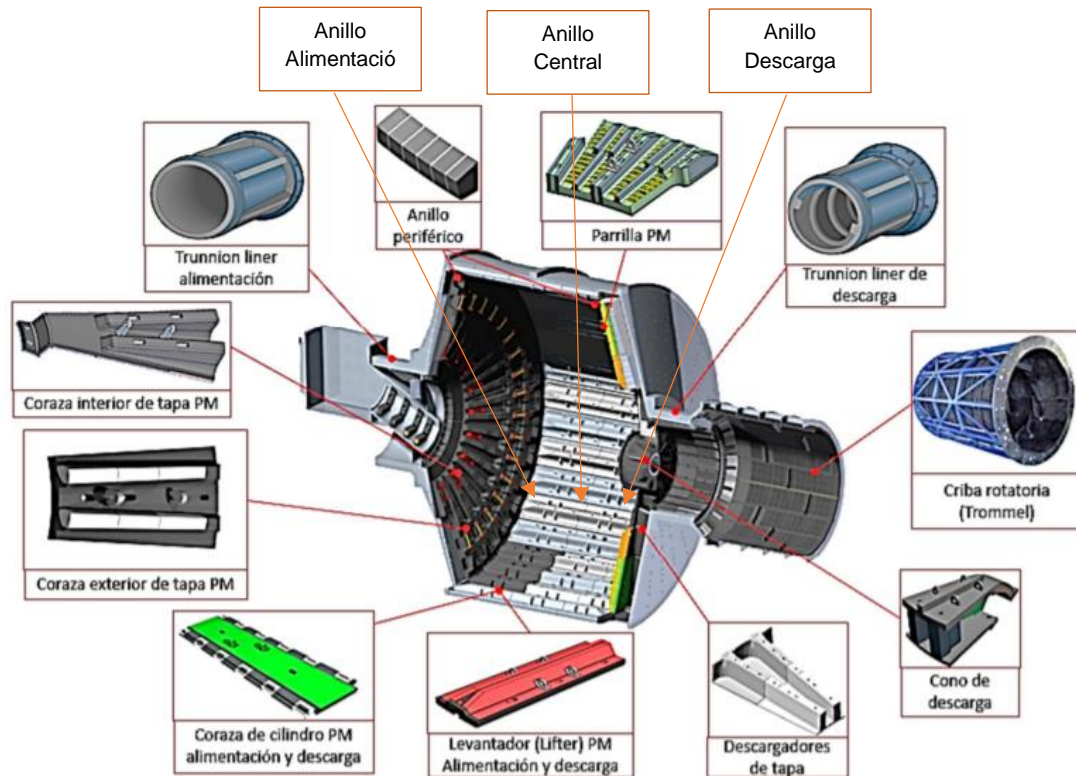


Figura 5: Secciones de revestimiento Molino SAG. Fuente: "ESTUDIO DE FALLA Y REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN TROMMEL PARA UN MOLINO SAG" Mario Rivas Puentes.

El cilindro se divide en anillos, el de alimentación, el central, y el de descarga. Los revestimientos del cilindro sirven de medio de transferencia de energía al interior del molino, configuran el movimiento de la carga y la distribución de energía de los eventos de impacto. Los revestimientos de la tapa de descarga, debido a la presencia de parrillas, cumplen el objetivo de retener los medios de molienda, clasificar el producto, controlar el nivel de llenado y permitir el correcto transporte de masa [12].

El perfil del revestimiento influye en la eficiencia de la molienda y los lifters son comúnmente usados para formar el perfil de carga en un SAG. Éstos generan una fracción de catarata la cual aumenta la energía de rompimiento por impacto y genera un gradiente de velocidad en la región de cascada para que ocurra la abrasión y atrición. Debido a que el perfil del lifter cambia durante su uso debido a que este se desgasta, no es posible mantener un perfil ideal. El cambio en dimensiones geométricas debido al desgaste afecta aspectos de rendimiento del

molino, tales como, la trayectoria de mineral y las bolas, el consumo de potencia, la presión promedio y el esfuerzo sobre los revestimientos [13].

Actualmente, las principales empresas que diseñan y fabrican revestimientos en Chile corresponden a: Aceros Chile, Elecmetal, FLSmidth, Metso, POLYCORP, Siom, Tega Industries, Weir Minerals, entre otros.

La fabricación de revestimientos en cuanto su perfil geométrico ha ido cambiando su enfoque en el tiempo. Entre los años 1982 y 1997, se enfocaban en la mantención, considerando una mayor calidad relacionada a una mayor duración de las piezas, optimizando los tiempos de cambio y evitando paradas imprevistas. Luego, entre los años 1998 y 2006, el diseño fue orientado tanto a la operación como a la mantención, empezando a tomar en cuenta el diseño del revestimiento. Finalmente, a partir del año 2007 hasta la actualidad, es que el diseño es enfocado a dos ámbitos, la seguridad, implementando componentes más ligeros y cambiando el sistema de fijación, pudiendo insertar los pernos por fuera del molino, y la producción, considerando la importancia del efecto que genera el revestimiento a la carga interna y la eficiencia de la molienda [14].

2.3. Materiales para revestimientos molino SAG

Para el diseño y selección de material de revestimiento se analiza la composición química, el diseño, tratamiento térmico, las propiedades y la aplicación.

Para la aplicación en molino SAG, se utilizan los siguientes materiales de revestimiento [12],

1. Aceros al Cromo-Molibdeno: Se utiliza en zonas de altos niveles de impacto.
2. Fundiciones Blancas de alto cromo: Se aplica en zonas donde existe mayor abrasión y bajo o nulo impacto.

3. Elastómeros: Revestimientos de caucho e inserto metálico, presentan excelentes propiedades frente al desgaste debido a su capacidad de deformación y disipación de energía.

Los aceros Cr-Mo, tienen la virtud de tener un relativo bajo costo, buena resistencia al desgaste e impacto. Se utilizan de alto y medio contenido de carbono con el fin de aumentar la tenacidad con respecto a los utilizados en las parrillas de descarga de molinos de bolas.

En la actualidad, se utilizan revestimientos híbridos de caucho con insertos de metal, como acero fundido Cr-Mo o acero laminado con microestructura de martensita revenida entre otras variantes. Esta configuración se puede ver en la Figura 6.

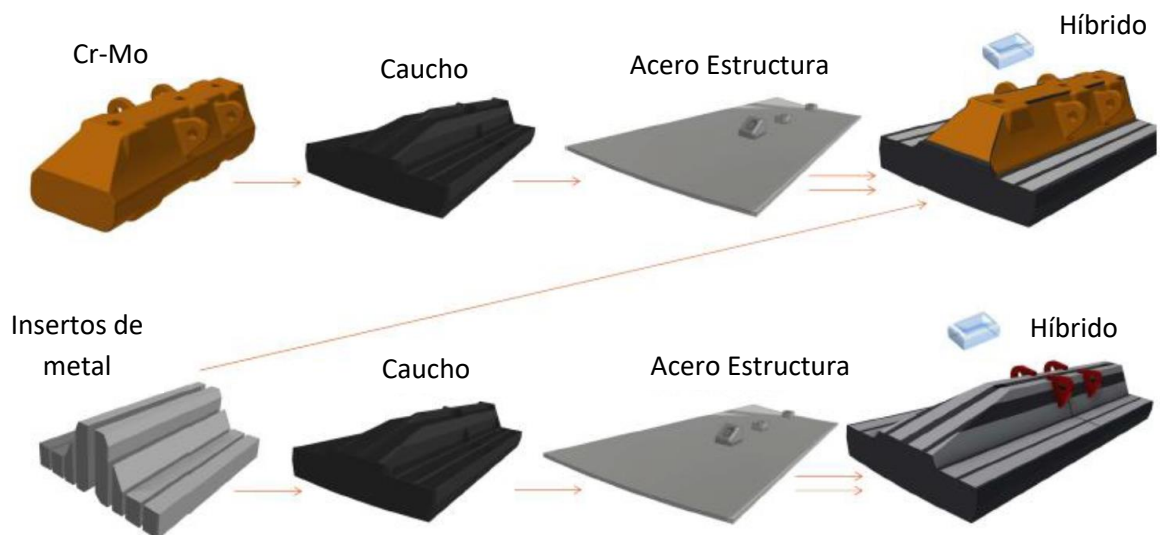


Figura 6: Geometría de revestimientos híbridos. Fuente: Tega Industries Spa.

2.4. Demanda de potencia molino SAG

Durante la operación se busca llegar a una demanda de potencia similar a la del diseño del molino, de lo contrario, se pierde capacidad de procesamiento [15].

Durante el siglo pasado (XX) se ha generado una considerable cantidad de literatura respecto a modelos de demanda de potencia en molienda y su predicción. Pero sólo durante los últimos 30 años es que los modelos de demanda de potencia se han validado con datos a escala industrial.

En general, las ecuaciones utilizadas para predecir la demanda de potencia son en función del tamaño del molino, del nivel y densidad de la carga interna y del porcentaje de la velocidad crítica.

Uno de los últimos modelos validados con datos a escala industrial corresponde al de M. Silva, A. Casali [8], donde a excepción de la mayoría de los modelos anteriores se agrega como variable la distribución de tamaño intermedio, considerando que esta variable influencia aún más en la operación que las características del mineral.

2.4.1. Modelo de demanda de potencia de M. Silva, A. Casali.

Para desarrollar el modelo utilizan datos de 4 circuitos de molienda correspondientes a 3 plantas de flotación de distintas mineras.

Parten con un método de regresión lineal simple utilizando el porcentaje de tamaño intermedio como variable independiente y la demanda de potencia como variable dependiente (1).

$$\frac{P_c}{D^{2,5}L} = m(\% - 6'' + 1'') + n \quad (1)$$

Donde

P_c = Demanda de potencia

D = Diámetro del molino

L = Largo del molino

m = Pendiente obtenida de la regresión lineal simple

n = Intercepto obtenido de la regresión lineal simple

Luego, igualan el intercepto a las demás variables que consideran influyentes en el proceso y utilizan regresión lineal multivariable encontrando los valores de las constantes, (2).

$$n = -6,7 \frac{N}{N_c} + 26,4 J_b + 4 \frac{1}{Scw} \quad (2)$$

Donde

N = Velocidad de operación del molino SAG

N_c = Velocidad crítica del molino SAG

J_b = Fracción en volumen del llenado de bolas dentro del molino SAG

Scw = Fracción en volumen del llenado de sólidos

Finalmente, reemplazan el intercepto en la ecuación inicial generando el siguiente modelo para predecir el consumo de potencia, (3).

$$P_c = D^{2,5}L \{0,0348(\% - 6'' + 1'') + 26,4 J_b - 6,7 \frac{N}{N_c} + 4 \frac{1}{Scw}\} \quad (3)$$

Este modelo, con un error promedio de 3,7%, presenta una buena capacidad de estimación y se puede utilizar en variadas aplicaciones, sin el objetivo de ser usado para el diseño de planta. Algunas de las aplicaciones son para la optimización de la molienda asociada a estudios en mine to mill¹, o para la implementación de pre chancado, o para la expansión de una planta de conminución en términos de rendimiento (toneladas tratadas por hora).

2.5. Consumo de Energía Específica molino SAG

El consumo de energía específico (CEE) del molino SAG se relaciona a la eficiencia del uso de la potencia, donde un menor CEE corresponde a un uso de energía más eficiente. Se calcula como la potencia sobre las toneladas procesadas por hora, (4).

$$CEE \left[\frac{kWh}{t} \right] = \frac{P_c [kW]}{Rendimiento [t/h]} \quad (4)$$

Bajo el mismo principio del modelo de demanda de potencia, M. Silva y A. Casali desarrollan un modelo empírico de CEE.

2.5.1. Modelo de consumo de energía específica de M. Silva, A. Casali.

Para el modelo de CEE se realiza el mismo proceso detallado anteriormente, generando una ecuación de una recta donde la variable independiente es el porcentaje de tamaño intermedio y la dependiente corresponde al CEE.

$$Ecs = a(\% - 6'' + 1'') + c \quad (5)$$

¹ Estrategia de integración entre la mina y la planta para incrementar la productividad, eliminando toda división o separación de intereses de los procesos por separado, integrando un interés y beneficio en común que es la fragmentación óptima del mineral [21].

Luego el intercepto se iguala a las demás variables de interés generando finalmente el modelo de CEE.

$$Ecs = 0,063(\% - 6'' + 1'') + 75,3 J_b - 45 \frac{N}{N_c} + 18,3 \frac{1}{Scw} \quad (6)$$

Donde

Ecs = Consumo específico de energía (CEE)

Con un error del 6,7% concluyen que no es un modelo lo suficientemente bueno, y esto se debe a la variabilidad, la cual es intrínseca a la variabilidad en la alimentación al Molino.

Sugieren el uso de algún índice que caracterice el mineral como lo es el SPI, Axb o DW_i.

3. SELECCIÓN DE VARIABLES OPERACIONALES A ESTUDIAR

En base a los estudios y análisis realizados, es posible evidenciar un gran número de variables que intervienen en la operación de la molienda SAG, y al ser este equipo el que realiza el trabajo principal y el mayor consumidor de potencia del circuito de conminución, las mismas variables serán las de mayor influencia en todo el circuito.

Para analizar las ventajas operacionales del uso de revestimiento híbrido en molino SAG es necesario considerar las variables influyentes en el proceso para poder llegar a la mejor predicción posible del comportamiento del molino SAG a través de modelos empíricos, y así poder evaluar las distintas condiciones de revestimiento.

A continuación, se describen las variables consideradas de mayor influencia en el proceso. Estas consideraciones fueron hechas en base a estudios y la opinión del operador en la minera estudiada.

3.1. Velocidad molino SAG

La velocidad del molino SAG corresponde a una fracción de la velocidad crítica a la que opera el molino, este parámetro influye directamente en la demanda de potencia del molino y en la fractura del mineral. Para poder optimizar el proceso se debe encontrar la velocidad o fracción de velocidad crítica óptima, debido a que luego de superar cierta magnitud la carga del molino adquiere una trayectoria desfavorable para la conminución del mineral, afectando directamente a los revestimientos debido a la colisión directa con los medios de molienda [16].

Debido a lo anterior, es importante encontrar la velocidad óptima de operación considerando la granulometría final del circuito de molienda y el nivel de llenado del molino SAG. La correlación entre estas variables establece que a una velocidad óptima se logra el perfil de conminución en menor tiempo y así también se descarga de manera óptima el molino, pudiendo aumentar el rendimiento (t/h).

3.2. Distribución de Tamaño

La influencia de la distribución de tamaño de alimentación tiene que ver directamente con que el molino SAG utiliza mineral y bolas de acero como medios de molienda.

Cualquier cambio en la distribución de tamaño de mineral en la alimentación resultará en un cambio en la distribución de tamaño de los medios de molienda, para lo cual el mineral grueso en la alimentación favorecerá la capacidad de molienda. Otro beneficio de cargas gruesas es que generan una mayor permeabilidad en la pulpa aumentando la tasa de descarga a través de la parrilla.

Para el caso de las variaciones en la tasa de descarga debido a las distribuciones de tamaño de la carga, éstas se compensan mediante el ajuste de la densidad de la pulpa [17].

3.3. Dureza del mineral

La dureza del mineral que procesa un molino SAG es una de las variables de las cuales el operador no tiene control. Mientras mayor sea la dureza (bajo índice Axb o alto Sag Power Index-SPI) será más difícil realizar la tarea de conminución siendo mayor el tiempo requerido para reducir el tamaño.

La respuesta en la operación con un mineral con mayor dureza corresponderá a un incremento en el volumen de llenado y un aumento en la potencia consumida [17].

3.4. Nivel de llenado de bolas y concentración de sólidos

Con el fin de determinar la carga óptima en un molino SAG se debe considerar la evaluación de los siguientes parámetros [18].

1. Velocidad de molino SAG y nivel de ruido dentro del molino. Se debe determinar el porcentaje de velocidad crítica a la cual se operará el molino SAG de tal modo que la carga formada por mineral, bolas y agua produzca un sonido distinto al conocido del contacto entre revestimiento y bolas de acero.
2. Demanda de potencia por molino SAG. El molino debe trabajar cerca de su potencia de diseño o de lo contrario pierde su capacidad de procesamiento, influyendo directamente en el nivel de carga del molino.
3. Tamaño de transferencia. Corresponde al tamaño del producto del molino SAG, donde una carga óptima producirá un tamaño aceptable de transferencia.
4. Revestimientos de molino SAG. El diseño de los revestimientos influye en el movimiento de la carga al interior del molino, lo que determina la trayectoria de las bolas y su cantidad. En su diseño debe estar considerado el desgaste que tendrá el revestimiento, para poder lograr un movimiento de carga ideal durante la totalidad de la campaña.

5. Abertura de la parrilla. Influye en la descarga. El tener una óptima cantidad de bolas ayuda a que la carga pase a través de las aberturas y no se sobrecargue el molino. El diseño de la parrilla debe considerar el desgaste que se producirá, ya que la abertura puede cambiar considerablemente durante la campaña provocando la descarga de mineral de tamaño superior al requerido.
6. Dureza del mineral. Rocas más duras requieren mayor cantidad de bolas dentro del molino, teniendo que disminuir la cantidad de mineral en alimentación para cumplir con el target de presión de los descansos.

3.5. Peso de los revestimientos

El peso de los revestimientos influye en el peso total del cilindro, el cual dependerá del material del revestimiento, donde por lo general la diferencia entre el peso de revestimiento híbrido y revestimiento de acero es del 13%.

El peso total del cilindro influye en la eficiencia de la operación de molienda. Esto se explica de manera física por la fuerza de inercia aplicada para el movimiento. Al cilindro se le entrega energía eléctrica para rotar, donde parte de esta energía se pierde por roce, calor, etc.

$$E_{Efectiva} = E_{Eléctrica} - Pérdidas calor - Pérdidas roce - Pérdidas proceso \quad (7)$$

La energía efectiva corresponderá a la respuesta de la aplicación de una energía eléctrica, la cual será la energía rotacional.

$$E_{Efectiva} = E_{Rotacional} \quad (8)$$

A su vez, la energía rotacional dependerá del momento de inercia y la velocidad angular, siendo el momento de inercia el resultante entre la masa del cuerpo que

rota y el radio del cilindro al cuadrado. Esto explica que mientras mayor sea la masa del cilindro mayor será el consumo de energía específico.

$$E_{Rotacional} = \frac{1}{2} I * \omega^2 \quad (9)$$

$$I = m * (r^2 + R^2) \quad (10)$$

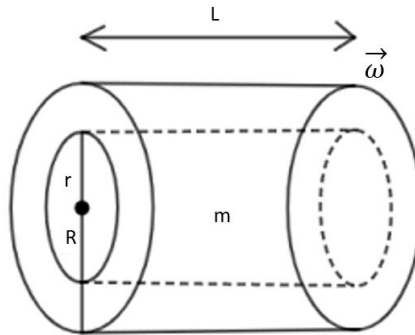


Figura 7: Ejemplo de cilindro del molino SAG.

Donde.

m = Masa del cilindro

R = Radio del cilindro

r = Distancia entre el centro del cilindro y el revestimiento

L = Largo del cilindro

ω = Velocidad angular

Resumen: Variables operacionales consideradas

Finalmente, en la Tabla 1 se muestran las variables consideradas de mayor incidencia en la operación del molino SAG.

Tabla 1: Variables seleccionadas para generación de modelos de potencia, CEE, alimentación fresca y su designación.

VARIABLE	DESIGNACIÓN Y UNIDAD
Potencia SAG	P_D , kW
Consumo de Energía Específica	CEE, kWh/t
Tonelaje de alimentación fresca	Gsf, t/h
Velocidad SAG	N/N_c , %
Volumen de bolas	J_b , %
Volumen de sólidos	C_p , %
Porcentaje de distribución con tamaño medio	(-4" +1,25"), %
Porcentaje de distribución con tamaño grueso	(+4"), %
Índice de dureza	Axb, -
Peso de revestimientos	Pr, t

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para evaluar la influencia del uso de distintos revestimientos en la operación de molienda SAG se generarán modelos empíricos predictivos de demanda de potencia y de consumo específico de energía (CEE). Esto mediante regresión lineal múltiple de las distintas variables influyentes en el proceso incluyendo el peso de revestimiento.

Al obtener el modelo de potencia (kW) y de CEE (kWh/t) se puede generar un tercer modelo producto de la división entre ambos correspondiente al rendimiento (t/h). Con esta información se pueden evaluar directamente las ventajas operacionales del uso de revestimiento híbrido frente al uso de revestimiento de acero, obteniendo la diferencia en tonelaje procesado y consumo específico de energía.

4.1. Datos operacionales

Para desarrollar este trabajo se solicita a minera la información mínima requerida para poder generar modelos predictivos de demanda de potencia y de consumo específicos de energía. Estos corresponden a las características del mineral tratado como su dureza y tamaño, junto con información operacional como la potencia, tonelaje de mineral, velocidad del molino, porcentaje de sólidos y porcentaje de bolas.

Para poder realizar un buen análisis se solicitaron datos de un amplio rango de tiempo en el cual hubo cambios en el mineral y tipo de revestimiento.

Para obtener modelos empíricos predictivos es necesario contar con información de calidad, debido a que valores extremos o erróneos generan problemas al

aplicar una regresión y disminuye la calidad de predicción. La medición de estos datos en faena suele ser desprovista de cuidado, centrándose en el resultado que es el tonelaje alimentado al molino, por lo que se genera información con una gran cantidad de valores anormales y distribuciones erráticas, lo cual es un limitante para poder obtener una alta exactitud en los resultados de los modelos.

Además, existen los errores asociados a la operación y elementos de medición, esto genera un sistema sesgado inclusive teniendo una práctica de medición rigurosa. Respecto a lo anterior, existen distintos escenarios que pudiesen generar mediciones erróneas, como:

- Elementos de medición sin la calibración adecuada o descalibrados.
- Desgaste en las piezas de medición.
- Contaminación en el sistema de medición.
- Instrumento utilizado de manera errónea o incompatibles con el sistema.

Para el proceso de limpieza o descarte de datos erróneos se definirá en primer lugar lo que se considera un dato correcto. Al ser el objetivo del análisis el caracterizar el comportamiento normal del proceso, se considerarán datos correctos a los que reflejen la operación normal de molienda. Diciendo esto, se descartarán los datos que se consideren “outliers” (valores críticos).

Además, durante la operación ocurren ciertas paradas del molino por distintas razones, entre ellas se encuentra el cambio de algún revestimiento por rompimiento, renovación de parrillas, fallas en el circuito de molienda o baja disponibilidad de material para cargar el molino. Durante estas paradas las mediciones de las distintas variables continúan, teniendo que ser descartadas por la razón comentada anteriormente. Estos datos son descartados con la información de la variable “horas de operación”, donde si esta no supera el 85% del día se considerará descartado el día por ser una operación anormal.

4.1.1. Peso del revestimiento

A diferencia de las variables operacionales medidas y entregadas por la planta, el peso de los revestimientos se calculó en base a: las plantillas de diseño de cada revestimiento, el peso inicial de cada revestimiento y su perfil de desgaste.

La plantilla de diseño es entregada como documento CAD realizado por cada fabricante, donde se puede extraer el peso inicial del revestimiento y su geometría.

Para la obtención de los perfiles de desgaste de cada tipo de revestimiento se parte con la toma de una nube de puntos dentro del molino SAG con la tecnología FARO a distintos tiempos de operación, por lo general al inicio, tiempo intermedio y final de cada campaña. Esta información es procesada y traducida con el software FARO SCENE, generando imágenes 3D como las mostradas en la Figura 8 que permiten la inspección visual de las zonas internas del molino.

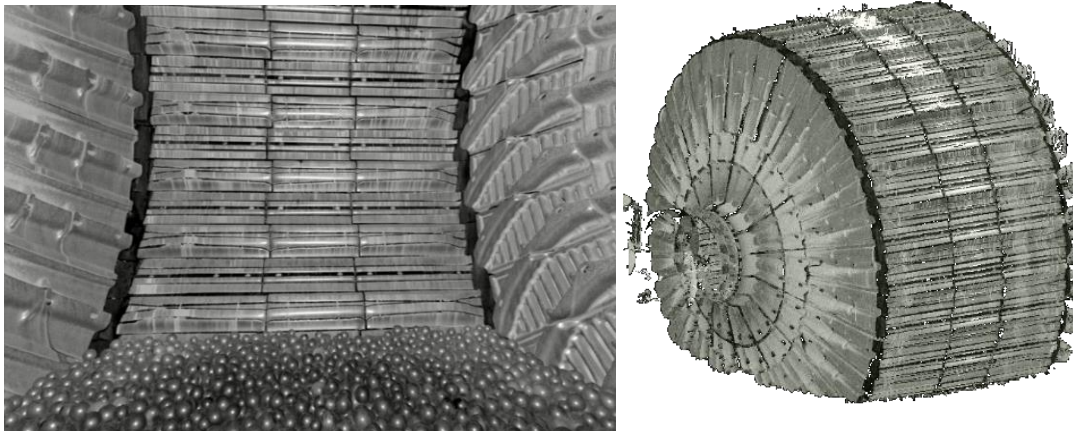


Figura 8: Imágenes 3D interpretadas mediante software FARO SCENE.

Luego, se importa la nube de puntos al software Geomagic Design X, donde se procesa la nube (filtro, suavizamiento y eliminación de datos innecesarios), se realizan cortes 2D longitudinales y transversales de la figura 3D en formato DWG, Figura 9.

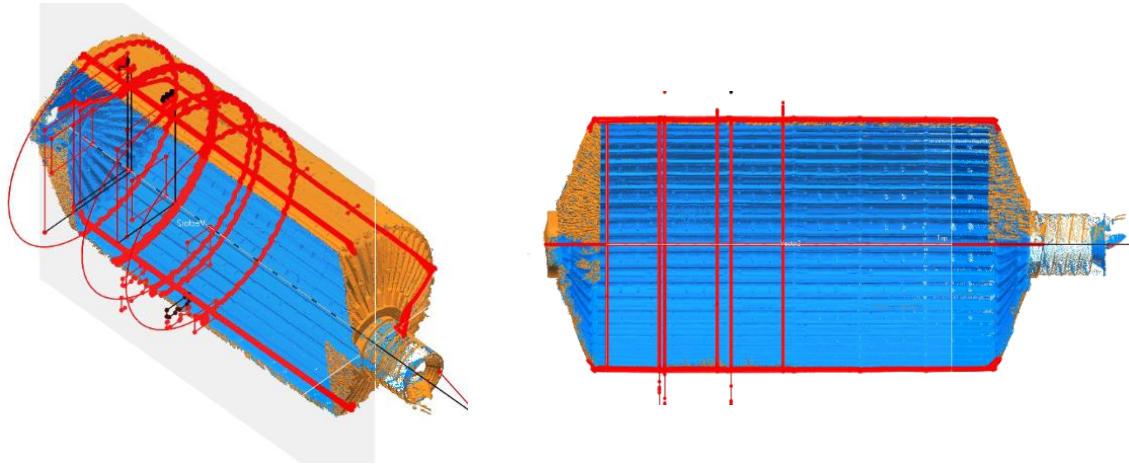


Figura 9: Cortes longitudinales y transversales 2D desde software Geomagic Design X.

Para seleccionar el área más representativa de desgaste de cada revestimiento se utiliza el software Geomagic Control X, que genera un mapa de desgaste con espectro de colores. A partir de este software se generan los cortes 2d y las acotaciones de desgaste, Figura 10.

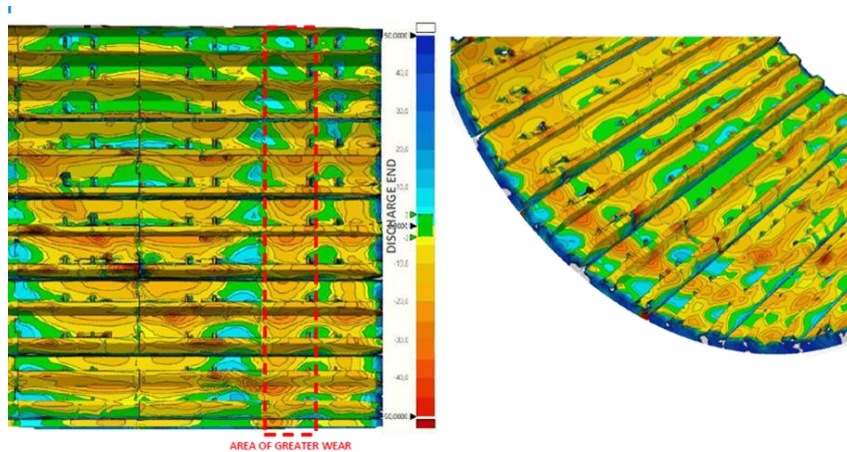


Figura 10: Mapa de desgaste generado con software Geomagic Control X.

Finalmente, ya seleccionada la zona que represente el desgaste sufrido por el revestimiento, se importan los gráficos 2D al software AUTOCAD. Generando gráficos como los de la Figura 11.

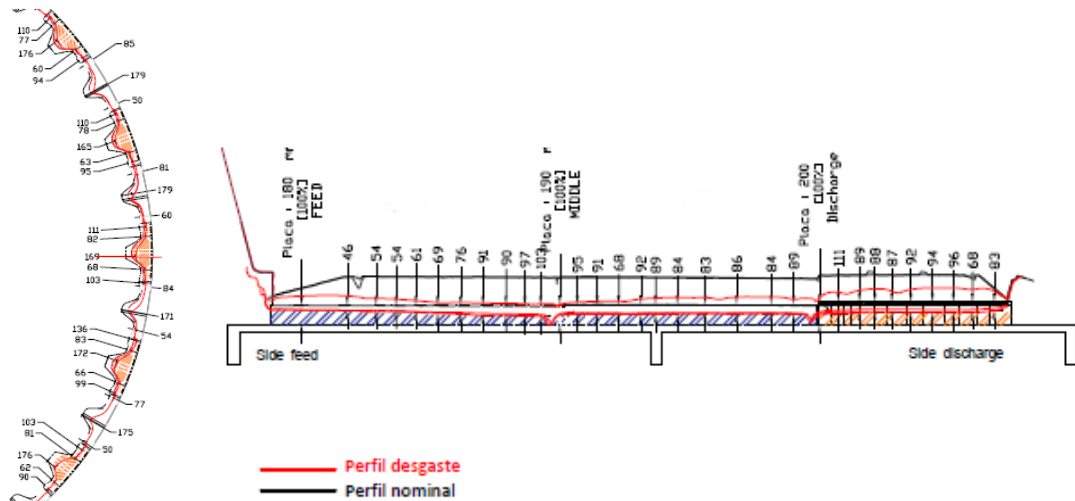


Figura 11: Corte transversal (izquierda) y corte longitudinal (derecha) detallando desgaste visto en software AUTOCAD.

A partir de este último software se calcula el área remanente sacando el equivalente en peso. Para el caso de los revestimientos híbridos donde su configuración corresponde a caucho con placas insertas de metal, el cálculo del peso remanente se realiza teniendo la configuración inicial de cada revestimiento y conociendo los valores de densidad de cada material.

De esta manera es posible considerar el peso de revestimiento como una variable y así concluir con respecto al efecto del tipo de revestimientos en la operación.

4.2. Desarrollo de modelos

A partir del análisis y selección de variables y limpieza de datos descrita anteriormente, se busca el desarrollo de modelos predictivos de la demanda de potencia del Molino SAG y del consumo específico de energía de éste.

La potencia consumida está determinada directamente por el torque del sistema, y éste a su vez depende de las dimensiones del molino a través del factor " $D^{2.5} * L$ ". Como la potencia consumida depende directamente de las dimensiones del

molino y estas cambian en distintas faenas, se generaría un sesgo en la interpretación del modelo, por lo que se optará por independizar el consumo de potencia de las dimensiones del equipo de la forma en que se muestra en la ecuación (11).

$$\frac{P_D}{(D^{2,5} * L)} = f\left(J_b, \frac{N}{N_c}, Axb, C_p, P_r, \text{Distribución de tamaño}\right) \quad (11)$$

Esta forma de independizar la potencia consumida de las dimensiones del equipo permite hacer comparaciones del comportamiento operacional con molinos de distinto tamaño, igualando el campo comparativo y permitiendo el análisis de las distintas variables estudiadas sobre el consumo de potencia.

Para el desarrollo del modelo de consumo específico de energía no es necesario realizar esta ponderación, debido a que implícitamente esto ya está incluido. Las dimensiones del equipo se incluyen indirectamente en la capacidad de tratamiento, Gsf, y la expresión del consumo de energía específico se indica en la ecuación (12).

$$CEE = \frac{P_D}{Gsf} \quad (12)$$

De igual forma que el modelo de potencia consumida se formula el modelo de consumo específico de energía, analizando la influencia de las mismas variables expuestas anteriormente, (13).

$$CEE = f\left(J_b, \frac{N}{N_c}, Axb, C_p, P_r, \text{Distribución de tamaño}\right) \quad (13)$$

Con la obtención de estos dos modelos es posible la generación de un tercer modelo que pueda predecir el tonelaje de alimentación fresca que ingresa al circuito de molienda, Gsf. Este tercer modelo será obtenido como el cociente entre la demanda de potencia P_c (kW) y el consumo específico de energía CEE (kWh/t), como se muestra en la ecuación (14).

$$Gsf = \frac{P_D}{CEE} \quad (14)$$

Este análisis es procesado a través del software de estadística Minitab, con el cual es posible la generación de regresiones en base a datos y el estudio de la influencia de cada variable en el ajuste de los modelos.

Con estos modelos será posible concluir respecto al objetivo de este trabajo, obteniendo la cuantificación directa del beneficio por el uso de revestimiento híbrido.

5. ANÁLISIS DE DATOS OPERACIONALES

La información corresponde a la recolección de datos de 4 campañas, equivalentes a 762 días de operación de un molino SAG de 40x26'. En estas campañas se utilizaron tanto revestimientos híbridos como de acero provenientes de distintos proveedores.

La planta minera de donde se recolectan los datos utiliza un sistema experto el cual consiste un sistema informático que controla variables en función de la optimización del proceso. Los datos por utilizar corresponden a promedios móviles diarios de variables de interés.

La variable del peso de revestimiento se obtiene mediante el análisis de imágenes 3D tomadas con la tecnología FARO en distintas fechas de cada campaña. De estas se obtiene la curva de desgaste de cada revestimiento lo cual se puede extrapolar al peso remanente de estos conociendo su geometría y peso inicial.

Al ser este un estudio específico de la operación de una minera con revestimientos de materiales y composición determinada por cada fabricante, las conclusiones son válidas únicamente para este caso de estudio. Considerando este estudio como una guía para análisis de este tipo.

5.1. Limpieza de datos

La limpieza de datos comienza con la eliminación de días con valores nulos al considerarse como días donde hubo parada del molino, algún imprevisto, o algún error en los sistemas de medición. Además, se descartan los días donde se operó menos de un 85%, lo que corresponde a horas de operación menores a 20,4[h], debido a que esto refleja algún imperfecto en la operación y no se considera representativo.

Luego, se realiza una limpieza visual descartando los días que muestren datos aberrantes, teniendo mayor atención con los porcentajes de tamaño grueso de mineral y si estos son antecesores a un cambio en la operación, si no se generan otros cambios en las demás variables como el porcentaje de sólidos, puede significar un error en la cámara de medición.

Como se quiere analizar el efecto del peso del revestimiento en la operación de molienda, y no el desgaste de estos que afecta de sobremanera en la operación, es que para este estudio se considera sólo el principio de cada campaña donde el peso del revestimiento llega al 80% de su valor inicial, este porcentaje es utilizado debido a que se concluyó que en las cuatro campañas los distintos revestimientos llegan a este porcentaje en un tiempo similar, descartando el efecto del desgaste en el estudio.

Al existir desgaste de revestimientos se debe aplicar una mayor velocidad para tratar la misma cantidad de mineral, esto debido a que la velocidad compensa la pérdida de ángulo de levante del revestimiento, resultando en un mayor consumo específico de energía. Al disminuir la eficiencia debido al desgaste, para una misma potencia se tendrán mayores rangos de CEE, Figura 12.

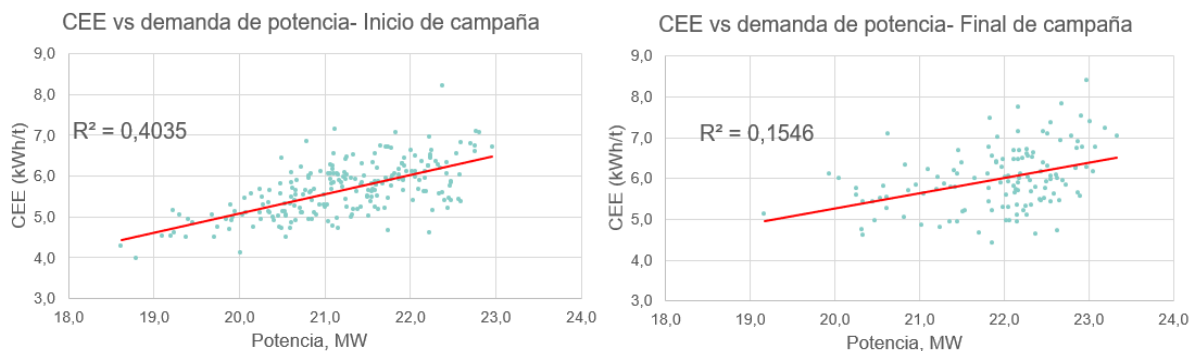


Figura 12: Cambio en CEE a una misma potencia por el aumento en el desgaste entre el inicio (izquierda) y término de campaña (derecha).

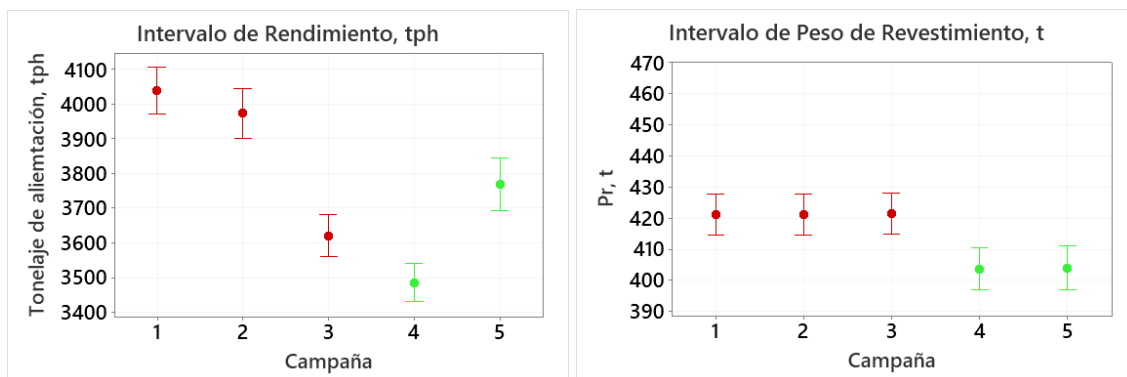
Finalmente, los días a utilizar serán los primeros 67 de cada campaña donde el desgaste es similar entre los distintos revestimientos, sumando 268 días de operación (cuatro campañas).

5.2. Correlación de variables

No considerando el efecto del desgaste de revestimientos en la operación del molino SAG y ya filtrada la base de datos con el objetivo de entregar representatividad a los modelos de operación de la planta, es que se puede analizar la correlación entre las variables seleccionadas.

El objetivo del presente trabajo es analizar posibles beneficios del uso de revestimientos híbridos frente a revestimientos de acero, siendo la única diferencia cuantificable el peso del revestimiento, donde el de acero fundido es un 13% mayor que el de características híbridas.

La correlación entre las distintas variables se puede apreciar mediante gráficos de intervalos. En las primeras tres campañas se utilizó un 17% de revestimientos de híbridos dentro del molino, mientras que en las últimas dos campañas se revistió en un 67% con revestimientos híbridos.



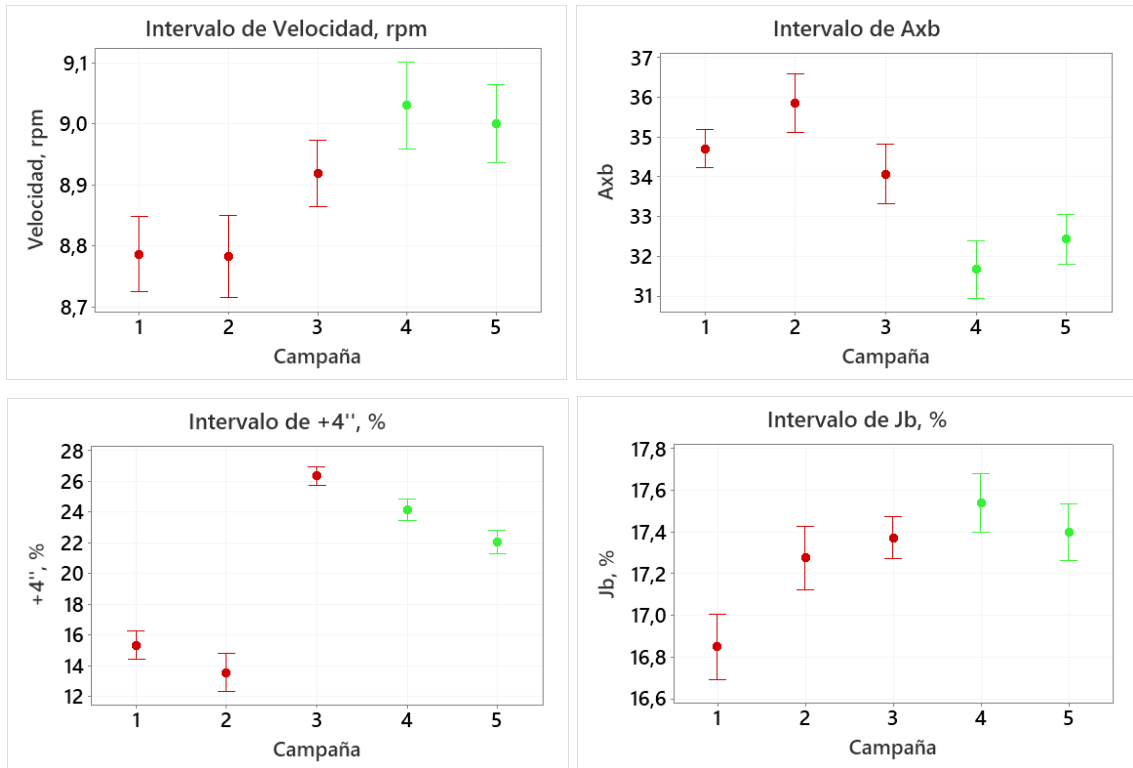


Figura 13: Gráficos de rangos de variables operacionales de 5 campañas.

La idea de analizar las distintas variables operacionales vinculadas al molino SAG en las campañas a procesar, es la de identificar la influencia del peso del revestimiento en el rendimiento del proceso, es decir, en las toneladas tratadas por hora de operación.

En general, a medida que aumenta la dureza del mineral (menor índice Axb), se necesitará un mayor ingreso de bolas (J_b), o un mayor ingreso de mineral grueso, lo que conlleva una disminución de la velocidad del molino para evitar el contacto entre las bolas de acero y el revestimiento, esto se controla mediante la medición del impacto producido dentro del molino. Concluyendo que si el mineral presenta una mayor dureza que en campañas anteriores y se alcanzan mayores tasas de velocidad indica que el proceso está siendo más eficiente en cuanto a procesamiento.

En la Figura 13 se puede observar que en las últimas dos campañas en las cuales se utilizó revestimiento híbrido, coincidió con mineral de alta dureza, por

lo que se aumentó el porcentaje de bolas dentro del molino. Además, hubo un ingreso alto de porcentaje de mineral grueso. Como resultado de estas características de operación, el impacto dentro del molino debería aumentar y el sistema experto disminuir la velocidad del molino como respuesta. Como se observa que en estas dos campañas inclusive aumentó la velocidad, esto refleja que el rendimiento de la operación aumentó debido al cambio de revestimiento.

Con respecto al rendimiento del molino SAG en las distintas campañas, este está altamente relacionado con los cambios en el índice de dureza Axb del mineral, donde si la dureza es mayor, el mineral estará un mayor tiempo dentro del molino hasta llegar a su tamaño de descarga.

A pesar de los análisis que se puedan realizar respecto a los datos operacionales, nunca habrá una concordancia total con respecto a la teoría. Esto ocurre debido a que la operación cuenta con imprevistos que sólo el operador puede conocer, tales como baja disponibilidad de mineral en stockpile para ingresar al molino, problemas en otros equipos aguas arriba, etc. Para esto se realizan modelos de operación con alta cantidad de datos aumentando la representatividad y permitiendo un análisis más acabado.

6. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS

En este capítulo se diseña y desarrollan los modelos predictivos para la determinación de la demanda de potencia (P_D), y del consumo específico de energía (CEE).

Los modelos se basan en la elección de variables influyentes indicadas en el capítulo 5. La información para alimentar estos modelos en cuanto a variables operacionales corresponde a la base de datos entregada por la faena minera en estudio, y en cuanto a la variable peso de revestimiento corresponde a los datos entregados por la empresa proveedora de revestimientos Tega Industries.

Para lograr modelos empíricos es necesario que las variables independientes se encuentren normalizadas y adimensionales. Por lo que, la velocidad del molino SAG se utilizará como la fracción de velocidad utilizada con respecto a la velocidad máxima de diseño (N/N_c), el porcentaje de bolas dentro del molino se utilizará como la fracción en volumen de ocupada por bolas de acero (J_b), el porcentaje de sólidos como la fracción en volumen ocupada por sólidos en el molino (C_p), la distribución de tamaño tanto gruesa (+4") como intermedia (-4"+1,25") se utilizará como fracción respecto al total, la dureza se utilizará como índice de dureza adimensional (A_{xb}), y el peso del revestimiento se utilizará como la fracción que corresponde al peso total del revestimiento dentro del cilindro con respecto al peso total del cilindro más el peso del revestimiento (P_r).

6.1. Modelo de Demanda de Potencia

En este estudio es esencial la construcción de un modelo predictivo de demanda de potencia por temas de dimensionamiento del molino SAG y para que junto con el modelo de CEE se logre la predicción de rendimiento del molino SAG.

El primer paso para el desarrollo del modelo corresponde a buscar la relación de subconjuntos o variables mencionadas en el capítulo 5 que genere un mejor ajuste a la operación.

Esta función la entrega el programa de estadísticas Minitab, siendo una manera eficiente de identificar modelos que se ajusten adecuadamente a los datos utilizando la menor cantidad posible de predictores o variables, pudiendo detectar la información redundante. Esta función genera la siguiente tabla.

Tabla 2: Análisis de regresión del mejor subconjunto para modelo de demanda de potencia.

N° Regresión	Vars	R ²	R ² ajust	R ² pron	Cp de Mallows	S	N/N _c	Jb, %	(+4"), %	(-4"+1,25"), %	Pr, t	Axb	Cp, %
1	1	77,3	77,2	76,9	317,5	0,0978	X						
2	1	38,6	38,4	37,7	1307,6	0,1608		X					
3	2	89,4	89,3	89,2	9,5	0,0670	X	X					
4	2	79,6	79,5	79,1	260,3	0,0929	X						X
5	3	89,6	89,5	89,3	5,3	0,0663	X	X					X
6	3	89,5	89,4	89,2	8,8	0,0668	X	X				X	
7	4	89,7	89,6	89,3	5,2	0,0662	X	X		X			X
8	4	89,7	89,6	89,3	5,4	0,0662	X	X				X	X
9	5	89,8	89,6	89,4	5,1	0,0660	X	X		X		X	X
10	5	89,8	89,6	89,3	5,7	0,0661	X	X		X	X		X
11	6	89,8	89,6	89,3	6	0,0660	X	X		X	X	X	X
12	6	89,8	89,6	89,3	7	0,0661	X	X	X	X		X	X
13	7	89,8	89,6	89,3	8	0,0662	X	X	X	X	X	X	X

A partir de la Tabla 2 se puede hacer el análisis de qué variables utilizar en el modelo predictivo. Para esto se definen las siguientes herramientas estadísticas:

- Vars: Indica el número de predictores incluidos en cada modelo. Donde cada fila corresponde al análisis de regresión de un modelo que utiliza los predictores o variables marcadas con una "X".
- R²: Es el porcentaje de variación en la respuesta del modelo. Se utiliza para determinar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos, mientras mayor sea el valor, mejor se ajustará el modelo a los datos.
- R² ajustado: Corresponde al porcentaje de variación en la respuesta del modelo ajustado al número de predictores. R² siempre aumenta al

agregar una variable al modelo, mientras que R^2 ajustado incorpora el número de variables en el modelo para ayudar a elegir el modelo correcto.

- R^2 pronosticado: Ayuda a determinar qué tan bien el modelo predice en casos nuevos. Los modelos con mayor R^2 tienen mejor capacidad de predicción. Un R^2 pronosticado sustancialmente menor que R^2 puede indicar que el modelo está sobre ajustado con variables no relevantes.
- Cp de Mallows: Compara los modelos en función de su precisión y sesgo. Un valor de Cp que esté cerca del número de predictores indica que el modelo produce estimaciones relativamente precisas y no sesgadas.
- S: Representa la desviación estándar entre los valores reales y los entregados por el modelo. Mientras más bajo sea el valor de S, mejor describirá el modelo la respuesta.

En base a estas definiciones, se puede considerar que la regresión de subconjuntos que permite un mejor modelo es la número 11. Esto principalmente por el valor de “Cp de Mallows” y “S”.

El paso siguiente corresponde a la regresión lineal del conjunto de datos con las variables seleccionadas normalizadas y adimensionales. Esto entrega el modelo mostrado en la ecuación (15).

$$\frac{P_D}{D^{2,5}L} = -2,329 + 6,7 \frac{N}{N_c} + 12,018 J_b + 0,153 (-4'' + 1,25'') \quad (15)$$

$$- 0,00199 Axb + 0,278 \frac{1}{C_p} + 0,268 \left(\frac{P_r}{P_{cilindro} + P_r} \right)$$

Finalmente, este modelo presenta un ajuste del 89,85% y una desviación estándar de 0,0660.

Si comparamos con el método aportado por M. Silva y A. Casali [8], y ajustando su modelo a la base de datos estudiada, obtenemos el modelo representado por la ecuación (16).

$$\frac{P_D}{D^{2,5}L} = -2,314 + 6,841 \frac{N}{N_c} + 11,749 J_b + 0,154 (-4'' + 1,25'') \quad (16)$$

$$+ 0,294 \frac{1}{C_p}$$

Con este método se obtiene un ajuste de 89,73% y una desviación estándar de 0,0662, levemente inferior al propuesto en este estudio.

6.2. Modelo de Consumo de Energía Específica

Para la construcción de este modelo se utilizará la misma metodología empleada anteriormente. Como primer paso se realiza la búsqueda del mejor subconjunto de variables para la regresión a través de la Tabla 3.

Tabla 3: Análisis de egresión del mejor subconjunto para modelo de consumo específico de energía.

N° Regresión	Vars	R ²	R ² ajust	R ² pron	Cp de Mallows	S	N/N _c	Jb, %	(+4''), %	(-4''+1,25''), %	Pr, t	Axb	Cp, %
1	1	23,1	22,8	22	204,4	0,585		X					
2	1	22,4	22,1	21	208,9	0,588			X				
3	2	39,4	39	38	107,1	0,52		X				X	
4	2	38,4	38	36,8	113	0,524		X	X				
5	3	50,3	49,7	48,4	43	0,472		X	X			X	
6	3	48,6	48	46,8	53,1	0,48			X			X	X
7	4	55,4	54,8	53,3	13,5	0,448		X	X			X	X
8	4	51,7	50,9	49,4	36,4	0,466	X	X	X			X	
9	5	56,5	55,7	54	9,1	0,443		X	X		X	X	X
10	5	56,3	55,5	53,9	10	0,444	X	X	X			X	X
11	6	57,3	56,3	54,5	6	0,44	X	X	X		X	X	X
12	6	56,5	55,5	53,4	11,1	0,444		X	X	X	X	X	X
13	7	57,3	56,2	53,9	8	0,441	X	X	X	X	X	X	X

A partir de las definiciones de las herramientas estadísticas realizadas anteriormente, se selecciona como mejor subconjunto al utilizado en la regresión número 11 expuesta en la Tabla 3, debido a que muestra un mayor ajuste

respecto a la cantidad de variables utilizadas, la menor desviación estándar y un cp de Mallows igual a la cantidad de variables.

Luego de esto, se realiza la regresión del subconjunto de variables seleccionado. Resultando la ecuación (17) como el modelo propuesto de CEE.

$$CEE = -9,37 + 3,23 \frac{N}{N_c} + 31,61 J_b + 3,66 (+4'') - 0,0568 Axb \quad (17)$$

$$+ 4,324 \frac{1}{C_p} + 4,27 \left(\frac{P_r}{P_{cilindro} + P_r} \right)$$

Finalmente, este modelo presenta un ajuste del 57,31% y una desviación estándar de 0,44.

Para comparar con el modelo propuesto por M. Silva y A. Casali [8] se ajusta su modelo con la base de datos de este estudio, resultando en la ecuación (18).

$$CEE = -13,01 + 8,20 \frac{N}{N_c} + 30,36 J_b + 0,989 (-4'' + 1,25'') + 5,147 \frac{1}{C_p} \quad (18)$$

Mediante este método se obtiene un ajuste del 39,61% y una desviación estándar de 0,52.

Para el consumo específico de energía, al ser una variable muy sensible a cambios en la operación, resulta más compleja su predicción. Donde al aumentar la cantidad de variables en el modelo aumentará el ajuste de este.

6.3. Modelo de Tonelaje de Alimentación

Como se mencionó anteriormente, el modelo propuesto corresponde a la división de los modelos de potencia consumida y consumo específico de energía, quedando en función de las variables ya definidas. Siendo calculado como se muestra en la ecuación (19).

$$Gsf (t/h) = \frac{P_D (kW)}{CEE (kWh/t)} \quad (19)$$

Para poder validar este modelo se realiza una comparación entre los valores reales de alimentación a molino SAG y los valores entregados por el modelo, esto se muestran en la Figura 14.

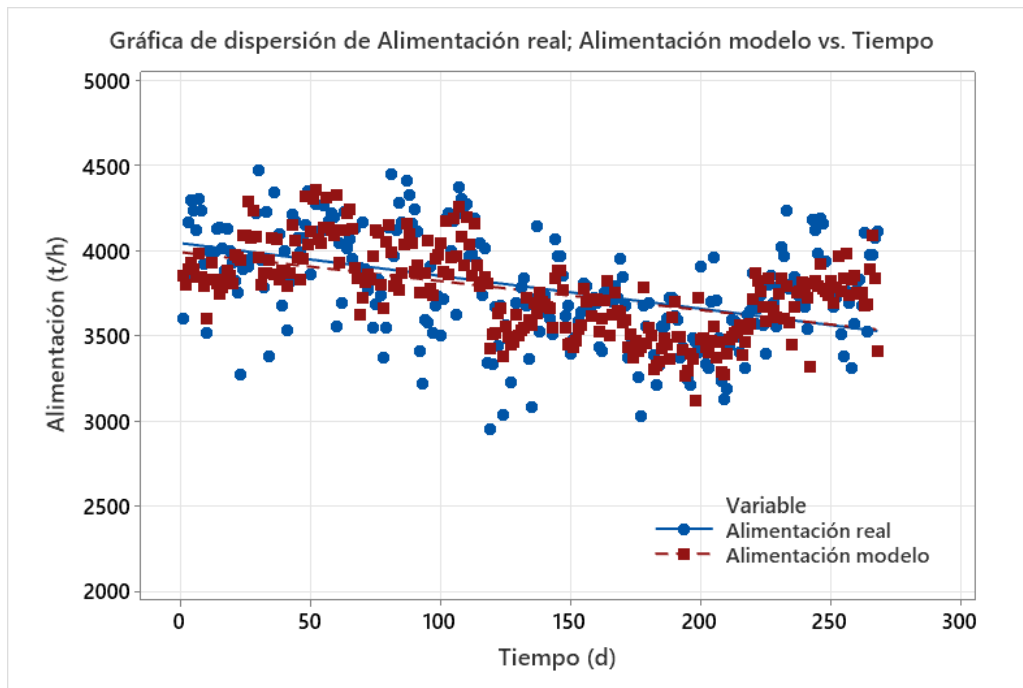


Figura 14: Comparación entre la alimentación real al molino SAG y la obtenida con el modelo de alimentación.

El ajuste mostrado por este modelo es de un 44,76%, con una desviación estándar de 303 [t/h]. La alta dispersión de los puntos notada en la predicción de tonelaje de alimentación se debe a la propagación de errores, principalmente asociados al modelo de CEE.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analizará la variable peso de revestimiento en los distintos modelos para operaciones con características idénticas, con el objetivo de cuantificar la posible ventaja operacional del uso de revestimientos híbridos frente a revestimientos de acero. La diferencia de peso entre cilindro revestido con revestimiento de acero e híbrido corresponde aproximadamente a 59 [t], un 13%.

Para el análisis de influencia del tipo de revestimiento en cada modelo, se usará un peso de 468,4 [t] en el caso de acero, y de 409,2 [t] en el caso de híbrido.

7.1. Análisis de Demanda de Potencia

La demanda de potencia en un molino SAG debe mantenerse cercana a la potencia de diseño del molino, en caso contrario se pierde capacidad de procesamiento. Es por esto, que este modelo se utiliza más como un predictor que permite evaluar las distintas variables en el consumo específico de energía y tonelaje de alimentación.

Referido a lo anterior, no debiese haber una variación de potencia significativa. Esto se puede observar en la Figura 15. La diferencia entre ambas medianas corresponde a 36 kW.

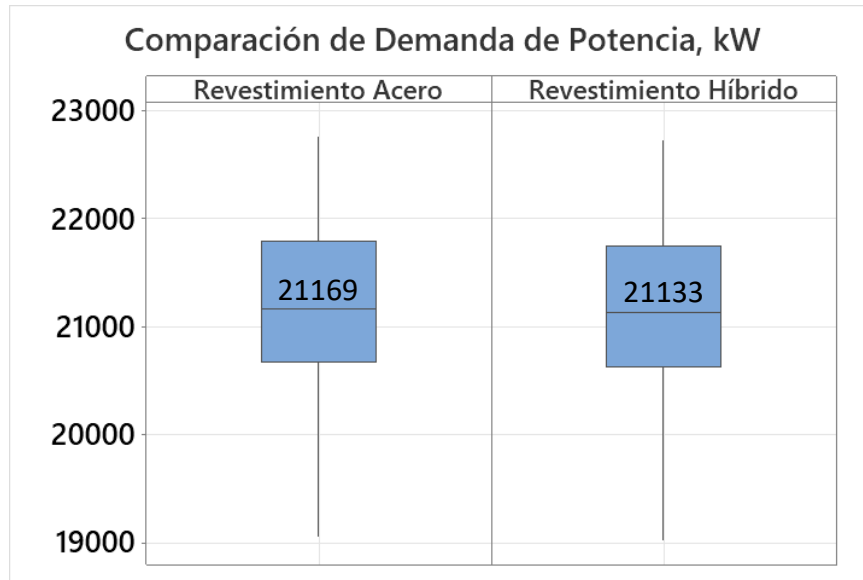


Figura 15: Comparación en Demanda de Potencia con el uso de distintos revestimientos mediante el uso del modelo.

7.2. Análisis de Consumo de Energía Específica

Al evaluar el peso de revestimiento en el modelo de consumo de energía específica, resulta una diferencia de 0,14 kWh/t. La distribución de estos valores durante una campaña con las mismas características, pero con el uso de distinto revestimiento, se muestra en la Figura 16.

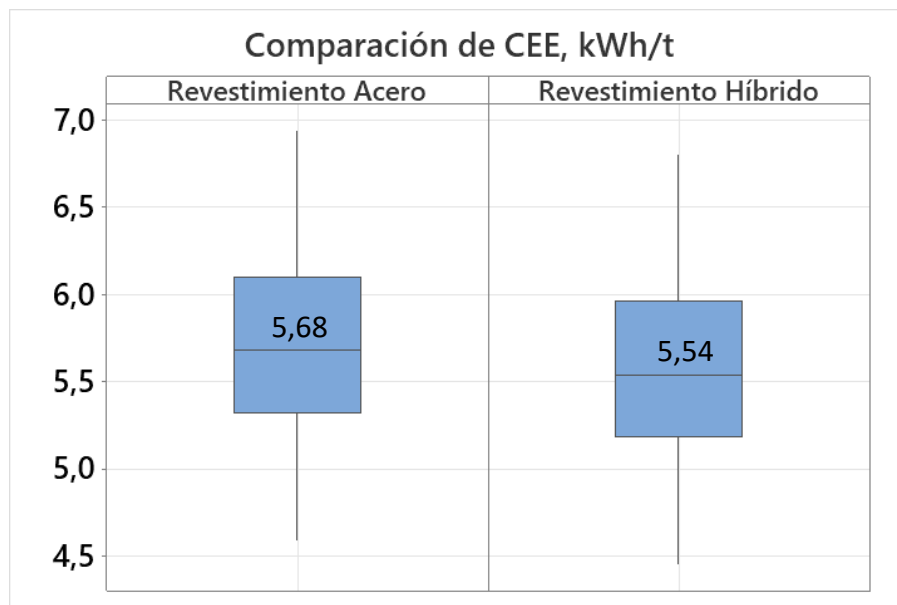


Figura 16: Comparación en Consumo de Energía Específica con el uso de distintos revestimientos mediante el uso del modelo.

Esta diferencia significa un aumento en la eficiencia del uso de potencia de un 2,5%. Si se considera que en una campaña se tratan 14 [MMt], se generaría un ahorro energético de 1960 [MWh], lo que significaría una reducción de 755 [t] emitidas de CO₂, y un ahorro en costo de energía de 157 kUSD.

7.3. Análisis de Tonelaje de Alimentación

Con los resultados de las simulaciones de uso de revestimiento mediante los modelos anteriores, se puede estimar la diferencia en rendimiento del molino SAG.

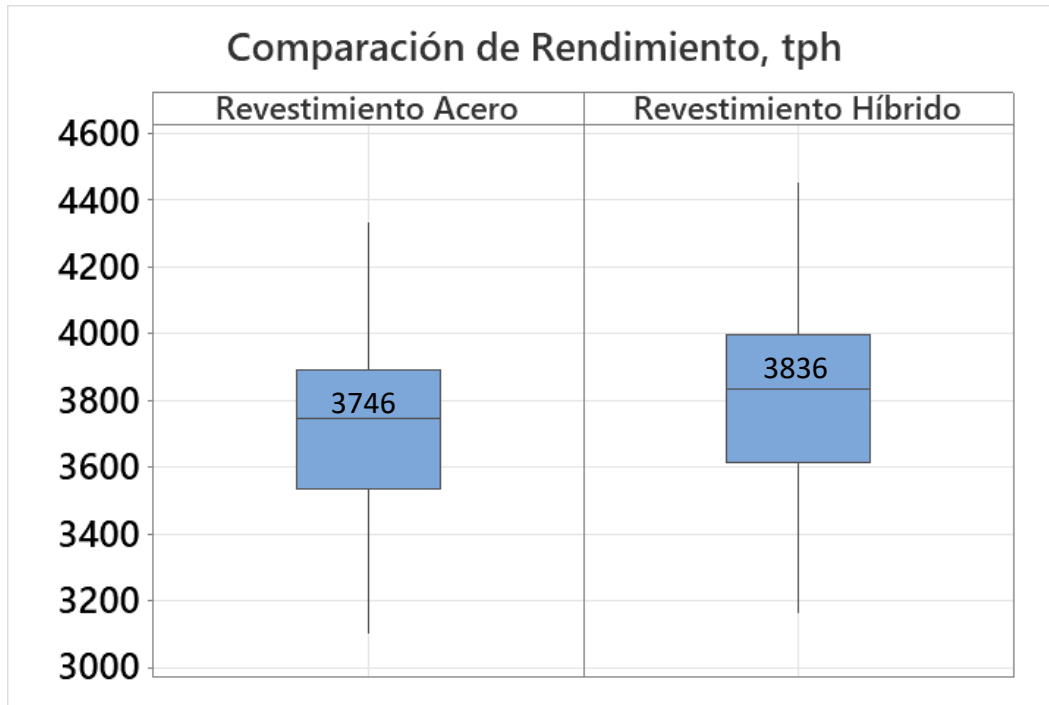


Figura 17: Comparación en Rendimiento del molino SAG con el uso de distintos revestimientos mediante el uso de modelos de Demanda de Potencia y CEE.

Según la distribución de valores mostrada en la Figura 17, en la operación utilizando revestimiento híbrido se puede tener un rendimiento mayor de 90 [t/h]. Realizando los mismos supuestos anteriores de que en una campaña se tratan 14 [MMt], esto resultaría en un aumento de 2,5% de rendimiento, y 336 [kt] por campaña.

Considerando un precio de cobre de 4,3 [US\$/lb], un costo de producción de 1,8 [US\$/lb], una recuperación del 85%, y una ley de 0,6%, el usar revestimiento híbrido en términos de tonelaje resultaría en una ganancia de 9,8 [MMUSD].

7.4. Estimación de reducción de costos por uso de revestimientos híbridos

Uno de los principales problemas que presentan los revestimientos de acero en molinos SAG de gran tamaño corresponde a la inestabilidad en su duración. Por lo que, para la empresa Tega Industries lo principal en sus estudios consiste en generar un revestimiento híbrido que logre eliminar las detenciones no programadas en la operación, generadas por quiebre de revestimiento, o un acelerado desgaste al final del tiempo proyectado de duración.

A pesar del aumento del precio de revestimiento híbrido con respecto a revestimiento de acero fundido, estos revestimientos generan una serie de beneficios, entre ellos la reducción de piezas quebradas en operación, aumento en tiempo de duración, operación a mayor velocidad aumentando su rendimiento, mayor seguridad en la instalación debido a su menor peso y su sistema de apernado por fuera.

Para la estimación de reducción de costos se considerará el rendimiento, el consumo de energía específica, y el precio de compra (2.5 [MMUSD]), los valores aproximados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Cuantificación de beneficios por el uso de revestimiento híbrido.

Categoría	Reducción de costos por uso de revestimiento híbrido [USD]
CEE	157.000
Rendimiento	9.800.000
Precio revestimiento	- 1.000.000
TOTAL	8.643.000

A partir de esto, el ahorro por utilización de revestimiento híbrido por campaña es de 8.643.000 USD.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

En este estudio se desarrollaron modelos de demanda de potencia, de CEE y de rendimiento con el fin de evaluar las ventajas operacionales del uso de revestimiento híbrido de la empresa Tega Industries frente a revestimientos de acero de otras empresas. El tipo de revestimiento se analizó mediante la inclusión de la variable cuantificable de peso del revestimiento en los modelos mencionados.

Desde la revisión de estudios relacionados, no se encontró alguno que incluya al revestimiento del molino SAG en modelos similares como una variable que influya en la operación. Sólo estudios que hablan del desgaste del revestimiento como variable influyente.

En función de la evaluación del tipo de revestimiento como variable única a estudiar, es que se dejó fuera el desgaste de revestimiento considerando sólo los primeros días de operación por campaña, en los cuales se presenta un desgaste uniforme para los distintos tipos de revestimiento estudiados.

Se utilizaron datos de cuatro campañas. Las variables consideradas en los modelos fueron velocidad del molino SAG (N/N_c), el porcentaje de bolas dentro del molino (J_b), el porcentaje de sólidos (C_p), la distribución de tamaño gruesa (+4”), la distribución de tamaño intermedia (-4”+1,25”), el índice de dureza del mineral (A_{xb}), y el peso del revestimiento (P_r).

Los modelos realizados mostraron un ajuste de 89,58% para el caso de la demanda de potencia, y de un 57,31% para el CEE. Con el uso de ambos modelos se logró evaluar los beneficios del uso de revestimiento híbrido de Tega

Industries, pudiendo establecer que el CEE cae un 2,5%, lo que hace que el uso de la potencia sea más eficiente reduciendo las emisiones de CO₂ en 755 [t], y el costo energético en 157 [kUSD] por campaña. Al aumentar la eficiencia se logra un aumento del 2,4% de tonelaje procesado, lo que resulta en una ganancia extra de 9,8 [MMUSD] por campaña.

A modo de comparación se realizó un ajuste de los modelos propuestos por M. Silva y A. Casali [8] con los datos de las 4 campañas, resultando en una disminución en el ajuste de demanda de potencia de 0.13%, y de CEE en 17,7% con respecto a los modelos propuestos en este estudio.

Finalmente, cuantificando el beneficio operacional del uso de revestimiento híbrido de Tega Industries con respecto a revestimientos de acero se tendrá una ganancia de 8.6 [MMUSD] por campaña.

8.2. Recomendaciones

Para un estudio con mayor representatividad se recomienda disponer de información de una campaña en la que el cilindro del molino esté 100% revestido con revestimiento híbrido, para así analizar la influencia real del uso de este tipo de revestimiento.

Referencias

- [1] A. Boylston, «METSO,» 4 diciembre 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.metso.com/blog/mining/how-to-ensure-energy-efficiency-in-mining-part-one/>.
- [2] MolyCop Adesur S.A., octubre 2012. [En línea]. Disponible: <https://docplayer.es/14413866-El-efecto-de-la-trayectoria-de-la-carga-moledora-en-la-eficiencia-de-molienda-por-molycop-adesur-s-a-oct-2012.html>. [Último acceso: 1 Julio 2020].
- [3] J. Sepúlveda y L. Gutierrez, de *Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática*, Santiago, Chile, 1986, pp. 21-95.
- [4] M. S. Powell, N. S. Weerasekara, S. Coleb, R. D. LaRoche y J. Favier, «DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills,» *Minerals Engineering*, vol. 24, nº 3-4, pp. 341-351, 2011.
- [5] WEIR, «Key considerations when selecting a mill lining system,» *Global weir*, 2020.
- [6] R. Martinez Rojas, *Revestimientos Híbridos*, Maintenance Centre of Excellence, BHP, 2019.
- [7] P. Toor, T. Perkins, M. S. Powell y J. Franke, «The Influence of Liner Wear on Milling Efficiency,» Perth, WA, 2011.
- [8] M. Silva y A. Casali, «Modelling SAG milling power and specific energy consumption including the feed percentage of intermediate size particles,» Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [9] FFE MINERALS, «Escondida Project- Chile, S.A. SAG MILL, installation. operation and maintenance manual,» 2001.
- [10] E. Alcala, A. Flores y A. Beltran, «Manual de entrenamiento en concentración de minerales».
- [11] MolyCop, *Curso de molienda de minerales con aplicaciones en ambiente molycop tools*.

- [12] H. J. Heredia Tejada, «Simulación y obtención de parámetros óptimos para la optimización de la operación del molino SAG 36 ft x 26.6 ft de la minera Constancia – Hudbay,» Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Peru, 2016.
- [13] M. Rezaeizadeh, M. Fooladi, M. S. Powell, S. H. Mansouri y N. S. Weerasekara, «A new predictive model of lifter bar wear in mills,» *Minerals Engineering*, vol. 23, pp. 1174-1181, 2010.
- [14] J. M. Arroyo Murrugarra, «Optimización de la eficiencia energética en un molino semi-autógeno mediante el diseño de revestimientos utilizando simulacionales de elementos discretos,» Universidad de Ingeniería y Tecnología, Lima, Perú, 2018.
- [15] M. S. Powell, M. Hilden, A. Mainza y M. Yahyaei, «Full pre-crush to SAG mills - The case for changing this practice,» de *SAG conference*, Vancouver, 2015.
- [16] M. Silva, «Variables operacionales y su influencia en la operación, pro optimización del consumo energético en la molienda SAG,» Universidad de Chile}, Santiago de Chile, 2013.
- [17] Moly-Cop Tools, «Curso de molienda de minerales con aplicaciones en ambiente,» 2018.
- [18] 911 Metallurgist, «Nivel ideal de bolas dentro de molino SAG».
- [19] J. L. Farzaneh Ahmadzadeh, «Application of multi regressive linear model and neural network for wear prediction of grinding mil liners,» *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 4, nº 5, pp. 53-58, 2013.
- [20] D. Connelly, «The Selection Design and Application of Mill Liners for Large Wet Grinding Mills,» de *MetPlant 2013*, Perth, Australia, 2013.
- [21] D. Yancachajlla, «El desarrollo del mine to mill a la actualidad,» Lima, 2018.
- [22] R. Dandotiya, J. Lundberg, A. R. Wijaya y A. Parida, «Evaluation of Abrasive Wear Measurement Devices of Mill Liners,» Division of Operation & Maintenance Engineering Luleå University of Technology.
- [23] M. Powell, I. Smit, P. Radziazewski, P. Cleary, B. Rattray, K. Goran, Eriksson y L. Schaeffer, «The Selection and Design of Mill Liners».

- [24] E. Díaz Villena, «Modelamiento geometalúrgico del consumo de medios de molienda basado en técnicas de caracterización avanzada,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2017.
- [25] J. Urrutia Cantillano, «Desarrollo de un modelo predictivo para estimar la tasa de desgaste en los revestimientos de un molino SAG en función de sus variables operacionales,» Valparaíso, 2018.
- [26] X. Qiu, A. Potapov, M. Song y L. Nordell, «Prediction of Wear of Mill Lifters Using Discrete Element Method,» 2001.