



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

DESARROLLO DE UN MODELO Y SIMULADOR DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO
DE ENERGÍA EN BATERÍAS PARA ESTUDIAR LA SINERGIA ENTRE MOLIENDA SAG Y
LA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN METALURGIA EXTRACTIVA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

GIOVANNI EDUARDO PAMPARANA MANNIS

PROFESOR GUÍA:
WILLY KRACHT GAJARDO

PROFESOR CO - GUÍA:
RODRIGO PALMA BEHNKE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEANDRO VOISIN ARAVENA
JANNIK HAAS

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas y
grado de Magíster en Metalurgia Extractiva
POR: Giovanni Eduardo Pamparana Manns
FECHA: 03/05/2017
PROFESOR GUÍA: Willy Kracht Gajardo

DESARROLLO DE UN MODELO Y SIMULADOR DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS PARA ESTUDIAR LA SINERGIA ENTRE MOLIENDA SAG Y LA GENERACIÓN ELÉCTRICA CON PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Uno de los principales cambios que enfrentan hoy en día las mineras es la reducción de costos sumado a una búsqueda por el aumento de la productividad de sus trabajadores. La etapa de molienda en el procesamiento de minerales de cobre representa casi el 50 % del consumo eléctrico del total de la mina situándolo como un foco de atención en la búsqueda de oportunidades. Sumado a lo anterior, hay una alta concentración de faenas en el Desierto de Atacama, el cual tiene uno de los potenciales solares más grandes del mundo debido a su alta irradiancia.

El presente trabajo tiene como objetivo la exploración de una posible sinergia entre una planta de generación de energía fotovoltaica con un sistema de almacenamiento de energía en baterías con el proceso minero de la molienda semiautógena. Se plantea mediante el desarrollo de un modelo que permita entregar el tamaño óptimo de la planta fotovoltaica junto a su sistema de baterías que se integre de mejor forma al consumo del molino de manera híbrida sin desconectarse de la red eléctrica para obtener el mayor beneficio económico y ambiental con resultados confiables.

Para realizar esto se propone el desarrollo de un modelo de optimización determinista para analizar los distintos efectos que tienen las principales variables del proceso sobre la disminución del consumo de la red eléctrica. Estas variables son la potencia contratada, el tamaño de la planta fotovoltaica y las capacidades de energía y potencia del sistema de almacenamiento de baterías. Para realizar el dimensionamiento de la planta que minimice los costos totales se propone un modelo de optimización estocástico el cual integre la incertidumbre de la generación de energía solar y del mineral derivada de su dureza provocando variaciones en el consumo de potencia del molino.

La integración de la energía fotovoltaica al proceso puede ser fuertemente asistida mediante una administración adecuada de la dureza del mineral como *demand side management*, en donde se aproveche la energía solar durante el día alimentando al molino el mineral duro, y complementando con la energía almacenada en las baterías el consumo del mineral blando durante la noche.

Como resultado de este trabajo se tiene que la potencia contratada tiene un gran efecto sobre las variables, donde la planta fotovoltaica y las baterías están estrechamente relacionadas para la reducción de costos evitando el sobreconsumo respecto a la potencia contratada. El dimensionamiento óptimo logra una reducción de costos totales de 31.8 % anual con respecto a la operación sin energía solar para este caso de estudio. La administración del mineral resulta en una mejor integración mostrando que existe sinergia de la energía solar con esta etapa de la molienda, produciendo mayores ahorros gracias a una necesidad de una menor inversión en baterías mostrando grandes posibilidades para la aplicación de esta tecnología en las minas del futuro.

Como trabajo futuro se propone la integración de los costos de realizar *demand side management* junto al estudio detallado del impacto que la separación de durezas tiene sobre el proceso completo. Además, se propone considerar una aproximación del uso de múltiples tipos de baterías para integrar el efecto de las estaciones del año en la optimización y dimensionamiento.

DEVELOPMENT OF A MODEL AND SIMULATOR OF A BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM TO STUDY THE SINERGY IN BETWEEN THE SAG MILLING AND THE ELECTRIC GENERATION WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS

One of the main changes the mining companies affront is the cost reduction and the pursuit of a rise in the productivity of their workers. The copper grinding process takes account of almost 50 % of the electrical consumption of the whole mine which makes it attractive for new opportunities of cost reduction. Also, there is a big amount of mines located in the Atacama Desert, which has one of the biggest solar potentials due to its high irradiance.

This thesis work has the objective of studying the synergy occurring in between a photovoltaic solar energy plant and a battery energy storage system with the semi-autogenous grinding mills. A model is developed that results in the optimal solar plant and battery design that integrates in the best possible way to the mill's energy consumption without disconnecting it from the energy grid to obtain the best and trustworthy economic and environmental benefit.

It is proposed to develop an deterministic optimization model to first analyze the several effects that have the principal system variables over the grid energy consumption reduction. These variables are the contracted power, solar photovoltaic plant and energy and power capacity of the batteries. For the solar plant and battery sizing, a stochastic optimization model with a one year time horizon is proposed, which integrates the variability and uncertainty of the solar energy generation and mineral hardness which provokes the mill's power consumption variability.

The integration of the solar energy to the process can be strongly assisted through an adequate administration of the mineral hardness as demand side management, taking advantage of the sun hours to feed the hardest and more power demanding rocks and complementing with the battery system the lower power consumption of the softer rocks in the night.

Regarding this work's results, the contracted power has a great effect on the other variables where the photovoltaic plant and battery system are strictly related to avoiding overconsumption penalties. The optimal sizing achieves an anual total cost reduction of 31.8 % over the operation without solar energy for this study case. The mineral administration results in a better integration showing that a synergy in between the solar energy and the grinding process exists, achieving bigger savings due to a lower need of battery investment showing great possibilities for the application of this technology in the mines of the future.

As future work, the integration of the demand side management costs is proposed with a detailed study of the impact that the hardness separation can provoke to the whole process. Also, it is proposed to consider a multi-storage approach to integrate the effect over the yearly seasonality in the optimization and sizing.

Agradecimientos

A mi familia por todo su apoyo y cariño brindado. A mi madre y padre por siempre estar ahí para mi y darme su apoyo y amor infinito a pesar de todo para superar cada obstáculo en mi vida desde muy pequeño, permitiéndome crecer en el hombre que soy hoy en día. Gracias por darme todas las herramientas, libertades y ser guías para estudiar esta carrera de la cual no me arrepiento en lo absoluto.

A Cherezade por acompañarme en todo momento en este camino que empieza a ser la vida. Gracias a ti he logrado superarme cada día más y hacer cosas que ni en sueños hubiera hecho, además de conocer a tu lado lugares increíbles. Siempre estas ahí dándome todo tu apoyo, confianza y fuerza para seguir adelante y así, ir cumpliendo mis sueños de a poco. Gracias por darme los mejores años de mi vida y ser mi mejor compañera, además de hacerme infinitamente feliz. No puedo dejar de lado a Steve, que llena de alegría mi alma. Además agradezco a la familia de Cherezade, por hacerme uno más de ellos y dejarme compartir juntos momentos increíbles.

A mis amigos que estuvieron presentes en esta importante etapa de mi vida. A Gonzalo Pizarro que estuvo siempre a mi lado, ya sea para estudiar, jugar o darme apoyo para seguir adelante. A Cristian Reyes, Carlo Lobiano y Sebastián Rosello por avanzar juntos y apoyarnos en el transcurso de la carrera. A Matías Álvarez, Nicolás Guarda, Vicente Rojas, María Camila Grigaliunas, Valentina Rojas, Javier Pérez, Carola Cerda e Issac Díaz por darme muchísimas alegrías y buenos momentos, y hacer el paso por la carrera como un momento inolvidable. A mis compañeros de oficina Nicolás Urrutia, Javier Merrill, Eduardo Díaz y Paula Martínez por alegrar el ambiente y el día a día.

A mi profesor Willy Kracht quien además de guiarme en este trabajo, me ha ayudado a desarrollarme profesionalmente, dándome muchas oportunidades ya sea en lo académico y laboral. Al profesor Rodrigo Palma por ayudarme a comprender este mundo solar en el que me introduje y apoyarme activamente en el desarrollo de este trabajo. A los miembros de la comisión, profesor Leandro Voisin por darme importantes recomendaciones y aportes al trabajo y a Jannik Haas por su constante apoyo y ayuda a lo largo de toda la investigación, además de recibirme, apoyarme y trabajar conmigo en el intercambio en Alemania.

A los miembros del proyecto de Solar Mining Gustavo Díaz, Simón Moreno, profesor Roberto Román, profesor Ludger Eltrop y Dimitrij Chudinzow, quienes me ayudaron constantemente en el desarrollo del trabajo y me dieron financiamiento.

Al Departamento de Ingeniería de Minas quienes me formaron como profesional. Especial agradecimiento a Nicole Cid por su constante apoyo y ayuda incondicional a lo largo de toda la carrera.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Presentación del tema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances del trabajo	3
1.4. Estructura de la tesis	3
2. Antecedentes	5
2.1. Tecnologías solares y sus posibles aplicaciones en la minería	6
2.1.1. Agua en minería	6
2.1.2. Calentamiento de electrolitos y otros fluidos	7
2.1.3. Oportunidades en fundiciones	9
2.1.4. Utilización de la superficie disponible	10
2.1.5. Paneles solares fotovoltaicos: uso de electricidad en la minería	12
2.2. Sistema de almacenamiento de energía en baterías	13
2.2.1. Paneles solares con implementación de baterías BESS	15
2.3. Análisis de datos	16
2.3.1. Datos reales del molino SAG	16
2.3.2. Estadísticas básicas	16
2.4. Datos planta fotovoltaica	19
2.5. Análisis metalúrgico	20
2.5.1. Chancado	25
2.5.2. Molienda	27
3. Desarrollo del modelo determinista	31
3.1. Planteamiento del modelo	32
3.1.1. Función objetivo	33
3.1.2. Restricciones del balance de energía del sistema	34
3.1.3. Restricción de la máxima potencia importada	35
3.1.4. Restricciones del balance de energía en el BESS	35
3.1.5. Restricción de carga y descarga del BESS	36
3.1.6. Restricción del contador de ciclos de carga-descarga del BESS	37
3.1.7. Límites inferiores y superiores de las variables de decisión	37
3.1.8. Descripción de los parámetros y variables	38
3.2. Planteamiento matricial del problema de optimización	39
3.3. Preparación de datos	40

3.3.1.	Generación del día tipo	40
3.3.2.	Estandarización temporal de los datos	41
3.4.	Programación del modelo	42
3.5.	Resultados del modelo determinista	43
3.5.1.	Casos de estudio	43
3.5.2.	Caso base	45
3.5.3.	Resultados Macro caso 1	45
3.5.4.	Resultados Macro caso 2	50
3.5.5.	Impacto del DSM	55
3.5.6.	Resumen de resultados	56
4.	Desarrollo del modelo estocástico	57
4.1.	Modelamiento de la estocasticidad solar	57
4.2.	Modelamiento de la estocasticidad del mineral	61
4.3.	Modelo de optimización estocástico	63
4.3.1.	Función objetivo	63
4.3.2.	Restricciones de la planta fotovoltaica	65
4.3.3.	Restricciones del BESS	65
4.3.4.	Balance de energía	66
4.3.5.	Balance de masa: restricciones de los <i>stockpiles</i>	67
4.3.6.	Descripción de los parámetros y variables	68
4.4.	Casos de estudio	70
4.4.1.	Parámetros del modelo	71
4.5.	Resultados	72
4.5.1.	Validación de los años solares generados	72
4.5.2.	Resultados modelo de optimización estocástica	75
5.	Conclusiones	81
5.1.	Conclusiones generales	81
5.2.	Recomendaciones para trabajos futuros	83
	Bibliografía	84
6.	Anexos	91
6.1.	Artículos científicos confeccionados en el transcurso de la tesis	91
6.1.1.	Artículo de conferencia Enermin 2016	91
6.1.2.	Artículo de revista Journal of Cleaner Production	102

Índice de Tablas

2.1. Estadísticas básicas para los tres molinos SAG.	17
2.2. Coeficientes de correlación para los distintos molinos SAG.	19
3.1. Variables de decisión utilizadas en el modelo.	38
3.2. Parámetros utilizados en el modelo.	39
3.3. Notaciones usadas para describir los casos de estudio.	43
3.4. Definición de los casos en el MC 1.	44
3.5. Definición de los casos en el MC 2.	45
3.6. Resumen de resultados optimización determinista.	56
4.1. Rangos utilizados para la clasificación de días solares.	58
4.2. Número de transiciones de un tipo de día a otro.	60
4.3. Matriz de probabilidades acumuladas para las transiciones.	60
4.4. Ejemplo de clasificación de días generados.	60
4.5. Ejemplo de asignación de datos a días generados.	61
4.6. Variables utilizadas en el modelo estocástico.	69
4.7. Parámetros utilizados en el modelo estocástico.	70
4.8. Comparación de estadísticas de los años generados a partir de Cadenas de Markov con los reales.	73
4.9. Comparación de cantidad de tipos de días de datos generados con el promedio de los reales, parte 1.	74
4.10. Comparación de cantidad de tipos de días de datos generados con el promedio de los reales, parte 2.	75

Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema de un sistema fotovoltaico típico.	16
2.2.	Gráfico de potencia consumida por SAG 1 contra TPH.	17
2.3.	Gráfico de potencia consumida por SAG 2 contra TPH.	18
2.4.	Gráfico de potencia consumida por SAG 3 contra TPH.	18
2.5.	Gráfico de tiempo de molienda según dureza del mineral y granulometría.	21
2.6.	Gráfico de consumo específico de energía de molinos SAG en función del índice de trabajo de Bond para distintas concentradoras de Chile.	22
2.7.	Gráfico de consumo específico de energía de varias operaciones unitarias en Chile.	22
2.8.	Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje del molino SAG 1.	23
2.9.	Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje del molino SAG 2.	24
2.10.	Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje del molino SAG 3.	24
2.11.	Gráfico de potencia consumida por los tres molinos SAG agregados contra TPH total de la planta pasante.	25
2.12.	Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje para los tres molinos SAG agregados.	26
2.13.	Demanda de potencia de un molino semiautógeno en función del llenado (J) para distintos niveles de carga de bolas (J_B).	27
2.14.	Gráfico de estabilidad de la toma de potencia del molino según el flujo de alimentación.	28
2.15.	Circuito SAG SABC-B tomado como referencia para este análisis.	29
3.1.	Sistema a ser modelado.	31
3.2.	Esquema de simplificación del sistema.	32
3.3.	Potencia comprada con y sin la planta FV y BESS.	46
3.4.	Costo operacional según la disponibilidad de energía FV.	47
3.5.	Operación del molino SAG, consumos con y sin DSM.	48
3.6.	Costo operacional según la variación de la capacidad de potencia contratada.	48
3.7.	Costo operacional según la variación de la capacidad energética del BESS a gran escala.	49
3.8.	Costo operacional según la variación de la capacidad energética del BESS a pequeña escala.	50
3.9.	Costo operacional según la variación de la capacidad de potencia del BESS.	51
3.10.	Costo total de operar los molinos SAG como función de la disponibilidad de energía FV sin DSM, considerando el máximo consumo actual (~ 42 MW) y con un consumo máximo durante el día de 30 MW y 35 MW.	52
3.11.	Costo total de operar los molinos SAG como función de la variación de la capacidad de potencia contratada.	53

3.12. Costo total de operar los molinos SAG como función de la variación de la capacidad energética del BESS.	54
3.13. Costo total de operar los molinos SAG como función de la variación de la capacidad de potencia del BESS.	55
4.1. Histograma de la frecuencia de las distintas fracciones del máximo solar diario. . .	59
4.2. Distribución de dureza para cada UGM.	62
4.3. Gráfico para los costos por eficiencia de la batería.	66
4.4. Esquema de resumen del modelo estocástico y los casos estudiados.	71
4.5. Comportamiento de las variables del modelo estocástico de dos días de operación. .	76
4.6. Resultados caso 1 modelo estocástico.	77
4.7. <i>Demand Side Management</i> como administración del mineral.	79
4.8. Resultados caso 2 y 3 modelo estocástico.	80

Capítulo 1

Introducción

1.1. Presentación del tema

Las mineras hoy en día se enfrentan a una baja del precio del cobre lo cual está afectando fuertemente en la manera de operar sus faenas. Los principales cambios que comienzan a enfrentar es la reducción de costos, de tal manera de mantener márgenes de ganancia necesarias para la continuación de la operación. Los principales focos que salen a la luz son los insumos que producen un mayor costo, uno de ellos es la energía eléctrica. Por este motivo sumado a una mayor preocupación por el medio ambiente y la contaminación, algunas mineras han optado en invertir en generación de energías renovables tales como la energía solar y eólica. Sobre todo, la energía solar posee un gran potencial solar en el Desierto de Atacama al norte de Chile, haciendo atractiva esta solución a la reducción de consumo de la red eléctrica del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING).

Frente a lo anterior, es interesante estudiar y analizar el comportamiento y consumo de un molino SAG (Molienda Semiautógena). Este en conjunto al resto de los procesos de conminución, son responsables de casi el 50 % del consumo energético total de la minera. Por esto, una posible alternativa de reducir utilizando energías renovables el consumo de la red de parte del molino SAG es integrar un sistema de generación de energía fotovoltaica utilizando un sistema de baterías BESS (*Battery Energy Storage System*).

Este trabajo va a explorar una posible sinergia que ocurre al integrar este sistema por completo sin desconectar el molino SAG de la red, es decir, supliendo de manera adecuada la energía y utilizando de manera óptima la batería y la energía solar. Para realizar esto se va a desarrollar un modelo de optimización lineal entero mixto que minimice los costos de operación asociados a los consumos energéticos.

Para poder utilizar de mejor manera la energía solar, se hace necesario que los mayores consumos se encuentren en el día mientras que los menores consumos se encuentren en la noche, en donde no hay generación de energía solar. El molino SAG es altamente variable en cuanto a su consumo a lo largo del día. A pesar de que la alimentación de roca al molino se mantenga estable, existen variaciones que son producidas por otros factores, como, por ejemplo, la dureza del mineral. Por esto se va a estudiar el efecto de administrar la dureza del mineral para alimentar el mineral más duro de día y presentar mayores consumos para aprovechar mejor la energía solar, y alimentar los minerales más blandos de noche de manera de utilizar una menor cantidad de energía de la red mientras no hay generación. Este comportamiento de alimentación también se va a integrar dentro

del modelo como *Demand Side Management* (DSM) permitiendo ver las diferencias entre realizar o no una administración de los consumos. Todo esto se integrará dentro de un simulador que permite manejar las variables para realizar de esta manera estudios de sensibilidad y factibilidad económica.

Debido a que hay incertidumbre en la generación de energía solar y la extracción, caracterización y alimentación del mineral, es necesario modelar la estocasticidad para contar con una aproximación más robusta del modelo a desarrollar. Esto permite describir la incertidumbre (intervalos de confianza) como también encontrar soluciones robustas frente a errores de pronóstico.

Los resultados de este estudio permitirán conocer la existencia de una sinergia entre un sistema solar y una operación minera, integrando las principales fuentes de incertidumbre. Además, serán importantes para futuras investigaciones y desarrollos que incorporen la energía solar en instalaciones mineras, logrando una correcta disminución de costos y emisiones. Esto generaría una línea de acción para el desarrollo de la minería del futuro, las cuales tendrían una correcta incorporación de energías renovables a los procesos integrándolas de manera óptima y segura financieramente, productivamente y ambientalmente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de la tesis es desarrollar un modelo que permita entregar en base a un consumo energético de un molino SAG, el sistema fotovoltaico con almacenamiento de energía con alimentación desde la energía fotovoltaica y de la red eléctrica para obtener el mayor beneficio económico y ambiental en alguna localidad dada del Desierto de Atacama con resultados óptimos y confiables.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar, analizar y modelar el comportamiento energético de un molino SAG en base a datos reales integrado a este la generación energética de un sistema fotovoltaico y la utilización de un sistema de almacenamiento de energía con baterías (BESS).
- Modelar la administración de consumo en base al manejo de mineral blando y duro alimentado desde la mina.
- Realizar simulaciones en base al modelo desarrollado para estudiar la factibilidad económica de la operación del molino SAG utilizando un BESS alimentado por un sistema de energía fotovoltaica y respaldo de la red.
- Explorar una posible sinergia entre la disminución del consumo eléctrico sobre un cierto límite, la generación de energía solar y un sistema de almacenamiento.
- Cuantificar la incertidumbre del proceso minero y generación fotovoltaica en el modelo de simulación formulando de manera eficiente la estocasticidad en problemas de optimización en los procesos del sistema estudiados.

1.3. Alcances del trabajo

El presente trabajo va a explorar una posible sinergia que podría ocurrir al integrar la generación de energía fotovoltaica en conjunto a una BESS para disminuir o controlar el consumo.

Una primera aproximación determinista va a modelar tres molinos SAG en conjunto sin desconectar este de la red eléctrica en un periodo de tiempo de un día con resolución temporal de 15 minutos. Se va a desarrollar un simulador en lenguaje MATLAB[®] que realice esta integración y permita estudiar diversos casos y sensibilidades sobre el tamaño de la planta fotovoltaica y el BESS junto a la potencia contratada, obteniendo a la vez, la mejor integración basada en costos energéticos y de inversión de la planta fotovoltaica y BESS. Este estudio va a considerar solo el análisis del consumo directo como día tipo de tres molinos sin considerar los consumos del resto de la planta. A la vez, va a considerar para estos efectos que es el único consumidor de energía de la planta en cuanto a lo que se refleja en la potencia contratada utilizada y en sus costos asociados.

Una segunda aproximación es modelar mediante una optimización estocástica la variabilidad de la generación de energía solar en conjunto a la variabilidad de la roca descrita por su dureza. Este estudio se desarrollará en el lenguaje del programa GAMS bajo una optimización lineal el cual permitiría dimensionar la planta fotovoltaica junto al BESS considerando a la vez diversos escenarios posibles.

Con este trabajo se quiere dar a conocer diversas posibilidades de integración de la energía solar en los procesos mineros que podrían resultar como base para futuros trabajos de investigación y desarrollo para establecer las líneas de acción del diseño de la minería del futuro.

1.4. Estructura de la tesis

Para el desarrollo de este estudio fue necesario plantear un modelo de diversas formas, en donde uno se considera la evolución del anterior. Debido a esto se tienen varios resultados. Se decidió estructurar la tesis como un avance en el mejoramiento del modelo, mostrando al mismo tiempo de la enunciación de un modelo su estructura, planteamiento y resultados.

En resumen la tesis fue escrita con la siguiente estructura:

1. Se comienza la exploración de los antecedentes del problema iniciando con un estudio sobre las tecnologías solares y sus posibles aplicaciones a los diversos procesos mineros para terminar con una explicación de los paneles solares fotovoltaicos y baterías BESS en más detalle. Se continúa con un análisis de los datos reales de la operación del molino SAG para conocer su comportamiento y variabilidad en el tiempo. Junto a esto se realiza un análisis teórico cualitativo sobre los posibles efectos de variaciones del mineral y sus características sobre las operaciones de reducción de tamaño.
2. El siguiente paso es la definición del modelo determinista. Se consideran dos macro casos de este modelo con variaciones en el enfoque del cálculo de ciclos. Sumado a los anterior, cada macro caso contiene dos sub-modelos los cuales corresponden a la consideración o no del DSM.

3. Para el desarrollo del modelo determinista se comienza con el planteamiento en ecuaciones del modelo y del problema de optimización y su programación. Junto a esto se muestra la preparación a la que están sujetos los datos y la generación de un día tipo representativo de la operación de la potencia consumida y la energía solar FV generada. Luego se presentan los resultados de ambos macro casos.
4. Se realiza un segundo modelo el cual corresponde a una formulación estocástica basado en el modelo determinista planteado. Se comienza con la definición de los modelos de generación de datos aleatorios para las variables estocásticas correspondientes a la energía fotovoltaica y la dureza del mineral. Se continúa con el planteamiento en ecuaciones del modelo para luego definir los casos de estudio y presentar los resultados obtenidos.
5. Para terminar este trabajo se presentan las conclusiones y recomendaciones para la continuación de este estudio.

Capítulo 2

Antecedentes

La minería le ha abierto a Chile un mundo de posibilidades con sus infinitas bondades y oportunidades, las cuales han sido explotadas desde hace ya muchos años. A pesar de esto, no se ha visto un camino fácil, en donde se ha visto la necesidad de superar una serie de obstáculos, en donde uno de los más importantes, ha sido con respecto a temas de sustentabilidad de las operaciones.

Consumo de agua, electricidad, combustible, residuos, huella de carbono. Todos estos son temas de constante preocupación de las empresas mineras. En estos últimos tiempos estas se han visto amenazadas por factores como la baja del precio de cobre y las altas tarifas energéticas, sumado a la gran deficiencia de agua en las zonas centro y norte de Chile [1].

Lo anterior ha llevado a la industria a comenzar a preocuparse e interesarse por métodos alternativos de generación de energía y de agua, tales como la desalinización de agua de mar por osmosis inversa y la generación de energía mediante energía solar, realizándose con ello una serie de inversiones importantes [2].

Dos ejemplos conocidos de estos son el caso de la desalinizadora de Caleta Coloso de Minera Escondida y la planta solar de Minera Collahuasi en Pozo Almonte.

La primera es una gran planta desalinizadora de osmosis inversa la cual procesa y entrega al sistema 525 l/s de agua desalinizada. Esta es bombeada hacia la mina para ser utilizada en todos sus procesos. Actualmente se está realizando la construcción de una nueva planta que debería ser capaz de procesar y entregar al sistema 2500 l/s [3].

La segunda es una planta de energía solar fotovoltaica. Con esta se generan 60.000 MWh/año mediante paneles solares, con una potencia instalada de 25 MWp¹. La generación mediante paneles solares tiene una gran implicancia que es la baja eficiencia energética y la necesidad de utilizar grandes áreas para ser cubiertas por estos paneles. Collahuasi utiliza 80 ha para la instalación de los paneles solares, lo que corresponde a 3.2 ha por MW instalado [5].

Frente a este panorama se propuso generar ideas sobre posibles aplicaciones e integraciones de la energía solar en los procesos mineros.

¹MWp (*megawatt peak*) o megavatio punta se refiere a la máxima generación solar fotovoltaica posible bajo condiciones estándar de 25°C y una irradiación de 1000 W/m² [4]

2.1. Tecnologías solares y sus posibles aplicaciones en la minería

2.1.1. Agua en minería

Una de las primeras ideas que se producen al pensar en la integración de la energía solar en los procesos mineros en general, es la de poder suplir uno de los grandes déficit que se están produciendo hoy en día en las distintas faenas, la disponibilidad de agua dulce para sus procesos.

Muchos de los procesos en la minería no admiten la utilización de agua salada, limitando en gran medida la fuente que se tiene de agua, ya que en la zona norte de Chile, esta agua dulce se destina principalmente a uso urbano debido a su escasez. Por esta misma razón es que hoy en día, muchas mineras que tienen acceso cercano al mar, desalinizan agua salada para poder tener a su disposición agua desalinizada para sus procesos [6].

Las principales vías para realizar esta desalinización son mediante osmosis inversa, proceso que es intensivo en el uso de energía. Esta proviene del sistema eléctrico o generado con combustibles fósiles, pero mayor aun, un gran consumo e importante gasto en membranas para realizar este proceso.

Hay diversas formas de realizar la destilación del agua de mar utilizando energía solar. Uno de los métodos más probados para realizar esto es mediante la concentración de energía solar. Dentro de este ámbito, son dos las tecnologías que se están situando fuertemente en el mercado. Estas son las Centrales de Cilindro Parabólico (CCP) y las plantas con motores Fresnel, donde la primera es la que tiene mayor fuerza dominio del mercado. Estas plantas son diseñadas para la generación de energía mediante vapor, pero se propone la utilización posterior del vapor en su aprovechamiento como agua dulce.

Centrales de cilindro parabólico

Las CCP son plantas de concentración de energía solar las cuales funcionan mediante colectores heliostatos (espejos) que focalizan la energía, ya sea en un punto o un foco lineal. En el caso de los CCP, consisten en cilindros de espejos que concentran la energía en una línea recta de largo variable en 600 a 800 metros. Dentro de esta línea se encuentra un fluido caloportador, el cual puede ser agua o algún fluido orgánico sintético. Usualmente se utiliza un fluido orgánico llamado HTF (*heat transfer fluid*) debido a que se puede manipular mejor el fluido y no hay problemas con la evaporación como con el agua [7].

El HTF usualmente consiste en una mezcla eutéctica de 26.5 % de óxido de difenilo y 73.5 % de bifenilo. Se va a trabajar con temperaturas de 290°C de entrada y 390°C de salida, donde el límite son los 400°C debido a sus características químicas del HTF en cuanto a la degradación y producción de hidrocarburos volátiles y pesados que cambian el comportamiento de la planta.

El calor absorbido por el HTF es transferido a un circuito de agua presurizada a 50-100 bar para generar vapor sobrecalentado a 380°C. Este vapor es pasado por una turbina de vapor la cual va a transformar la energía potencial del vapor en energía mecánica rotativa con un rendimiento del

27 % al 40 % dependiendo de la carga de la planta. El vapor a la salida tiene una temperatura inferior a 50°C y su presión absoluta es de 0.05 a 0.08 bar. Esta agua con caudal aproximado de 54 kg/s se puede condensar.

Normalmente esta agua condensa y luego se presuriza y se utiliza nuevamente para cerrar el circuito de ciclo, pero en este punto se propone la utilización de esta agua desmineralizada para enviarla a la planta.

Aunque no es de gran capacidad, a diferencia de la planta de escondida, 54 kg/s de agua desmineralizada puede ser un aporte importante para distintas mineras, en donde el agua es realmente escasa. Todo aporte es valioso, en especial si en su transcurso se genera energía. Esta podría ser utilizada para bombear esta misma agua al nivel de la mina, por ejemplo.

Un tema importante en este punto es que, para condensar el vapor, es necesario extraer una gran cantidad de calor latente de este (aproximadamente 2.418 KJ por kg de vapor que se necesita condensar). Acá también se generan posibilidades en cuanto a la calefacción de líquidos utilizados en la minería como se va a proponer más adelante.

Concentradores lineales Fresnel

Mediante la concentración de energía, al igual que en la CCP en una línea, se utilizan espejos planos simulando uno curvo por variación de ángulo ajustable de cada fila individual de espejos. Esto implica que la materia prima de este concentrador es más barata que si se utilizaran espejos curvos, perdiendo solo un 15 % de eficiencia en comparación a la competencia. Sumado a una simplificación en la construcción y funcionamiento hacen que los costos totales sean un tercio menores aproximadamente, haciéndose más atractivos que la pérdida de eficiencia [7].

La relación de concentración de este tipo de plantas es menor que en las CCP, es decir, se logran menores temperaturas en los concentradores Fresnel.

Dentro del tubo colector de energía se circula agua, la cual llega a los 270°C volviéndose en vapor que sale a la vez a unos 55 bar de presión, reduciéndose luego a 33 bar en un tanque de acumulación de vapor.

En comparación con las plantas CCP, estas requieren aproximadamente 2 ha por MW instalado, mientras que con las Fresnel se puede lograr tener la razón de 1.2 ha por MW instalado.

2.1.2. Calentamiento de electrolitos y otros fluidos

La energía generada por los equipos debe ser almacenada de alguna manera si no se planea utilizar de manera inmediata. Esto motiva a buscar formas de almacenar el calor generado por los sistemas mencionados anteriormente para su futura utilización en, ya sea las mismas máquinas en momentos que falte radiación o en las noches mismas en donde la generación proveniente del sol se hace nula.

Una de las maneras más atractivas de almacenamiento de energía en forma de calor es utilizando sales fundidas. Con la aislación correspondientes son capaces de almacenar grandes cantidades de

energía para ser transferidas luego a otros procesos que lo necesite.

Los concentradores solares CCP tienen la facilidad de poder implementar almacenamiento en sales fundidas. Esto puede ser posible mediante el intercambio de calor del HTF a las sales fundidas, para luego entregarles el calor cuando sea necesario al agua para evaporarla.

Además, el almacenamiento térmico puede ser utilizado para una serie de soluciones en cuanto al calentamiento de fluidos utilizados en la minería, como el electrolito o las soluciones lixiviantes. Esto será tratado más adelante.

Usualmente las sales fundidas que se utilizan son una mezcla de nitratos de sodio y potasio en una relación en peso de 60%/40%. Esta mezcla se funde a 220°C correspondiente al límite inferior en el cual puede trabajar el sistema, debido a que a esa temperatura ocurre la solidificación de las sales.

Esta tecnología se trabaja mediante el uso de dos estanques interconectados generalmente cuando se utiliza con concentradores solares. Se tiene un estanque “frío”, que almacena sales a una temperatura de 230°C a 280°C. Estos al calentarse mediante intercambiadores de calor con, por ejemplo, un fluido HTF, pasan al estanque “caliente”, almacenando sales a 380°C recirculándolos al estanque frío para transferir calor hacia este. Una vez que el estanque frío llega a la temperatura del estanque caliente, el ciclo se termina manteniendo la temperatura hasta que llegue el momento de utilizarlas [8].

Los estanques son generalmente de 40 m de diámetro y 16 m de alto, con un volumen aproximado de 20.000 m³. Del total se llenan solo 16.000 m³ [7].

Gracias a esta tecnología se podría utilizar el calor obtenido durante el día para los procesos que continúan funcionando de noche, de esta manera continuar con la generación de energía y/o calentamiento de soluciones.

La energía térmica se puede utilizar ya sea para producir energía y desalinizar agua, como fue mencionado anteriormente, o también para calentar ciertas soluciones. Para el caso de la minería se tienen dos soluciones, además del agua, en las cuales se hace necesario utilizar a temperaturas más elevadas que la ambiente. Estas son el electrolito y la solución lixiviante del proceso en conjunto LX-SX-EW (lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención).

Se tiene que el electrolito en un primer caso, es necesario calentarlo hasta los 47-50°C para su correcto funcionamiento en las celdas de electro-obtención. El ser capaz de proveer calor constante a este electrolito es de vital importancia para la operación, ya que de esta manera, se puede disminuir los flujos de estos, manteniendo más tiempo por ende la solución en la celda, y aumentando la deposición del cobre en solución [9] [10].

Sumado a esto, se tiene que se necesita ocupar agua caliente para el despegue y lavado de los cátodos. Esta debe estar a aproximadamente 75°C para funcionar correctamente con el proceso, haciéndolo demandante de energía para calentar el agua a esa temperatura [11].

Además, en la primera parte del proceso correspondiente a la lixiviación, se tiene una dependencia de la temperatura en donde la velocidad de lixiviación va a ser función de esta [12]. La biolixivia-

ción corresponde a la lixiviación usualmente de sulfuros de baja ley utilizando elementos biológicos como bacterias para acelerar el proceso. Esta dura alrededor de 1 año en concretarse. Se ha visto que a una mayor temperatura, las bacterias funcionan de mejor manera acelerando la digestión de estas y, por ende, aumentando la cinética de lixiviación presente en la pila [13]. Por esto mismo se hace importante tener un control de temperatura del proceso para que, de esta manera, se acelere la lixiviación. Para lograr esto, se riega usualmente las pilas con una solución lixivante a alrededor de 35°C.

Estas tres soluciones pueden ser calentadas fácilmente utilizando alguna tecnología que provea energía solar térmica.

Una forma podría ser utilizando concentradores solares Fresnel y CCP, pero se ha visto que utilizando concentradores solares de tipo placa plana, la cobertura solar, es decir, el nivel de reemplazo de la energía convencional con la solar, puede llegar a ser de 85 % a incluso 95 % en el mejor de los casos gracias a la posible variación del ángulo de inclinación de los colectores. Esto es utilizando sistemas de almacenamiento de energía térmica e intercambiadores de calor para proveer calor a la solución. De esta manera se puede proveer las 24 horas al día calor a la planta. Sumado a esto, los colectores de placa plana funcionan a menor temperatura, haciéndolos ideales para poder mantener un buen control sobre la temperatura del proceso.

Es importante reafirmar que no se debe realizar un reemplazo completo del circuito eléctrico debido a que no es posible entregar siempre energía solar térmica. Por ejemplo, en días nublados en donde la radiación disminuye considerablemente.

De todas maneras, es una muy buena aplicación ya que se podría cubrir un 8 % del total de la energía que consume el proceso de LX-SX-EW, el cual, a su vez, corresponde al 27 % de la energía eléctrica total de una mina en promedio [11] [14].

Se tiene un ejemplo de esta aplicación en donde la Minera Gabriela Mistral de CODELCO reemplazó un 80 % de la energía generada desde combustibles fósiles por energía solar térmica.

2.1.3. Oportunidades en fundiciones

Realizando concentración de energía solar en torres de concentración, se pueden lograr obtener temperaturas de sobre 1500°C, superiores al punto de fusión del cobre correspondiente a 1085°C.

Esto abre paso a posibles aplicaciones en las fundiciones de cobre en donde se opera a variadas temperaturas para cumplir sus objetivos en los distintos procesos dentro de esta operación.

Algunos ejemplos de temperaturas estándar de operación son en tostación de 600°C a 750°C y en el proceso general de fundición de 1100°C a 1300°C [15]. En estos procesos se puede integrar como forma de proporcionar calor al sistema o en el reemplazo de combustibles fósiles utilizados.

A pesar de que los procesos de fundición de cobre son semi-autógenos en cuanto a la generación de energía necesaria para mantener la temperatura de funcionamiento, debido al comportamiento exotérmico de la reacción del azufre contenido en el mineral (especialmente de la pirita), es necesario entregarle al sistema energía en caso de que haya un déficit, pero más importante aún, entregar la

energía necesaria para hacer funcionar el reactor. La partida de un reactor es altamente demandante en energía eléctrica y combustible debido a la necesidad de llevar el material a la temperatura de funcionamiento. Con respecto a esto, hay una gran oportunidad de utilizar la energía solar térmica para entregarle calor al sistema.

Además, cabe mencionar que hay hornos, como los de limpieza de escorias, que funcionan con energía eléctrica, sumado a ciertos equipos adjuntos a los reactores. Un ejemplo son los equipos que están encargados de realizar la limpieza de los gases de proceso. En estos equipos se podría utilizar energía proveniente del sol para suplir el consumo desde el sistema interconectado.

En Chile, del total de energía consumida por la minería, las fundiciones son responsables del consumo de un 10 % de ese total. Considerando que son siete las fundiciones de cobre en Chile, este muestra la gran cantidad de energía necesaria para poder hacer funcionar este proceso.

2.1.4. Utilización de la superficie disponible

La minería, al ubicarse normalmente en zonas desérticas y desoladas, tiene una gran superficie disponible para poder realizar sus tareas de manera holgada en espacio.

A pesar de esto, muchas veces hay planes y lugares que van a ser destinados para otros usos, lugares que son abandonados como botaderos e incluso, ubicarse en lugares donde el espacio disponible no es vasto, tal como lo son las minas de zonas del centro de Chile (no ubicadas en el desierto).

Por esto mismo es que se hace de vital importancia reutilizar las superficies disponibles que son tratadas como “muertas”, en el sentido que son utilizados como botaderos y quedan aparentemente inutilizables.

Este es el caso de los botaderos de ripios de las minas, las pilas de lixiviación y los tranques de relave, por ejemplo. Todos estos casos utilizan grandes superficies destinadas a ningún otro uso.

Pilas de lixiviación

En una primera instancia, las pilas de lixiviación utilizan una gran cantidad de área la cual permanece inmóvil en las pilas estáticas destinadas a biolixiviación. La biolixiviación de los sulfuros de baja ley puede tardar hasta más de un año en concretarse por lo que se puede utilizar, en un principio, esa área para instalar paneles solares o concentradores solares, y al mismo tiempo, distribuirlos de cierta manera para tapar las pilas y así aumentar la temperatura de ellas cuando se necesite. Como se mencionó antes, la cinética de la biolixiviación depende de la temperatura en que ocurre el proceso. Se ha visto a escala de laboratorio que temperaturas sobre 50°C son ideales para el funcionamiento de estas [13]. Además de servir como incremento de temperatura, se podría considerar la formación de una especie de efecto invernadero, en donde se atrapa la evaporación que se genera en las pilas recuperando esta solución para ser reutilizada.

La energía generada por el cubrimiento de estas pilas, ya sea vía térmica o fotovoltaica, puede ser utilizada localmente en aireadores para las pilas. De esta manera se logra aumentar también la

cinética de lixiviación, el cual es un parámetro importante a considerar.

Botaderos de ripios

En el caso de los botaderos de ripios, son lugares que son literalmente abandonados una vez llegan a la altura determinada. Este espacio e inclinación se puede utilizar para instalar paneles fotovoltaicos o concentradores solares de tal manera de aprovechar el espacio y área disponible. En este caso no es de interés el de utilizar la energía localmente y/o aumentar la temperatura del lugar, por lo que no habría otra aplicación y uso del espacio en este caso.

Tranques de relaves

Para los tranques de relave, el análisis es distinto. Estas son vastas superficies sin inclinación que contienen un bien muypreciado para las mineras, el agua.

Son superficies disponibles de gran tamaño. Por ejemplo, en el caso de la planta Las Tórtolas de la Minera los Bronces de Anglo American, este tiene un tranque de relaves de aproximadamente 1100 ha, mientras que Laguna Seca, el tranque de relaves de Minera Escondida, cubre aproximadamente 5500 ha².

Los relaves que se depositan en estos tranques tienen un alto contenido de agua, a pesar de que esta es recuperada previamente por espesadores y filtros en una primera instancia. En el tranque se espera poder recuperar el agua que aflora a la superficie luego de que terminan de decantar los sólidos. Dentro de este ámbito, se enfrentan a un gran problema en cuando a la evaporación que ocurre en los tranques. Se ha visto tasas de evaporación promedio de aproximadamente 10 L/m²/día [16], lo cual es bastante considerando los serios problemas de agua que existen hoy en día.

Esto lleva a pensar en cómo poder aprovechar y evitar la pérdida de esta evaporación en los tranques. Unas de las ideas que surge al analizar la situación es el tapar estos tranques con algo, como alguna cubierta plástica, por ejemplo. A la vez, esta se podría tapar con paneles solares o una estructura de ellos para aprovechar el área.

Otra idea es la de construir domos que permitan lograr un efecto de invernadero, acelerando la evaporación y a la vez, lograr una recuperación más rápida de esta agua. Probablemente, el agua recuperada contenga una menor cantidad de reactivos por lo que se podría destinar de mejor manera.

También podría ser la posibilidad de utilizar balsas con paneles solares o concentradores de energía flotantes que cubran la superficie disponible, haciéndolo además dinámico en el uso de superficie. Estos se pueden adaptar fácilmente a los frecuentes cambios de nivel que tienen los tranques provocando por esto, cambios drásticos en la superficie disponible.

²Aproximación de superficies medidas utilizando la herramienta Google Earth®

Correas transportadoras

Las correas transportadoras están diseñadas para poder mover de forma rápida y sencilla el mineral, pero generan un problema con el polvo [17].

Para resolver este problema, se hicieron cúpulas para actuar como techo a lo largo de estas correas. De esta manera el techo capta el polvo generado evitando problemas ambientales, de seguridad y salud de los trabajadores.

El techo de estas correas presenta una superficie utilizable para instalar paneles solares. Estos paneles pueden ser de gran utilidad para entregar de forma local parte de la energía necesaria para el funcionamiento de las correas, por ejemplo.

Uno de los puntos en contra en esta implementación es la posibilidad de que el sistema para atrapar el polvo no sea efectivo e interfiera en la producción de energía cubriendo con polvo los paneles fotovoltaicos.

2.1.5. Paneles solares fotovoltaicos: uso de electricidad en la minería

Otro sector de la energía solar es lo correspondiente a la energía solar fotovoltaica. Utilizando paneles solares fotovoltaicos se genera energía eléctrica [18] [19] la cual puede ser utilizada en diversos procesos con el equipamiento necesario para su aplicación.

Los paneles solares requieren de mucha superficie para generar energía fotovoltaica, además de que esta tiene una variación considerable dependiente de la irradiación del lugar, temperatura y altitud [20]. El Desierto de Atacama al tener una de las mayores irradiancias sobre la tierra, tener una nubosidad y vapor de agua muy baja [21], tener un vasto territorio disponible y además su cercanía a puntos con altos consumos energéticos como lo son las faenas mineras aumenta su atractivo.

La eficiencia de conversión de los paneles solares depende en gran medida de la tecnología utilizada, además de las condiciones climáticas del lugar, como la irradiancia y la temperatura [22].

Uno de los principales problemas de este tipo de tecnologías es el polvo. Este puede llegar a reducir en más de un 15 % la eficiencia de generación de energía eléctrica [23] [24] requiriendo por esto, una exhaustiva mantención y limpieza [25].

Esta tecnología ha sido categorizada como una de las que más ha crecido tanto en su uso global como en su desarrollo del último tiempo, sumado a que esto ha producido un mercado masivo en conjunto a grandes reducciones de precio, haciéndola atractiva para su instalación [26] [27] [28].

Para poder predecir y dimensionar las plantas de energía fotovoltaicas existen diversos software que permiten, mediante modelos incorporados y bases de datos, obtener una estimación de la generación eléctrica, superficies utilizadas, cantidad de módulos, parámetros económicos entre otros tales como TRNSYS, INSEL, PV Watts, HOMER, Solar Advisor Model y RETScreen. Estos permiten realizar diversas de estas tareas [29]. El problema de estos programas recae en la poca posibilidad de hacer un sistema dinámico en donde se combine la utilización de energía eléctrica proveniente de energía solar y de la red eléctrica, además de poder incorporar variabilidad y simulación de datos y flexibilidad en el input de datos de consumo y su utilización condicional, además de no incorporar

otros factores como las pérdidas de transmisión.

Energía en faena

Actualmente, hay equipos mineros que necesitan electricidad para funcionar. Un ejemplo de estos equipos son las palas eléctricas. Estas palas no funcionan a diésel como las otras máquinas, por lo que hay que suministrarles energía mediante instalaciones eléctricas por cables.

Un ejemplo de palas eléctricas es la siguiente: [30]

- Palas de 51 yd³: tienen un consumo de 528-753 kW (demanda promedio de 15 minutos). Estas palas requieren de una potencia instalada de 2.15 MW.
- Palas de 80 yd³: tienen un consumo de 832-1165 kW (demanda promedio de 15 minutos). Estas palas requieren de una potencia instalada de 3.33 MW.

Uso en construcciones

No se puede dejar de lado aplicaciones para usos en las diversas construcciones que tienen las faenas mineras. Ya sean oficinas, campamentos, iluminarias, etc. Todas representan oportunidades de aplicar las nuevas tecnologías en energía solar.

Algunos ejemplos son las ventanas con módulos solares bifásicos transparentes [31]. Sumado a esto, se pueden aprovechar los techos de la misma manera, ya sea con paneles solares o utilizando concentradores solares para calentar agua para su uso local.

A la vez, se pueden utilizar paneles solares para hacer funcionar las luminarias de la mina, sin necesidad de tendidos eléctricos.

Con todo esto, se podría lograr que cada oficina o los campamentos funcionen de manera autónoma, con un suministro eléctrico propio durante el día con la posibilidad de almacenar energía para su uso nocturno.

2.2. Sistema de almacenamiento de energía en baterías

Los sistemas de almacenamiento de energía en baterías o BESS (*battery energy storage system*) son un factor importante en la integración de las energías renovables en los diferentes sistemas eléctricos. Son muchas las bondades que entregan estos sistemas actuando como *buffers* de energía permitiendo la estabilización de consumo, contrastar la variabilidad, suavizar la entrega intermitente de energía además de entregar energía cuando la fuente de energías renovables no este disponible [32]. Por esto, muchas veces los BESS son utilizados en sistemas de generación eléctrica fotovoltaica, hidroeléctrica, eólica, etc.

Las baterías se clasifican usualmente por sus capacidades en potencia y energía, en donde usualmente son una proporción fija en el diseño que depende del tipo y de uso que se le va a dar a la batería. Hay otros parámetros que son de gran relevancia en el diseño de las baterías tales como su eficiencia de carga y descarga, vida útil medida en ciclos, temperatura de operación, densidad de energía, profundidad de descarga máxima y cuanto es su auto descarga en el tiempo [33]. Además de esto, hay distintas clasificaciones de baterías en cuanto a cual va a ser su uso. En este sentido se pueden clasificar en dos: baterías de corto plazo y de largo plazo en cuanto a su transferencia de potencia y capacidad de reacción. Las de corto plazo permiten altas capacidades de reacción pero con entregas de energía durante milisegundos hasta algunos segundos. Estas son utilizadas principalmente como sistemas de protección de equipos sensibles frente a caídas de voltaje. Las de largo plazo permiten usualmente un almacenamiento energético de mucha mayor capacidad en donde pueden actuar entregando energía durante segundos a minutos o mucho más. Estas son las que usualmente se utilizan en conjunto a las energías renovables no convencionales, actuando como *buffer* de energía [34].

Además de la clasificación de tecnologías, existen diferentes tecnologías de baterías con sus propiedades [35]. Algunos ejemplos de baterías comúnmente usadas son:

- **Plomo-ácido:** son celdas que contienen un electrodo positivo de dióxido de plomo con un negativo de una esponja de plomo, separados por membranas y rellenas con ácido sulfúrico acuoso como electrolito. En estas baterías se produce la reacción electroquímica en donde en la carga se reduce el electrodo positivo a óxido de plomo reaccionando con el ácido sulfúrico para formar sulfato de plomo. En el electrodo negativo se produce la oxidación liberando iones de plomo que reaccionan con el electrolito para generar sulfato de plomo también. Estas reacciones producen electricidad con la facilidad de que en la carga de estas baterías, ocurre la reacción inversa. A pesar de que es una de las más utilizadas y la más madura, sufren de altas pérdidas por autodescargas, son de gran tamaño y contienen metales pesados y tóxicos.
- **Sulfuro de sodio (NaS):** consiste en azufre fundido como electrodo positivo y sodio fundido como electrodo negativo a 300°C. El electrolito de cerámica de alúmina actúa a la vez como membrana dejando solo pasar a los iones de sodio para reaccionar con el azufre y formar polisulfuros de sodio, ocurriendo este proceso durante la descarga ya que esta reacción produce el flujo de electrones hacia el circuito. A pesar de que estas requieren de menor tamaño, tienen que mantenerse a una alta temperatura para operar para mantener las sales fundidas.
- **Ion litio:** consisten en estructura de capas utilizando cátodos de óxidos de metales cubiertos en litio y ánodos de grafito. El electrolito consiste en sales de litio mezclado con compuestos orgánicos. Cuando se cargan estas baterías, se liberan iones de litio de los cátodos depositándose en las capas de carbono gracias al flujo de electrones. Esto es revertido cuando las baterías se descargan. Es una de las tecnologías en las que se tiene un mayor foco. Con los desarrollos y economías de escala se han reducido los altos costos que tenían anteriormente, sumado a que nuevas tecnologías permiten almacenamientos de gran tamaño y largas vidas útiles de más de 10,000 ciclos [36].
- **Baterías de flujo:** o de redox son baterías de alta potencia, larga duración, sin proporción de energía/potencia, rápido cambio de carga a descarga y viceversa, bajas eficiencias pero sin auto-descarga. Consisten en dos tanques de electrolito los cuales son bombeados de un estanque a otro recirculándolos a una celda electroquímica con membranas. Gracias al flujo

de electrolito se producen reacciones que generan flujo de electrones, donde la capacidad de energía depende del tamaño de los tanques y la potencia depende de la reacción que ocurra en los electrodos. Algunos ejemplos son las baterías de vanadio y las de bromuro de zinc. El problema de estas baterías es que requieren de un extenso costo de capital para mantenerlas operando debido a la operación y bombeo de la planta química.

2.2.1. Paneles solares con implementación de baterías BESS

La molienda y chancado en las plantas mineras presentan una gran variabilidad en cuanto a su consumo energético debido a que el mineral alimentado posee características de dureza variadas y el mineral no es homogéneo. Hay muchos factores que afectan en cuanto va a ser el consumo mostrado en un instante de tiempo para cada molino o chancador, ya sea la dureza del mineral, mineralogía, carga circulante, granulometría, etc. La energía que utiliza el proceso de molienda en la concentración equivale a más del 50 % de la energía eléctrica que utiliza la mina en promedio [14] haciéndose atractivo poder implementar un sistema que reduzca la energía utilizada, abaratando costos fijos y operacionales de tal manera de tener un consumo parejo en el tiempo. Por esto mismo se tiene que tener la capacidad de entregar energía de forma rápida cuando sea necesario y poder cubrir los momentos de mayores consumos.

Se puede utilizar la gran cantidad de superficie disponible en las minas para instalar paneles solares conectados para entregar su energía a un almacenamiento en baterías BESS [37] [38] y al sistema de consumo. De esta manera se puede cubrir la variabilidad que se presenta en la operación de conminución, reducir la energía tomada desde el red eléctrica y realizar un plan de consumo eléctrico basado en tarifas más bajas, por ejemplo.

Es común encontrarse con plantas de paneles fotovoltaicos que tengan en su sistema incorporados sistemas de almacenamiento. Debido a que es de generación eléctrica, los arreglos de baterías son los más utilizados. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 2.1 [39]. Estos sistemas contienen controladores que permiten utilizar el máximo de la energía generada por los paneles solares y a la vez, compatibilizarlos con la carga y descarga de las baterías, cuidando la energía que está almacenada, evitando sobrecargas o déficit de energía entregadas al sistema [40].

Debido a que la mayoría de las minas se encuentra ubicadas en el Norte de Chile en donde se tienen los valores de irradiación más altos del mundo y buenas condiciones climáticas con poca nubosidad, no es ajeno pensar en la opción de incorporar un sistema de generación de energía solar fotovoltaica para apoyar a los procesos intensivos en energía como lo es la molienda SAG, por ejemplo. Debido a que esta energía solo se puede producir de día, se necesita un *buffer* que sea capaz de proporcionar energía durante la noche y reducir la variabilidad del sol y del mineral para lograr un consumo final desde la red mucho más estable, en donde se hace atractivo contar con un BESS que pueda apoyar al proceso. De esta manera se eligen estas tecnologías para continuar con el análisis y estudio para ver si efectivamente existe alguna sinergia posible entre estas tecnologías.

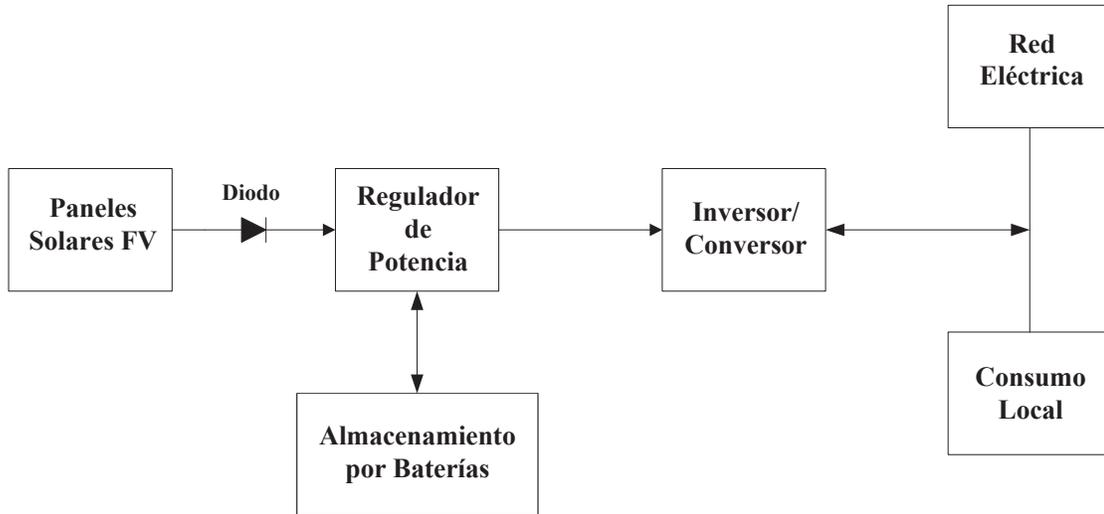


Figura 2.1: Esquema de un sistema fotovoltaico típico.

2.3. Análisis de datos

2.3.1. Datos reales del molino SAG

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos reales provenientes de una planta de molienda. Se realizó un estudio estadístico básico para conocer con mayor detalle como es el comportamiento de los datos en el tiempo y conocer así, la variabilidad real que tienen los molinos semi autógenos (SAG) estudiados.

Se trabajó con datos de tres molinos SAG con sus datos de potencia consumida (MW) en conjunto a su tonelaje por hora pasado (TPH), con una resolución temporal un minuto correspondientes a los meses de enero a junio (260,340 datos).

2.3.2. Estadísticas básicas

Se llevaron a cabo estadísticas básicas para conocer la variabilidad y comportamiento del consumo de los molinos en el tiempo.

Debido a las paradas de los molinos junto a sus mantenciones, es necesario realizar un filtro de datos para poder obtener las estadísticas correspondientes a los rangos normales de operación. Los resultados preliminares son los mostrados en la Tabla 2.1 los cuales incluyen todos los datos otorgados.

Cabe destacar que los mínimos son despreciables ya que al haber mantenciones sus valores bajan a cero. Por lo mismo, en este caso las medias son influidas por los valores bajos de paradas y partidas. En este caso, el valor que más representa a la media de la operación es la mediana. Esto se puede comprobar gráficamente en las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4.

Tabla 2.1: Estadísticas básicas para los tres molinos SAG.

	SAG 1		SAG 2		SAG 3	
	TPH	Potencia MW	TPH	Potencia MW	TPH	Potencia MW
Media	2394.3	12.6	2376.6	12.6	2480.0	12.4
Mediana	2632.6	14.0	2635.6	14.2	2719.1	13.7
Desviación estándar	880.5	4.1	923.5	4.4	887.4	4.0
Máximo	3668.2	15.7	3661.3	16.1	3731.5	15.6

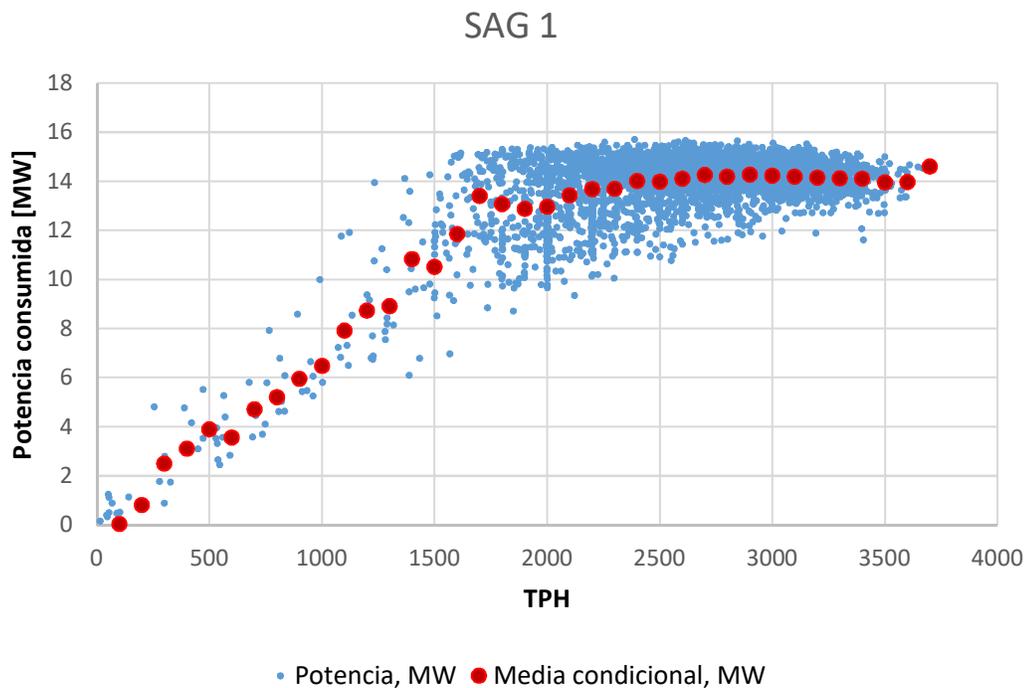


Figura 2.2: Gráfico de potencia consumida por SAG 1 contra TPH.

Estos gráficos representan la relación que existe para cada punto de procesamiento de mineral y su consumo, mostrando de esta manera una irregularidad que existe entre ambos. La correlación que existe en los datos son los mostrados en la Tabla 2.2. Se puede ver en un principio que la correlación es buena, pero esto es solo debido a los datos de valor cero producto de las detenciones de los molinos, mostrando a su vez consumo cero en esos momentos. Al realizar un filtro a esos datos en que no se procesa mineral, se puede ver como disminuye la correlación de forma pareja para los tres molinos, aunque es ayudada por la primera parte de los gráficos la cual se mantiene bastante lineal. Sumado a lo anterior, se puede ver una zona a partir de los 1500 TPH aproximadamente en los tres molinos en donde el consumo de estos tiene un claro límite superior. A la vez, tiene un rango de potencias consumidas para un cierto TPH en donde, por ejemplo, para 1500 TPH se tienen consumos de 7 a 15 MW aproximadamente mientras que para 3500 TPH se muestran consumos de 11 MW a 15 MW aproximadamente. Se puede ver que esta desviación en el consumo se hace menos pronunciada a medida que aumenta el TPH a su máximo en los tres casos.

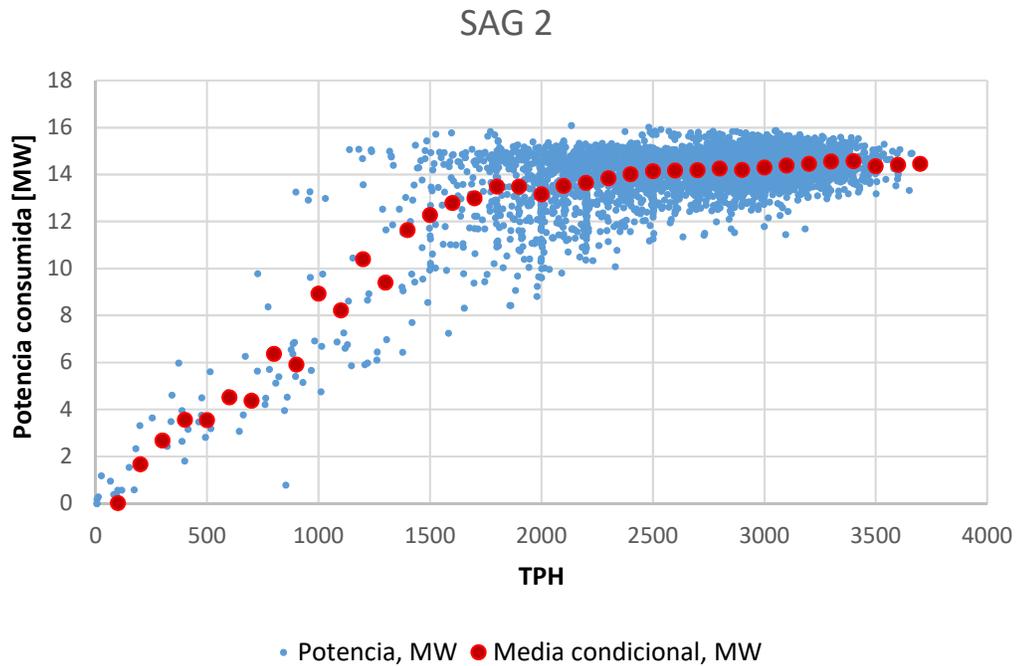


Figura 2.3: Gráfico de potencia consumida por SAG 2 contra TPH.

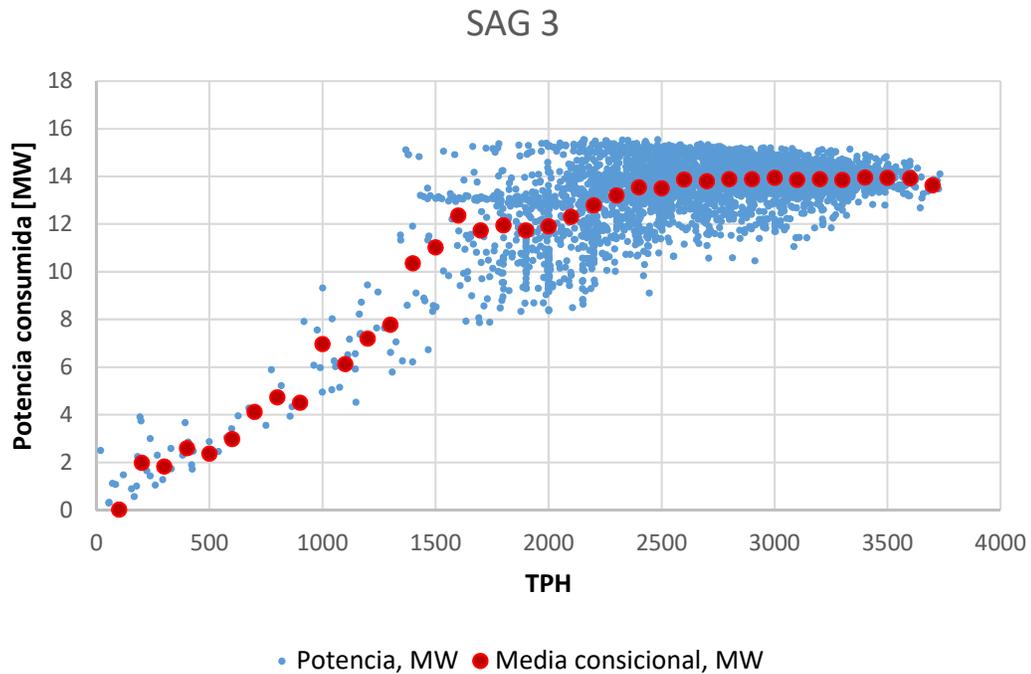


Figura 2.4: Gráfico de potencia consumida por SAG 3 contra TPH.

En las figuras anteriores se incorporó además las medias condicionales para rangos de 100 TPH cada punto. Es interesante notar que estos puntos mantienen una relación esperada del TPH junto al consumo, pero se estabilizan al pasar los 1500 TPH en los tres casos mostrando en primera instancia la importancia del llenado de los molinos con respecto a la eficiencia energética y la op-

Tabla 2.2: Coeficientes de correlación para los distintos molinos SAG.

	SAG 1	SAG 2	SAG 3
Coef. de correlación	0.89	0.90	0.89
Coef. de correlación con filtro	0.57	0.60	0.62

timización de su funcionamiento al manejar bien el tonelaje de entrada. Además de lo anterior, se puede desprender de estos gráficos que hay más de un factor que influye en el consumo eléctrico además del tonelaje. Es presumible que este factor corresponda a la dureza del mineral [41]. Diversos análisis se llevaron a cabo a los datos en escalas temporales distintas, realizando gráficos de diversos días, semanas o meses, obteniendo el mismo comportamiento mostrado anteriormente eliminando de esta manera un posible sesgo temporal.

Con respecto a la dureza, esta tiene una relación indirecta con la potencia consumida del molino. Esto es debido a que el operador siempre quiere tratar de trabajar a potencia máxima, por lo que va a tratar de llenar el molino dentro de su rango de eficiencia. La dureza va a afectar cuanto va a ser la cantidad posible que se va a poder alimentar al molino dentro de un transcurso de tiempo dado, donde un mineral duro va a producir que se pueda procesar menos mineral en un rango de tiempo, mientras que uno blando va a permitir la alimentación de más en el mismo periodo de tiempo.

La incerteza de la roca va a producir que el operador no sepa con exactitud que mineral está entrando hasta que vea el efecto que tiene sobre la potencia, la cual está dada por la presión en los piñones producto del nivel de llenado. Por lo tanto, el operador va a actuar dependiendo de las reacciones que va teniendo el molino, produciendo de esta manera la irregularidad de consumo vista.

2.4. Datos planta fotovoltaica

La integración de la energía solar fotovoltaica (FV) generada que alimenta los molinos SAG se va a realizar desde el punto de vista de cuanto es la energía efectiva que entrega la planta al sistema, dejando de lado eficiencias de generación, tipos de paneles y sus tecnologías, transmisión, etc. De esta manera se puede dimensionar la planta necesaria según lo que se requiere realmente.

Para este trabajo, se va a tomar una curva de generación de referencia de una planta que tiene una capacidad en potencia de 2 MWp llamada Parque Solar Fotovoltaico PAMA de la empresa Coener, ubicado en la comuna de Combarbalá en la IV Región. Esta se encuentra operando desde Junio del 2014 [42]. Las generaciones diarias reales en una resolución horaria de la planta se pueden obtener de los reportes del CDEC SIC del Sistema Interconectado Central (SIC) en su página web [43]. Se descargaron y agruparon seis meses de datos correlativos a los disponibles para los molinos SAG.

Estos datos serán utilizados como input directo al sistema, sin considerar perdidas de transmisión, eficiencias y otros. Es decir, va a ser tomada como energía neta entrante lista para ser utilizada.

2.5. Análisis metalúrgico

Los resultados obtenidos a partir de las estadísticas básicas de los datos de los molinos sugieren la influencia en factores externos al tonelaje pasante para determinar el consumo que estos van a tener. Uno de estos factores es la dureza del mineral.

Se va a tomar como hipótesis que una buena administración de la alimentación del mineral va a producir un mayor beneficio económico en cuanto a la reducción de costos operacionales, necesitando para ello además, una planta fotovoltaica y baterías de menores características resultando en menores costos de inversión. Para desarrollar esto se considerará que el consumo eléctrico del mineral en los molinos va a depender del tonelaje alimentado y va a tener como factor influyente la dureza, en donde un mineral con mayor dureza va a consumir una mayor cantidad de energía eléctrica para su conminución que uno con menor dureza debido a las diferencias de los tiempos de residencia de estos minerales dentro del molino.

En base a lo anterior, se quiere definir la administración de mineral para probar que si se alimenta los molinos SAG con mineral duro, es decir, asignando el mineral de alto consumo, en los periodos en donde se tiene alta generación solar y alimentando con el mineral blando durante la noche, se puede lograr una mejor integración de la tecnología. Con la administración del mineral surge la incertidumbre sobre que pasaría con el resto de la planta si se quiere adoptar esta forma de alimentación a los molinos SAG. Para ello se va a desarrollar un análisis metalúrgico en base a casos haciendo sensibilidad con la dureza del mineral y su ley asociada, ya que esta puede producir problemas aguas abajo si es que hay una asociación de leyes a las características de dureza del mineral.

Se va a asumir que desde la mina se puede realizar la caracterización y separación de mineral en base a su dureza en distintos *stockpiles* para poder separar la alimentación durante el día y la noche y así aprovechar en mayor medida la energía solar. Esto debería poder ser realizado según lo conversado con el profesor de planificación minera Nelson Morales (DELPHOS). Usualmente el área de geología en las mineras realizan un control de leyes antes y después de la tronadura para poder llevar a cabo una correcta planificación y extracción del mineral. De esta manera el mineral es destinado a distintas zonas del *stockpile* o se mantiene un registro de donde entra para poder realizar un mezclamiento o *blending* y así homogeneizar las leyes que continúan como alimentación a la planta. En ningún momento se realiza la separación o caracterización de dureza para alimentar a la planta, pero si se realiza previo a la tronadura. Es necesario caracterizar el mineral por dureza para poder ajustar la cantidad de explosivos a utilizar y de esa manera evitar tronar más o menos de lo requerido, optimizando los costos en explosivos y la fragmentación del mineral para la alimentación a los chancadores [41]. Por ello se podría rescatar la caracterización realizada a pesar de que se produce una mezcla del mineral al momento de la tronadura. Esto permitiría realizar una clasificación previa a la alimentación a la planta. En caso contrario, se podría realizar una caracterización de dureza adjunta a la caracterización de leyes posterior a la tronadura para obtener una clasificación más precisa. Como solución al problema, también se han desarrollado una serie de rastreadores que permiten conocer la ubicación espacial de bloques de mineral, para saber con cierta precisión su camino por la planta. El *SmartTag* de Metso [44] permite mediante identificación de frecuencias de radio (*RFID Radio Frequency Identification*) el rastreo de trazadores por todo el proceso productivo. Esto permite conocer como se mueve el mineral en el proceso productivo abriendo pasos a nuevas optimizaciones de procesos [45] [46].

La dureza tiene una directa relación a la energía necesaria para poder reducir de tamaño esta. Por una parte si se conoce bien la caracterización de la roca en la tronadura, se puede optimizar el sistema mediante las prácticas *Mine-to-Mill* las cuales tratan de entregar a los molinos SAG una mejor distribución granulométrica ajustando la cantidad de explosivos y su nivel energético. En especial se busca lograr una granulometría con gran cantidad de finos (-10 mm), una menor cantidad posible de material intermedio ($+25 -75$ mm), y un material grueso de granulometría más fina (concentrado en los 100 mm) [47] [48] [49] [50]. Por otra parte se sabe que un mineral más blando va a requerir menor consumo específico de energía por parte del molino y los chancadores debido en parte a que este va a tener un tiempo de residencia menor en el equipo (menor tiempo de molienda) como se puede ver en la Figura 2.5 [51]. En un estudio realizado a varias concentradoras grandes de Chile que utilizan la tecnología de molinos SAG, mostrado en la Figura 2.6 [52], se puede ver lo que se explica anteriormente basándose la dureza relativa al índice de trabajo de Bond (*Bond Work Index*, W_i [kWh/tc]) mostrando que al aumentar este, se aumenta el consumo específico de energía de la planta total. Cabe destacar que, en cuanto a procesos unitarios, la molienda en general, incluyendo molinos SAG y molienda de bolas, se lleva el mayor consumo energético de la planta por tonelada tratada según lo mostrado en la Figura 2.7 [52].

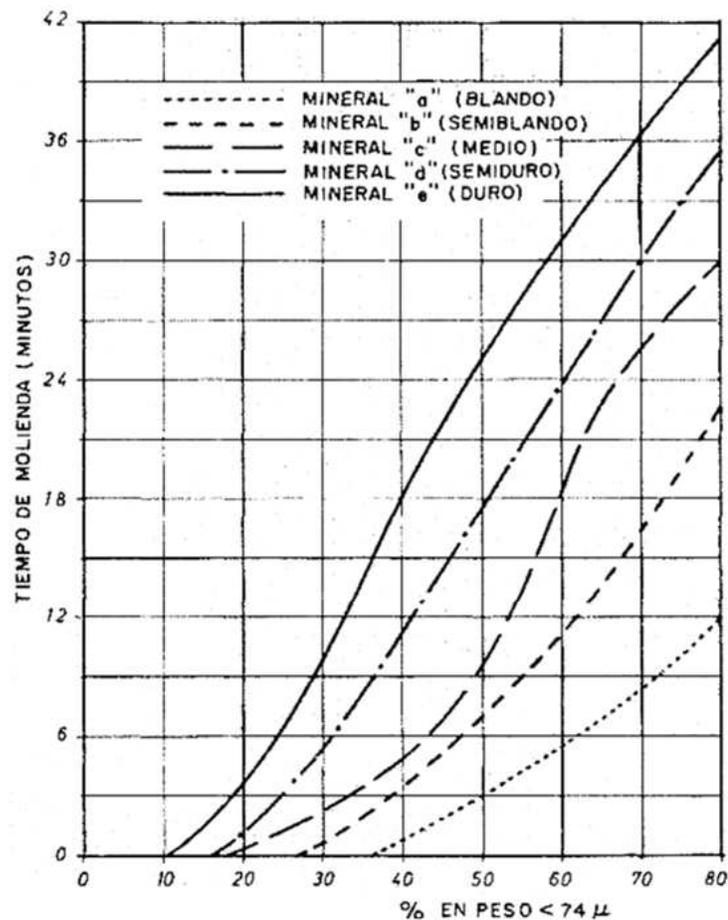


Figura 2.5: Gráfico de tiempo de molienda según dureza del mineral y granulometría.

Sumado a lo visto en la Sección 2.3.2 sobre el efecto del tonelaje sobre el consumo, al analizar

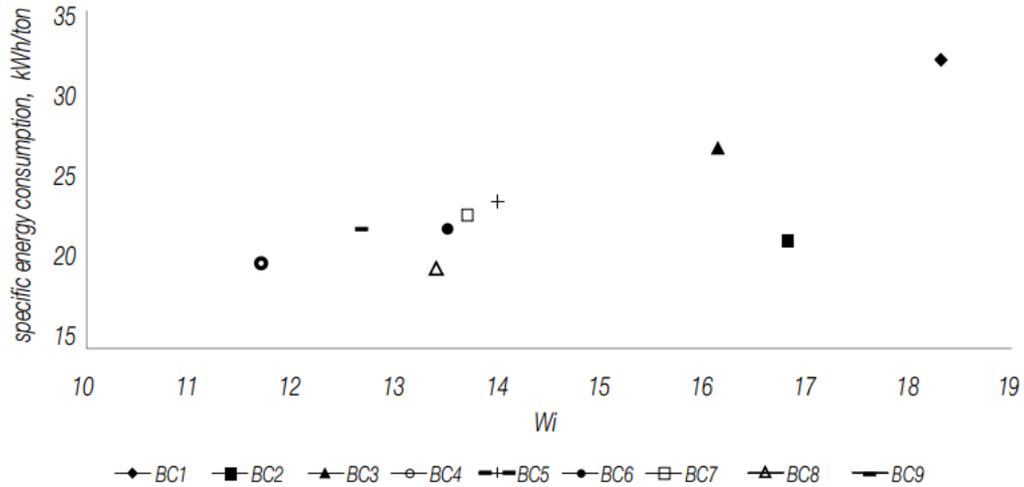


Figura 2.6: Gráfico de consumo específico de energía de molinos SAG en función del índice de trabajo de Bond para distintas concentradoras de Chile.

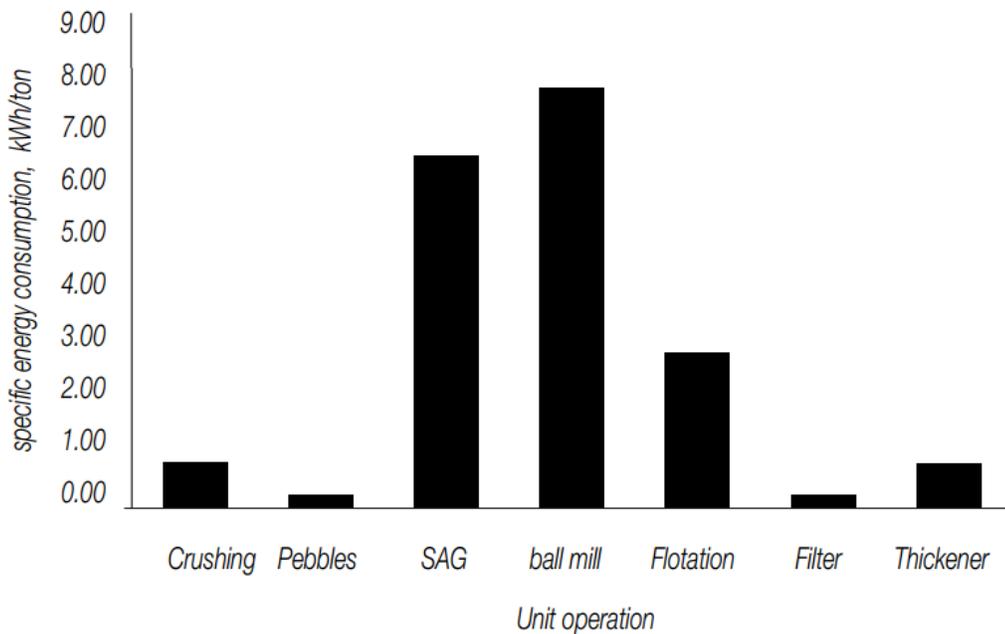


Figura 2.7: Gráfico de consumo específico de energía de varias operaciones unitarias en Chile.

los datos desde el punto de vista de consumo por tonelada tratada (consumo específico de energía, CEE) contra el tonelaje se puede ver una dependencia de disminución del CEE a medida que aumenta el tonelaje procesado en el molino. Eso se puede ver claramente en el gráfico del molino SAG 1 en la Figura 2.8 en donde hay una clara disminución de la energía requerida para procesar una tonelada mientras más mineral procese el molino. En los gráficos de los molinos SAG 2 y 3 se puede ver la misma tendencia pero en menor medida, en las Figuras 2.9 y 2.10. Esto se puede asociar con lo explicado anteriormente sobre la dureza, en donde que el molino pueda procesar una mayor cantidad significa que se le está alimentando mineral blando. De esta manera para una mis-

ma potencia máxima, se logra pasar una mayor cantidad de tonelaje, lo que significa que el mineral blando tiene un menor CEE con respecto al duro donde ocurre lo contrario.

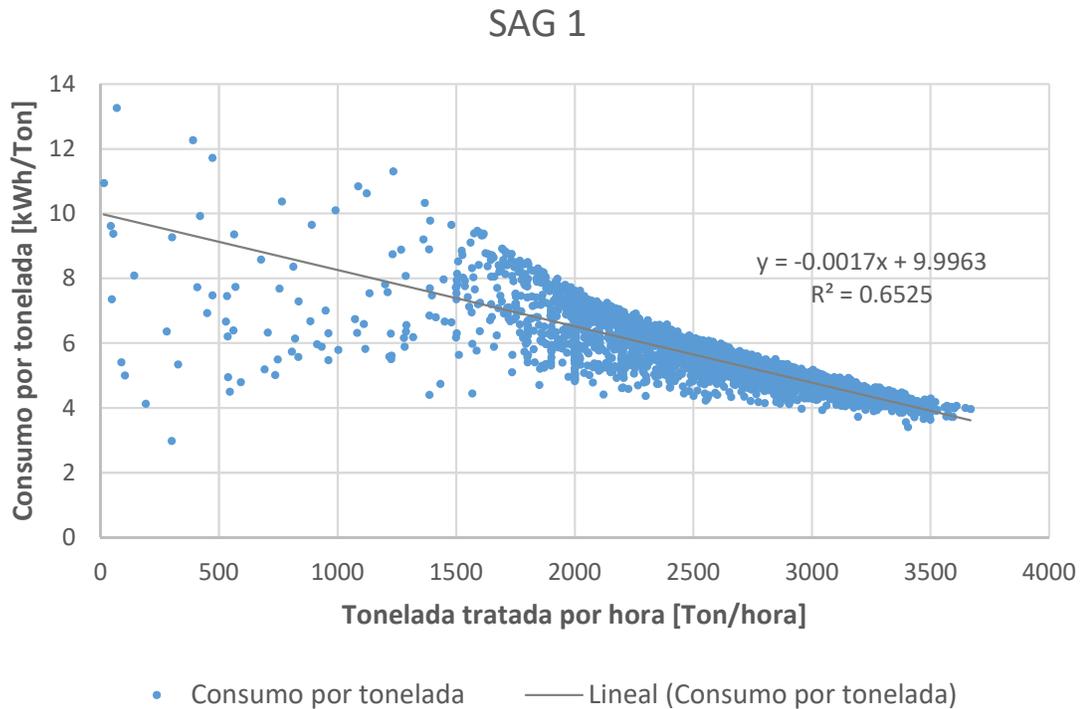


Figura 2.8: Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje del molino SAG 1.

Al agregar todos los datos en un solo gráfico y tratarlos como tonelaje total tratado en la planta (una suma temporal punto a punto), se puede ver que se mantiene el comportamiento analizado en la sección anterior en la Figura 2.11, con una meseta estable para las medias condicionales en la sección de alto tonelaje en el gráfico (rango de operación normal). A pesar de eso, se muestra una alta dependencia del tonelaje con el consumo específico de energía como lo ocurrido en el molino SAG 1. Esto se puede ver en la Figura 2.12. En este gráfico se puede ver claramente la influencia de las paradas de los molinos en donde se pueden identificar tres grupos de puntos (uno en los 2000 TPH, en 4000-6000 TPH y el resto de los puntos). De izquierda a derecha muestra la operación de uno, dos o tres molinos de forma separada.

Al momento de analizar la dureza del mineral, es importante considerar la ganga que va a estar presente debido a que esta va a componer casi la totalidad de la roca a ser procesada. Podría ocurrir que una roca más blanda contenga una mayor cantidad de arcillas perjudicando posiblemente de forma substancial los procesos de molienda y flotación.

A continuación se van a analizar el efecto de minerales blandos y duros para distintas operaciones unitarias dentro del procesamiento de minerales.

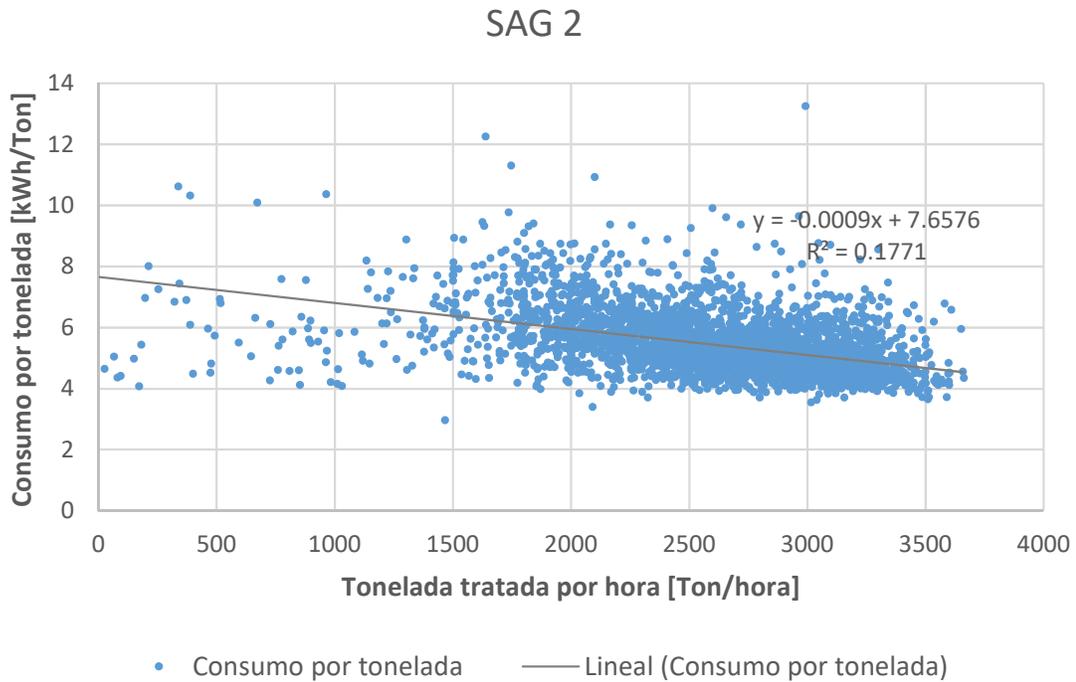


Figura 2.9: Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje del molino SAG 2.

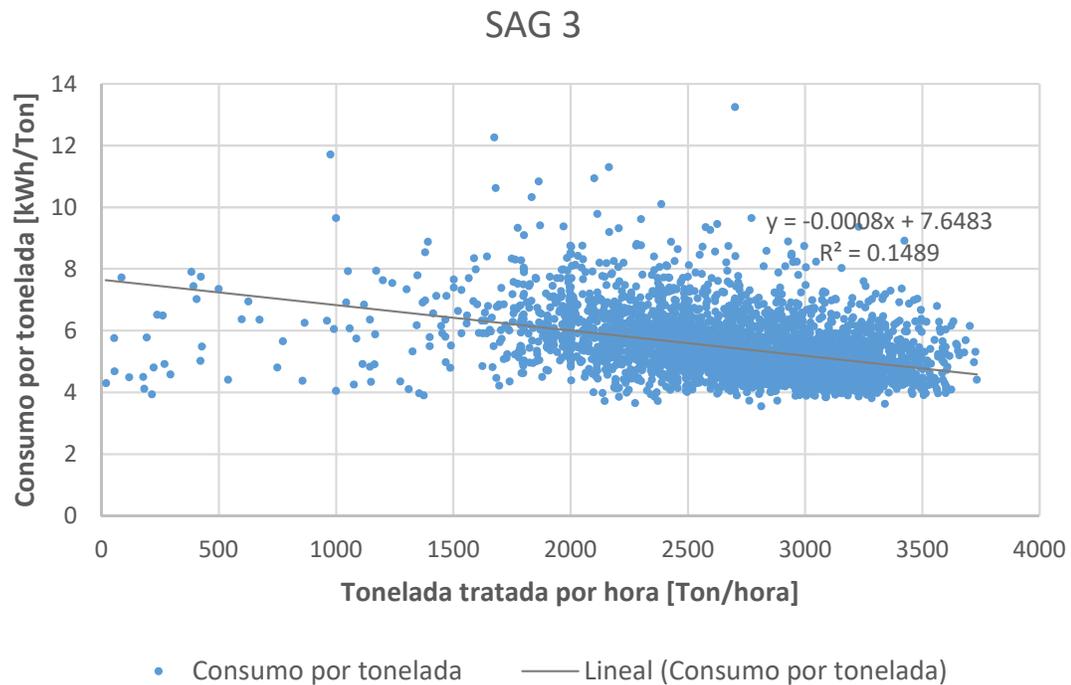


Figura 2.10: Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje del molino SAG 3.

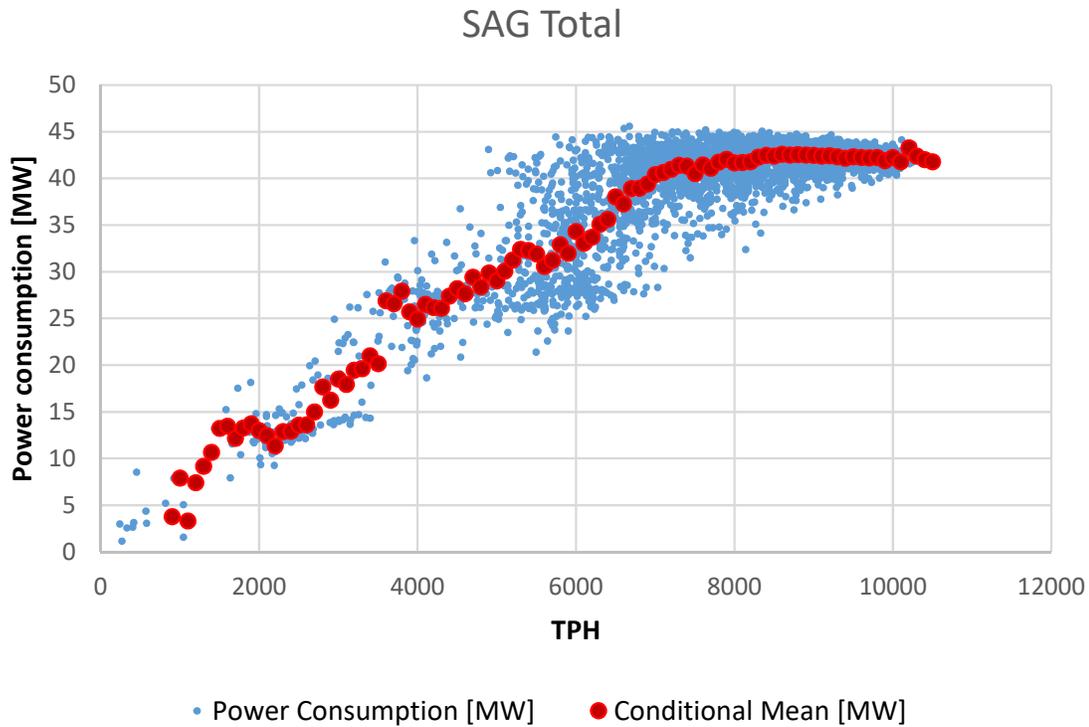


Figura 2.11: Gráfico de potencia consumida por los tres molinos SAG agregados contra TPH total de la planta pasante.

2.5.1. Chancado

En el chancado las principales diferencias van a ocurrir sobre el tiempo de residencia del mineral dependiendo de la dureza, haciendo analogía a lo que ocurre en molienda como se puede ver en la Figura 2.5.

En este caso el mineral blando va a producir que aumente la capacidad de procesamiento que tengan los chancadores debido a su bajo tiempo de residencia, aumentando por ende el flujo de mineral procesado. Esto ocurre porque según las conductas típicas de operación, se trata de mantener siempre lleno de mineral o en las condiciones óptimas de llenado del equipo para optimizar el consumo energético de procesamiento. Este se encuentra trabajando bajo la máxima potencia disponible y no teniendo capacidad ociosa.

En este punto no es crucial el hecho de procesar mucho más, si es que la producción de mina lo permite, ya que todavía el mineral está seco y es posible acumularlo en *stockpiles*.

Sumado a lo anterior, es posible mediante el tratamiento de mineral blando obtener un consumo específico de energía menor al mineral duro debido a que un mineral con un menor W_i es susceptible a un mayor microfracturamiento y macrofracturamiento, dando paso a una mayor facilidad y rapidez en su trituración [41].

En el caso del mineral duro es importante considerar el hecho de que se pueda lograr la producción necesaria de mineral o tener un *stockpile* de un tamaño considerable para poder cubrir un posible

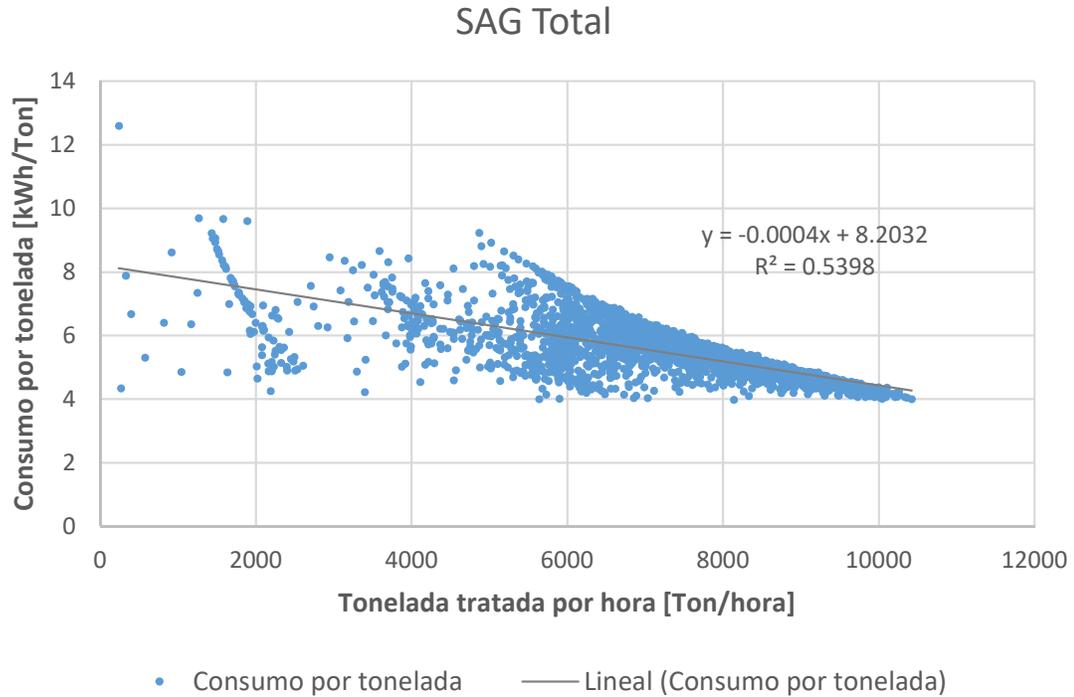


Figura 2.12: Gráfico de consumo específico de energía contra el tonelaje para los tres molinos SAG agregados.

déficit de producción. Por lo mismo, se requiere un buen plan de producción de parte del equipo de planificación en conjunto a una buena caracterización del mineral para lograr una tronadura eficiente, y en este caso, más fina. Es decir, se debe tener un buen control granulométrico para llegar al chancador con una distribución de tamaño más fina y lograr reducir el consumo y aumentar la cantidad procesada.

Un mineral más duro tendrá un consumo específico de energía debido a que tiene un mayor índice de trabajo de Bond según lo que se puede ver en la Ecuación 2.1. Al igual, si se alimenta el chancador con una granulometría menor, se requiere una menor potencia para poder realizar la reducción de tamaño requerida, significando en menores tiempos de molienda.

Sumado a lo anterior, si es posible evitar que el mineral más fino pase por el chancado, se ahorra energía de esta manera.

$$W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

W = Consumo de energía de la máquina de reducción de tamaño en [kWh/tc].

W_i = Índice de trabajo de Bond. Corresponde a la energía en [kWh/tc], necesaria para reducir un bloque de tamaño infinito a un producto con un 80 % bajo 100 micrones.

F_{80} = Tamaños en micrones bajo los cuales se encuentra el 80 % en peso de la alimentación al chancador.

P_{80} = Tamaños en micrones bajo los cuales se encuentra el 80 % en peso del producto del chancador.

2.5.2. Molienda

Se va a tomar el supuesto en la molienda que la alimentación a los equipos va a ser regulada y controlada mediante el uso de *stockpiles* para ambos casos de mineral duro y blando, estabilizando así la alimentación a los molinos SAG.

Además, se debe tomar en cuenta de que en este punto ya no se puede detener el flujo de pulpa debido a que sedimentaría produciendo problemas en el sistema de bombeo y bloqueo de las líneas de tubería.

En el caso de mineral blando, es más fácil lograr obtener una granulometría más pequeña en un menor tiempo que con un mineral duro, produciendo que se vacíe el molino de forma más rápida, es decir, aumenta el flujo de alimentación necesaria para poder mantener una carga estable. Esto es importante debido a que existe un óptimo operacional en donde el molino utiliza mejor la potencia, dependiente de la carga de bolas y de mineral que tenga el molino, como se puede ver en la Figura 2.13 [53].

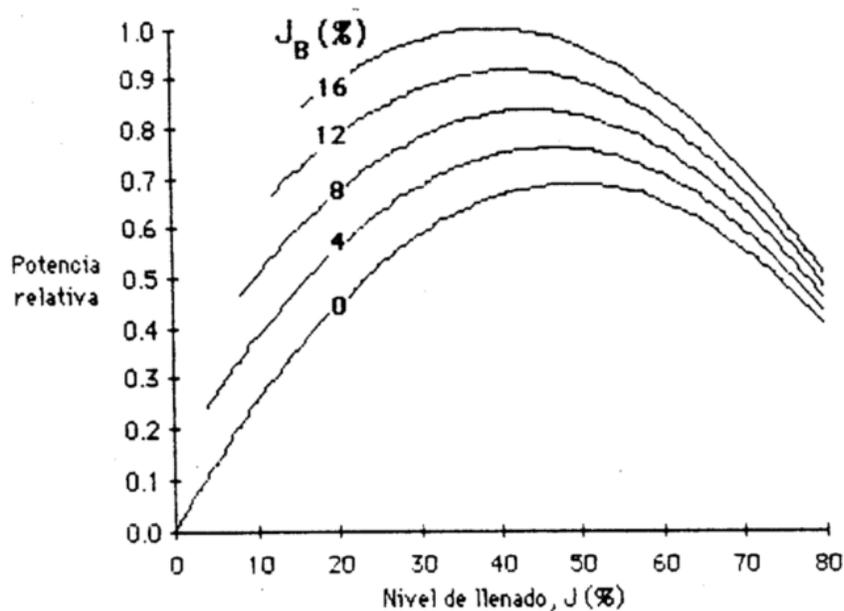


Figura 2.13: Demanda de potencia de un molino semiautógeno en función del llenado (J) para distintos niveles de carga de bolas (J_B).

A pesar de lo anterior, se tiene que, si el mineral proviene con una granulometría muy fina desde el chancado, se producirá un fenómeno en que el mineral aparentará ser más duro, disminuyendo su capacidad de reducir tamaño y aumentando su consumo específico de energía. Esto es debido a que

los medios de molienda en un molino semiautógeno corresponden a las mismas colpas de mineral. Estas son responsables de reducir de tamaño a las más pequeñas y reducirse entre sí, con ayuda de bolas de acero. Por eso es necesario tener una buena distribución granulométrica, idealmente no con mucho mineral intermedio, ni tampoco una fracción de mineral grueso de mucho tamaño. De esta manera se puede lograr una mayor eficiencia del molino y disminuir el consumo específico de energía de este. A su vez, si se mantiene un volumen de carga constante, va a significar que se va a poder lograr una mayor capacidad de tratamiento si el mineral es más grueso.

Es importante tener un buen control sobre los gruesos ya que, si no se introducen suficiente cantidad de finos, se provocará un aumento en la cantidad de gruesos residiendo en el molino ya que la granulometría fina se demora mucho menos en salir del molino, provocando a su vez, un aumento en el consumo específico de energía.

Una posible solución a problemas en la granulometría es manejar la carga de bolas. Si el mineral blando produce granulometrías más finas y colpas más débiles, para tratar el mineral se pueden utilizar una mayor carga de bolas de una distribución de tamaños menores para tratar la acumulación de finos producto de la falta de colpas grandes. Por otra parte, en caso de que un mineral más duro provoque la acumulación de colpas más grandes dentro del molino, se pueden utilizar una carga de bolas con una distribución de tamaños mayor a la anterior para así reducir la cantidad de colpas grandes presentes.

El procesamiento de un mineral más duro, va a provocar que el mineral resida más tiempo en el molino, por lo que su capacidad de tratamiento de tonelaje disminuye. Si se opera el molino a máxima capacidad como es lo usual manteniendo el molino estable como se puede ver en la Figura 2.14 [53], se va a ver un efecto de sobrellenado perdiendo eficiencia en la capacidad de moler del SAG. Para esto, si el molino se opera con una capacidad inferior a la máxima, se podrá compensar el aumento en la dureza en un aumento en el volumen tratado, lo que provoca un aumento en la potencia consumida y, por ende, aumentando el consumo de energía por tonelada tratada.

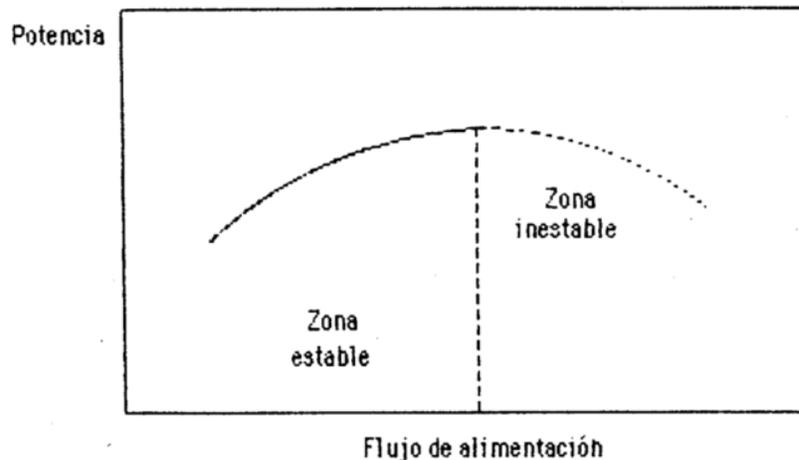


Figura 2.14: Grafico de estabilidad de la toma de potencia del molino según el flujo de alimentación.

Considerando que usualmente los circuitos SAG se componen por una molienda secundaria con

molinos de bolas y clasificación por hidrociclones como se puede ver en la Figura 2.15 [15], se tomará este por referencia. A pesar de que no aparece en el diagrama, se suelen incorporar en forma de recirculación al SAG un chancador de *pebbles*.

Para minerales más duros, se genera una mayor cantidad de *pebbles* los cuales tienen que ser chancados. Estos podrían producir en exceso una sobre alimentación en forma de carga circulante al molino SAG limitando su capacidad de recibir alimentación fresca.

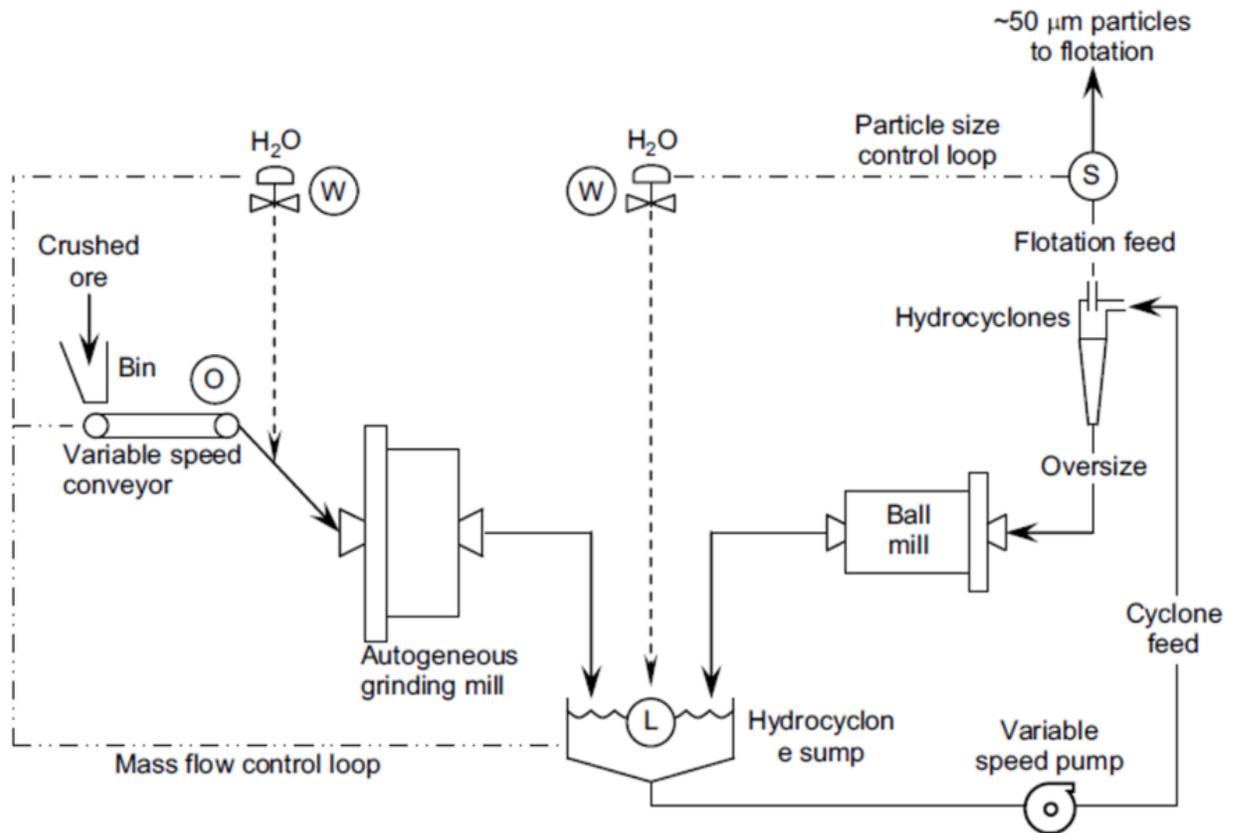


Figura 2.15: Circuito SAG SABC-B tomado como referencia para este análisis.

Después de la molienda SAG, el mineral va a un estanque de bombeo. Este estanque tiene capacidades limitadas por lo que, si se va a rebalsar, el sistema de control detendría la alimentación del SAG evitando así la pérdida de pulpa en caso de que la capacidad de bombeo esté copada. Esto generaría un problema en un mineral muy blando debido al aumento de mineral que es capaz de procesar si se mantiene el molino a máxima capacidad constantemente. Esto generaría tarde o temprano que el SAG tenga capacidad ociosa perdiendo productividad. Por esto mismo habría que lograr un óptimo operacional en caso de generarse este problema y que los estanques no den abasto o, en un caso de diseño, construir estanques de mayor capacidad previendo mayores flujos en los momentos que se pase este tipo de mineral. Aunque, este sobre flujo del SAG puede ser contrarrestado con una menor carga circulante. Como se tiene un mineral más blando, el producto resultante es más fino. Si además se disminuye la inyección de agua al sistema, se puede lograr clasificar mejor estos finos en los hidrociclones recirculando menos cantidad de pulpa [54]. De esta forma se podría aumentar

la capacidad del SAG para procesar sin capacidad ociosa y poder tratar toda la pulpa.

En el caso de mineral duro, se tiene una menor capacidad de procesamiento por lo cual, el flujo de mineral es menor. En caso de que el producto del SAG sea más grueso, se puede incorporar más agua al sistema de tal manera de reducir la capacidad de clasificación de los hidrociclones obteniendo una mayor recirculación al molino de bolas reduciendo aún más el mineral y así, obtener buenas liberaciones de la especie a recuperar [55].

Capítulo 3

Desarrollo del modelo determinista

En este capítulo se mostrará el modelo desarrollado junto a la explicación de cada una de sus partes.

Se quiere desarrollar un modelo que simule un sistema en donde se tenga un molino SAG conectado a la red eléctrica con posibilidades de comprar la energía faltante (importar energía) y vender los excedentes de energía (exportar energía) y a la vez, se encuentre conectado a un sistema de generación de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos en conjunto a un sistema BESS de baterías de plomo ácido. En este caso en particular, el molino SAG simulado representa el agregado de los tres molinos SAG mencionados anteriormente. Este sistema queda representado en la Figura 3.1.

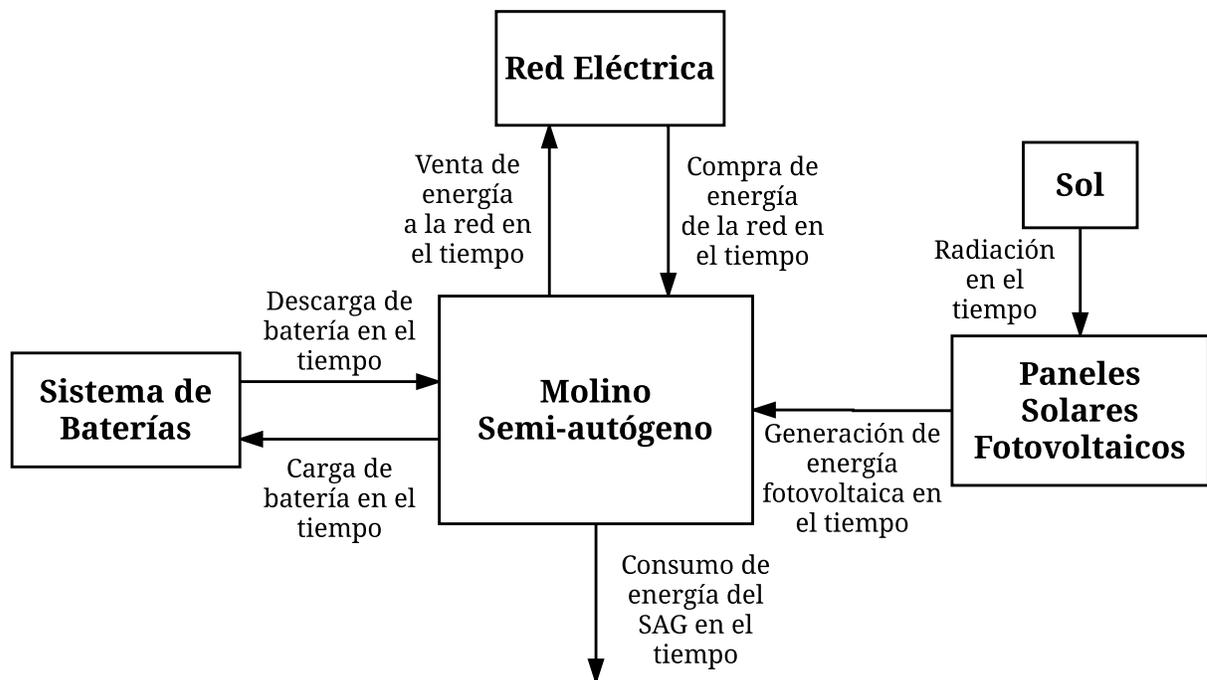


Figura 3.1: Sistema a ser modelado.

El sistema anterior puede ser representado de manera simplificada en el esquema mostrado en la Figura 3.2.

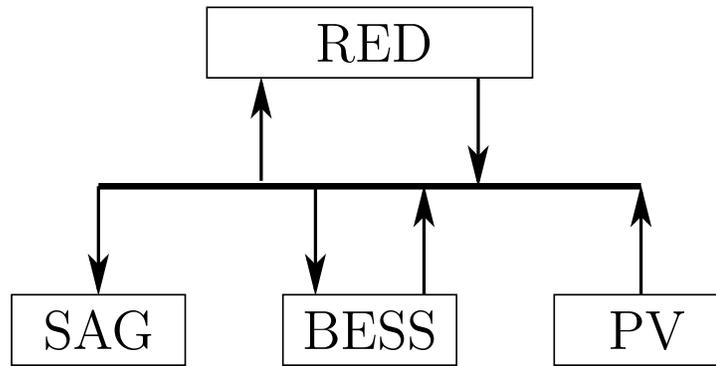


Figura 3.2: Esquema de simplificación del sistema.

3.1. Planteamiento del modelo

El modelo consiste en una optimización lineal entero mixto el cual va a minimizar el costo operacional energético del sistema planteado. Este costo se compone principalmente de:

- Potencia contratada
- Multas por sobreconsumo
- Costos por compra de energía a la red
- Ingresos por venta de energía a la red

Los costos operación y de inversión asociados a la planta fotovoltaica y las baterías BESS no son considerados de manera endógena en la optimización. Esto es debido a que realizar esa operación de manera integrada es computacionalmente muy exigente. En la literatura se puede ver que cuando el foco es el detalle operacional, se suelen proponer formulaciones híbridas. Estos, más que proponer una formulación global de optimización para inversión y operación, minimizan solo la operación y después mediante el estudio de casos buscan tamaños alternativos de sistema [58] [59] [60] [61].

A su vez, se quiere probar que una buena caracterización de la dureza del mineral para su posterior administración de la alimentación de los molinos SAG puede proveer mayores beneficios económicos y una mejor integración del sistema propuesto. Por eso se va a proponer un submodelo paralelo que va a incorporar un *Demand Side Management* (DSM), el cual va a corresponder en el manejo del mineral como flexibilidad operacional para manejar el consumo que se va a ver reflejado por parte de los molinos.

En este caso en particular, no se va a manejar directamente la alimentación del mineral, si no que se va a considerar los consumos que va a tener el molino en cada periodo de tiempo. Por eso, se va a considerar estos consumos por periodo temporal como paquetes individuales que se pueden mover al periodo que se estime conveniente, manejando completamente el consumo sin cambiar los valores y, por ende, sin cambiar el consumo total ni promedio del molino.

Por lo anterior, se va a definir dos modelos paralelos en donde una va a considerar el DSM mientras que el otro no, produciendo ciertas diferencias en algunas de sus ecuaciones y compartiendo otras.

A la vez, se van a definir dos macro casos en donde hay una variación en el planteamiento del ciclaje de las baterías en los modelos. El primero corresponde al caso planteado para el congreso ENERMIN 2016 (ver Anexos 6.1.1), el cual considera que los ciclos son enteros, si se cuenta un ciclo cuando la batería pasa de estado de cargando a descargando. El segundo macro caso corresponde al planteado en el artículo de revista enviado al Journal of Cleaner Production (ver Anexos 6.1.2), el cual considera que los ciclos de las baterías pueden ser fraccionales y se considera un ciclo como una cantidad de energía administrada por la batería (ya sea energía que cargue o descargue) equivalente a una carga y descarga completa. Esto se puede resumir a una cantidad neta de energía que puede administrar la batería como vida útil.

Cada Macro caso se define según sus ecuaciones asociadas, mientras que la diferenciación de ambos modelos (con o sin DSM) se lleva a cabo mediante la Ecuación 3.4:

- Macro caso 1 usa Ecuaciones 3.1, 3.3 a 3.16.
- Macro caso 2 usa Ecuaciones 3.2, 3.3 a 3.13.

3.1.1. Función objetivo

Macro caso 1

La función objetivo minimiza los costos operacionales (OC) de los molinos SAG mostrada en la Ecuación 3.1. Esta a la vez incluye el costo ciclaje de las baterías. De esta manera se puede simular el agotamiento de las baterías por su uso.

$$\begin{aligned} \min OC = & P_{con} \cdot C_{con} + (p_{max}^{imp} - P_{con}) \cdot C_{penalty} - \sum_{t=1}^T p_t^{exp} \cdot C_{exp} \cdot dt \\ & + \sum_{t=1}^T p_t^{imp} \cdot C_{imp} \cdot dt + \sum_{t=1}^T cc_t^+ \cdot \frac{Inv_{bat}}{N_{max}^{cycles}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

El primer término es el costo por la capacidad de potencia contratada. Los valores de P_{con} y C_{con} son parámetros constantes del problema y no variables de decisión. El segundo término es el costo por multa. Esta es una multa de sobreconsumo producida cuando se registra una potencia mayor a la capacidad contratada. El valor de la multa se calcula en base a solo el mayor sobreconsumo, dado por la resta entre el valor de la máxima potencia importada (variable de optimización) con la capacidad de potencia contratada. El tercer término corresponde a los ingresos por la venta o exportación de energía a la red, proveniente del excedente de la producción de energía solar fotovoltaica. El cuarto término corresponde a la compra o importación de energía de la red eléctrica. El último término corresponde al costo por ciclaje de las baterías, correspondiente a un costo por ciclo estimado en base a la inversión de capital del BESS dividido en el número máximo de ciclos que puede realizar en su vida útil. Cabe destacar que la definición de ciclo usada en este modelo es cuando se realiza un cambio de estado en las baterías de modo de descarga a carga, almacenándose las veces que ocurre esto en el contador cc_t^+ .

Macro caso 2

$$\begin{aligned} \min OC = & P_{con} \cdot C_{con} + (p_{max}^{imp} - P_{con}) \cdot C_{penalty} - \sum_{t=1}^T p_t^{exp} \cdot C_{exp} \cdot dt \\ & + \sum_{t=1}^T p_t^{imp} \cdot C_{imp} \cdot dt + \sum_{t=1}^T \left((p_t^{bdis} + p_t^{bch}) \frac{dt}{2E_{max}^{bat}} \frac{Inv_{bat} \cdot E_{max}^{bat}}{N_{max}^{cycles} (Soc_{max} - Soc_{min})} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

La diferencia entre la Ecuación 3.1 y esta Ecuación 3.2 es con respecto al último término que se refiere a los ciclos.

Se puede ver que en esta formulación se suma toda la energía que se cargó y se descargó en la batería y se multiplica por un factor que corresponde al costo por ciclo. En este caso, el costo por ciclo se calcula dividiendo la inversión total de la batería ($Inv_{bat} \cdot E_{max}^{bat}$) por el número de ciclos completos máximos de la batería expresado en energía. Hasta el final de la vida útil del BESS, sus otros parámetros (capacidad en potencia y energía y eficiencias) son considerados como constantes.

3.1.2. Restricciones del balance de energía del sistema

$$(p_t^{imp} - p_t^{exp} + p_t^s - p_t^{bch} + p_t^{bdis}) \cdot dt = P_t^{SAG} \cdot dt \quad \forall t \quad (3.3)$$

$$P_t^{SAG} = \sum_{i=1}^T a_{it} \cdot P_i^{SAG} \quad \forall t \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^T a_{it} = 1 \quad \forall t, \quad \sum_{t=1}^T a_{it} = 1 \quad \forall i \quad (3.5)$$

La ecuación 3.3 muestra el balance de energía entre la energía importada y exportada (p_t^{imp} y p_t^{exp}) desde la red, la energía solar generada por la planta fotovoltaica (p_t^s), la energía involucrada en las etapas de carga y descarga del BESS (p_t^{bch} y p_t^{bdis}) y la energía consumida por los molinos SAG (P_t^{SAG}).

Las Ecuaciones 3.4 y 3.5 son las que permiten la realización del DSM para el reordenamiento de la alimentación mineral al molino traducidos en consumos de potencia. Para efectos de la simulación que se va a llevar a cabo, se asume que el operador puede manejar la demanda de potencia del molino realizando un reordenamiento de los paquetes discretos de consumo de potencia, los cuales están asociados a la mineralogía de la alimentación. Esto quiere decir que el consumo del molino va a ser discretizado en paquetes de potencia por lapso temporal utilizado por el problema, como por ejemplo, consumo en periodos de 15 minutos. Estos paquetes de potencia van a poder ser movidos de su tiempo original de consumo P_i^{SAG} a donde el operador estime conveniente de tal manera de generar el consumo asociado del paquete en otro tiempo que produzca un mayor beneficio P_t^{SAG} . Todo esto ocurre sin modificar los valores de potencia por lo que el consumo total del día después de realizar el arreglo temporal, sigue siendo el mismo. Esto le permite dar al problema un grado más de libertad para la reducción de costos. Esta práctica estaría limitada por el tamaño y número

de *stockpiles*, lo cual no fue considerada en este análisis y modelamiento.

Para realizar lo anterior, se utiliza la matriz a_{it} (Ecuación 3.5). En el Modelo 1 (sin DSM), la matriz a_{it} es constante (es decir, no ocurren cambios en la demanda) y corresponde a la matriz de identidad. En el Modelo 2 (con DSM), corresponde a una permutación de la matriz de identidad que permite el reordenamiento del consumo histórico asegurando que cada elemento se utilice una sola vez (suma de cada fila y columna es igual a 1). El producto de $a_{it} \cdot P_i^{SAG}$ resulta en una nueva secuencia de consumo de potencia del molino SAG cuando se considera DSM.

3.1.3. Restricción de la máxima potencia importada

$$p_t^{imp} - p_{max}^{imp} \leq 0 \quad \forall t \quad (3.6)$$

$$P_{con} \leq p_{max}^{imp} \quad (3.7)$$

La potencia máxima importada, p_{max}^{imp} , se utiliza para calcular la multa por sobreconsumo de potencia sobre el valor de la capacidad de potencia contratada. Para esto, se utilizan las Ecuaciones 3.6 y 3.7, las cuales tienen la función de almacenar en la variable p_{max}^{imp} el valor máximo consumido.

Utilizando la Ecuación 3.6 es posible almacenar el valor máximo de la potencia consumida ya que se quiere tener siempre el menor valor de p_{max}^{imp} dado que este valor siempre sea mayor o igual a p_t^{imp} . Este corresponde a la importación de potencia desde la red en el tiempo t .

Al utilizar la Ecuación 3.7 se define que la potencia máxima importada es siempre mayor o igual a la potencia contratada, P_{con} . De esta forma se obtienen dos casos:

1. Si no hay sobreconsumo, p_{max}^{imp} toma el valor de P_{con} haciendo que la resta del segundo término de la función objetivo (Ecuación 3.1) sea cero, provocando que el costo de multa sea nulo.
2. Si hay sobreconsumo, p_{max}^{imp} toma el máximo valor del arreglo de variables p_t^{imp} haciendo que la resta del segundo término de la función objetivo (Ecuación 3.1) tenga un valor positivo, provocando que exista un costo por multa.

3.1.4. Restricciones del balance de energía en el BESS

$$soc_{t+1} \cdot E_{max}^{bat} = soc_t \cdot E_{max}^{bat} + p_t^{bch} \cdot \eta_{bch} \cdot dt - p_t^{bdis} \cdot \frac{1}{\eta_{bdis}} \cdot dt \quad \forall t \quad (3.8)$$

$$Soc_{min} \leq soc_t \leq Soc_{max} \quad \forall t \quad (3.9)$$

$$soc_1 = Soc_{ini} \quad (3.10)$$

$$soc_{T+1} = Soc_{final} \quad (3.11)$$

En la Ecuación 3.8 el balance de energía del BESS en el tiempo $t + 1$ ($soc_{t+1} \cdot E_{max}^{bat}$) es igual a la energía almacenada en el periodo pasado t ($soc_t \cdot E_{max}^{bat}$), sumado a la energía cargada ($p_t^{bch} \cdot \eta_{bch} \cdot dt$), menos la energía descargada ($p_t^{bdis} \cdot \frac{1}{\eta_{bdis}} \cdot dt$), considerado las pérdidas por conversión dadas por la eficiencia.

El arreglo de variables, soc_t , corresponde al estado de carga (SOC, *state of charge*) fraccional de la batería. Este estado de carga tiene un valor máximo y mínimo dadas por la tecnología de batería utilizada, restricciones mostradas en la Ecuación 3.9.

A diferencia de los demás arreglos que contienen t variables, soc_t contiene $t + 1$ variables debido a que en el balance de energía (Ecuación 3.8), se utiliza en el cuarto término el estado de carga en $t + 1$, necesitando una variable extra en el arreglo soc_t para poder definir la ecuación de balance para todo t .

Se definen los estados de carga iniciales y finales de la batería por las Ecuaciones 3.10 y 3.11, donde, en este trabajo en específico, se definió que $Soc_{ini} = Soc_{final}$. De esta manera el estado de carga inicial o final no influirían en la optimización, ya que si fuesen distintos, habría un delta de energía que la batería aportaría gratis al sistema (estado inicial mayor al final) o energía que se perdería en dejar con carga mayor la batería (carga inicial menor a la final).

3.1.5. Restricción de carga y descarga del BESS

En este modelo desarrollado se estableció que la vida útil de las baterías BESS se pueden modelar como un máximo número de ciclos que puede realizar de carga y descarga.

Para esto, se hace necesario definir que la batería no puede cargarse y descargarse al mismo tiempo (o en el mismo periodo temporal en este caso discreto) y a la vez, que la potencia de carga y descarga no puede ser mayor a la capacidad del BESS.

$$p_t^{bdis} - b_t^{dis} \cdot P_{max}^{bat} \leq 0 \quad \forall t \quad (3.12)$$

$$p_t^{bch} - (1 - b_t^{dis}) \cdot P_{max}^{bat} \leq 0 \quad \forall t \quad (3.13)$$

La Ecuación 3.12 asegura que la potencia de descarga del BESS, p_t^{bdis} , sea siempre menor al límite de su máxima capacidad, definido por la constante P_{max}^{bat} . En este caso se define el binario b_t^{dis} el cual define el estado de la batería en el tiempo t tomando el valor 1 cuando esta se encuentra descargando, y 0 cuando se está cargando.

De manera análoga se define la Ecuación 3.13 para la carga de la batería, asegurándose a la vez que la potencia de carga, p_t^{bch} , se mantenga bajo la capacidad de potencia del BESS. En este caso, se

utiliza $(1 - b_t^{dis})$ para definir cuando esta cargando (el contrario a la descarga).

3.1.6. Restricción del contador de ciclos de carga-descarga del BESS

Esta restricción le corresponde solo al Macro caso 1.

La definición de ciclos puede variar dependiendo de si se consideran ciclos fraccionarios o enteros, o en que momento se considera que se realizó un ciclo. Para este caso en específico, se consideran ciclos enteros y se cuenta como un ciclo el cambio de estado de carga a descarga sin importar cuanta energía administró. Para esto se estableció un contador de ciclos. Este corresponde a un número entero y está incluido en la función objetivo como un costo por ciclo, utilizado para minimizar el uso de la batería dependiendo de su tamaño e inversión.

$$b_t^{dis} - b_{t-1}^{dis} - cc_t^+ + cc_t^- = 0 \quad \forall t \quad (3.14)$$

$$cc_1^+ = 0 \quad (3.15)$$

$$cc_1^- = 0 \quad (3.16)$$

Utilizando el binario que define cuando se está descargando, b_t^{dis} , se puede saber cuándo ocurre un cambio de estado de carga a descarga, marcando de esta manera un nuevo ciclo. La Ecuación 3.14 es la encargada de marcar cuando esto ocurre, definiendo un contador binario, cc_t^+ , para registrar los cambios. La variable binaria cc_t^- es un auxiliar utilizado para efectos del contador.

Se tiene que al pasar de un periodo de carga a descarga, va a ocurrir que b_t^{dis} en el tiempo t toma el valor de 1, ya que comenzó a descargar, mientras que en $t - 1$, el binario tenía el valor de 0. En este caso la resta entre ambos, $b_t^{dis} - b_{t-1}^{dis}$, resultaría con valor 1, por lo que, según la Ecuación 3.14, la variable binaria cc_t^+ tendría que tomar el valor de 1 y cc_t^- el valor de 0 para cumplir con la restricción de igualdad. En ese momento, se registra un ciclo y consecuentemente, la suma de cc_t^+ corresponde al número total de ciclos de batería realizado en el periodo de tiempo simulado. A la vez, este contador de ciclos es utilizado en la función objetivo (Ecuación 3.1) para determinar el costo por ciclaje del BESS.

3.1.7. Límites inferiores y superiores de las variables de decisión

Cada variable tiene un rango de valores que puede adoptar como solución a la optimización. Estos se detallan a continuación en las siguientes ecuaciones.

$$0 \leq p_{max}^{imp} \leq P_{traf} \quad (3.17)$$

$$0 \leq p_t^{imp} \leq P_{traf} \quad \forall t \quad (3.18)$$

$$0 \leq p_t^{exp} \leq P_{traf} \quad \forall t \quad (3.19)$$

$$0 \leq p_t^s \leq P_t^{smax} \quad \forall t \quad (3.20)$$

$$0 \leq p_t^{bdis} \leq P_{traf} \quad \forall t \quad (3.21)$$

$$0 \leq p_t^{bch} \leq P_{traf} \quad \forall t \quad (3.22)$$

$$Soc_{min} \leq soc_t \leq Soc_{max} \quad \forall t \quad (3.23)$$

Cabe destacar que el valor de P_{traf} es muy grande para no limitar el valor de las variables de potencia, pero este podría ajustarse a un valor más realista en caso de que sea una limitante del sistema físico.

3.1.8. Descripción de los parámetros y variables

La nomenclatura y descripción de los parámetros y variables utilizados en el desarrollo de los modelos se resume en las dos siguientes tablas a continuación en las Tablas 3.1 y 3.2.

Cabe destacar que todas las variables y parámetros con sub-índice t corresponden a arreglos de variables o parámetros de dimensión T^1 , los cuales contienen sus valores para cada tiempo t .

Tabla 3.1: Variables de decisión utilizadas en el modelo.

Variable	Descripción	Unidades
p_t^{imp}	Potencia importada de la red en tiempo t	MW
p_t^{exp}	Potencia exportada a la red en tiempo t	MW
p_t^s	Potencia generada por el sistema fotovoltaica en el tiempo t	MW
p_t^{bdis}	Potencia descargada de las baterías en tiempo t	MW
p_t^{bch}	Potencia cargada de las baterías en tiempo t	MW
soc_t	Estado de carga de las baterías en tiempo t	-
p_{max}^{imp}	Potencia máxima comprada de la red durante el tiempo T	MW
a_{it}	Matriz de $(i \times t)$ variables binarias usadas para reordenar el consumo de potencia	-
b_t^{dis}	Variable binaria, 1 cuando el BESS se descarga en tiempo t	-
cc_t^+	Variable contador binario, 1 cuando el BESS comienza un ciclo de descarga	-
cc_t^-	Variable binaria, auxiliar para el contador	-
t	Índice para los pasos temporales de 1 a T ($t \cdot dt =$ tiempo actual en horas)	-
i	Índice de 1 a T	-

¹A excepción del estado de carga soc_t , que tiene dimensión $T + 1$.

Tabla 3.2: Parámetros utilizados en el modelo.

Parámetro	Descripción	Unidades
T	Número de pasos temporales	-
dt	Largo del paso temporal	Horas
C_{con}	Costo de la capacidad de potencia contratada	US\$/MW
$C_{penalty}$	Multa por sobreconsumo de potencia	US\$/MW/año
P_t^{SAG}	Consumo en potencia de los molinos SAG en tiempo t	MW
E_{max}^{bat}	Capacidad energética del BESS	MWh
P_{max}^{bat}	Capacidad máxima en potencia del BESS limitada por los inversores	MW
P_t^{smax}	Potencia máxima de generación solar en tiempo t	MW
C_{exp}	Precio de venta (exportación) de energía	US\$/MWh
C_{imp}	Precio de compra (importación) de energía	US\$/MWh
P_{con}	Capacidad de potencia contratada	MW
P_{traf}	Capacidad de potencia del transformador	MW
Soc_{min}	Estado de carga del BESS mínimo	-
Soc_{max}	Estado de carga del BESS máximo	-
Soc_{ini}	Estado de carga inicial del BESS	-
Inv_{bat}	Costo de inversión del BESS	US\$
N_{max}^{cycles}	Vida útil del BESS medido en ciclos	-
η_{bch}	Eficiencia de carga del BESS	-
η_{dis}	Eficiencia de descarga del BESS	-

3.2. Planteamiento matricial del problema de optimización

El modelo planteado corresponde a una optimización lineal entera mixta el cual es resuelto utilizando el programa MATLAB[®]. Este programa incluye una función llamada “intlinprog” que resuelve este tipo de problemas de forma matricial [62].

La optimización lineal entera mixta tiene la siguiente forma:

$$\min_x f^T x \text{ sujeto a } \begin{cases} x \text{ (intcon) son enteros} \\ A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (3.24)$$

Donde:

- f : Es un vector que contiene los coeficientes de la función objetivo.
- x : Es el vector de solución que minimiza el problema $f^T \cdot x$ sujeto a las restricciones.
- $intcon$: Es un vector que indica los valores de x que corresponden a enteros positivos.

- A : Es una matriz de valores constantes de las restricciones lineales de desigualdad.
- b : Es un vector de valores constantes de las restricciones lineales de desigualdad.
- A_{eq} : Es una matriz de valores constantes de las restricciones lineales de igualdad.
- b_{eq} : Es un vector de valores constantes de las restricciones lineales de igualdad.
- lb : Es un vector que corresponde a la restricción de límites inferiores de la variable x .
- ub : Es un vector que corresponde a la restricción de límites superiores de la variable x .

Las matrices y vectores deben construirse a partir de las restricciones del modelo planteado anteriormente, donde las restricciones con desigualdad componen la matriz A y el vector b , mientras que las restricciones con igualdad componen las matrices A_{eq} y el vector b_{eq} .

Las matrices y vectores del problema de optimización se construyen por líneas. Esto quiere decir que cada línea de A , b , A_{eq} y b_{eq} corresponde a una ecuación de restricción, dependiendo del tipo que sean. Además, las columnas corresponden a cada variable del sistema, y tienen que ser utilizadas en el mismo orden para todas las matrices y vectores.

3.3. Preparación de datos

Debido a la gran cantidad de datos con alta variación diaria, sumado al hecho de que existen las mantenciones y paradas de planta, se van a procesar los datos de tal manera de prepararlos para ser ocupados en un modelo.

Se decidió que se van a utilizar los datos con una menor resolución, en este caso de 15 minutos, para poder trabajar y analizar mejor los resultados. A la vez, se va a trabajar con un día tipo que sea representativo de los seis meses de datos disponibles. También se va a trabajar con la suma punto a punto de los consumos de los tres molinos disponibles para obtener así una curva general de los molinos.

Es necesario por lo tanto generar un día tipo para las curvas de generación de energía fotovoltaica y para el consumo en potencia del molino SAG.

3.3.1. Generación del día tipo

Para generar un día tipo representativo de todos los datos reales, se utilizó una función de MATLAB[®] llamada “Fuzzy c-means clustering” [56]. Esta función tiene la forma:

$$[\text{centers}, U] = \text{fcm}(\text{data}, N_c) \quad (3.25)$$

Donde:

- Data: matriz de datos que va a producir los clusters, con Nd filas correspondientes a Nd datos. Las columnas corresponden a la dimensionalidad de los datos.
- Nc: número de clusters a generar.
- Centers: corresponde a los centroides de los clusters generados por la función con Nc filas y tantas columnas como sea la dimensionalidad de los datos.
- U: no es utilizado para estos propósitos.

Para utilizar este método es necesario separar los datos en días (ya que se quiere hacer un día representativo), ordenándolos en una matriz, cuyas filas corresponden a cada día a ser procesado y las columnas a la resolución temporal de los datos (ya sea minutos o horas). Lo mismo se lleva a cabo con los datos de generación de energía solar para obtener un día tipo de generación.

La salida de la función al ingresar los datos en formato de día entrega directamente el día tipo a ser utilizado para ambos casos.

3.3.2. Estandarización temporal de los datos

Debido a que la resolución temporal de los datos del molino es de 1 minuto, es necesario disminuir la resolución y agregar los datos resultando en datos cada 15 minutos. Para esto se realiza un promedio de datos obteniéndose finalmente 96 datos correspondientes a un día.

En el caso de la generación de energía solar, es necesario aumentar la resolución temporal de una hora a 15 minutos. Debido a esto, se va a utilizar un función de interpolación unidimensional disponible en MATLAB[®] llamada “1-D data interpolation” [57]. Esta función tiene la forma:

$$vq = \text{interp1}(x,v,xq,\text{method}) \quad (3.26)$$

Donde:

- vq: Son los valores interpolados como output de la función.
- x: Son los puntos de posición de la muestra que va a ser interpolada.
- v: Son los valores de la muestra a ser interpolados.
- xq: Son los nuevos puntos de posición correspondientes a la interpolación.
- method: Es el método que se va a utilizar para interpolar.

La entrada a esta función es un vector con los valores de generación de energía solar con resolución horaria para un día, el cual es asignado a “v”. El vector de puntos de posición “x” corresponde a un arreglo de 1 a 24 horas correspondientes a cada hora del día. Como se quiere lograr una interpolación para obtener datos cada 15 minutos, se debe construir un vector “xq” que contenga la posición temporal de los nuevos datos interpolados, es decir, de 0.25 en 0.25 hasta 24 horas. El método utilizado en una interpolación lineal, por lo que “method” en este caso es “linear”. El resultado de la función se entrega en “vq” que contiene 96 datos de generación solar para todo un día.

3.4. Programación del modelo

La programación del modelo fue llevada a cabo en base a la Ecuación 3.24 y utilizando el optimizador integrado “intlinprog” para resolver el problema lineal entero mixto.

Cada Macro caso fue programado de forma separada ya que corresponden a distintos modelamientos del mismo problema, pero usando la misma lógica de programación. Ambas funciones son análogas con la diferencia en la formación de las matrices necesarias para la optimización, en donde estas recaen también en la formulación de las matrices y vectores.

Se escribió un programa de ejecución que se encarga de definir los valores de los distintos parámetros y preparar los datos que van a ser entregados al optimizador. Este llama de manera simultánea a dos funciones donde cada una corresponde a la optimización sin y con DSM. Ambas funciones definen las matrices y vectores a ser utilizados por el optimizador y a su vez, realizan la optimización obteniendo resultados que son reportados al usuario y retornados al programa de ejecución para su almacenamiento en variables.

El programa de ejecución comienza con la carga de los datos del día tipo del molino SAG agregado, obtener el vector de consumo del día tipo y cargar los datos de la generación de energía solar, vector que ya debería estar con el formato temporal adecuado de saltos de 15 minutos. Se prosigue en definir los distintos parámetros del problema asignándole valores a cada uno. Esta es una sección abierta al usuario en donde puede modificar a gusto cada valor para ajustarse al problema a ser modelado.

Luego de definir los parámetros y el costo por ciclo, se ajusta la curva de generación de energía solar máxima por el factor multiplicador de la planta solar (para aumentar o disminuir la planta base) y se llama a ambas funciones optimizadoras (con DSM y sin DSM), guardando los resultados de ambas funciones en las variables definidas al momento de llamarlas. Estos resultados son reportados al usuario, mostrando a la vez la multa de cada caso y el ahorro generado por realizar el proceso con DSM.

Por último, los resultados son graficados de forma separada en ambos casos de manera estándar en cinco gráficos por ventana para su visualización temporal de los datos para luego ser guardados en archivos de imagen. Estos gráficos incluyen el comportamiento general del modelo (balance energético), SOC, potencia de la batería, potencia FV utilizada y potencia consumida (antes y después del DSM). Además, se guarda en un archivo con una notación definida por los parámetros más importantes del problema los resultados de la optimización para poder ser cargados y ser procesados posteriormente. Esto se lleva a cabo ya que cada optimización puede tardar horas en completarse y se hace necesario poder acceder a los datos numéricos para poder realizar el estudio de cada caso y analizar las sensibilidades realizadas.

La programación de las funciones comienza con la definición de función con sus variables de salida (en paréntesis cuadrados) en un comienzo y las variables de entrada (en paréntesis redondos) a esta.

3.5. Resultados del modelo determinista

Para poder analizar los resultados obtenidos de los modelos se van a plantear diferentes casos de estudio para cada uno de los Macro casos.

3.5.1. Casos de estudio

Se va a utilizar la siguiente notación para este capítulo:

Tabla 3.3: Notaciones usadas para describir los casos de estudio.

Abreviación	Nombre
CB	Caso Base
MC1	Macro caso 1
MC2	Macro caso 2
M1.1	Modelo 1 del MC 1
M1.2	Modelo 2 del MC 1
M2.1	Modelo 1 del MC 2
M2.2	Modelo 2 del MC 2
C1.1	Caso 1 del MC 1
C1.2	Caso 2 del MC 1
C1.3	Caso 3 del MC 1
C1.4	Caso 4 del MC 1
C2.1	Caso 1 del MC 2
C2.2	Caso 2 del MC 2
C2.3	Caso 3 del MC 2
C2.4	Caso 4 del MC 2

Los casos de estudio contemplan realizar estudios de sensibilidades a cuatro variables de decisión. Con el caso 1 se estudiarán los efectos del cambio del tamaño de la planta solar FV (fotovoltaica), con el caso 2 la variación de la capacidad de la potencia contratada de la red, con el caso 3 la variación de la capacidad energética instalada del BESS y con el caso 4 la capacidad en potencia de las baterías BESS (capacidad del inversor).

Se utilizaron los mismos valores de parámetros para todos los casos de estudio. Estos son valores de referencia dados por la situación actual de mercado y recomendados por diversos expertos.

Los precios de compra y venta de energía son considerados como 86 y 72 US\$/MWh respectivamente, mientras que el costo de la capacidad de potencia contratada es de 43 US\$/MW. La multa por sobreconsumo de potencia son cargados de forma anual por el consumo máximo realizado en el periodo, considerándose un costo de 15 kUS\$/MW.

Las baterías BESS son consideradas como un banco de baterías de flujo plomo-ácido con una razón fija de su capacidad energética con su capacidad de potencia en 5 MWh por MW. Estas tienen un

costo de inversión de 110 kUS\$/MWh, una vida útil de 2000 ciclos y una máxima profundidad de descarga de 70 % [63] [64].

El SOC inicial y final del BESS se fijó en 50 %, mientras que el estado de carga máximo y mínimo que puede lograr la batería es de 90 % y 20 % respectivamente. La eficiencia de las baterías para la carga y descarga de energía se asumió como un 95 % para ambos casos.

Cabe destacar que se realizó un plan de costos de inversión del sistema a 30 años, considerando a la vez el reemplazo de los equipos a su debido tiempo. Se utilizó la inversión del BESS dada anteriormente junto a una inversión del parque fotovoltaico de 1770 kUS\$/MW [65], ambos con una tasa de descuento del 10 %.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo en un computador con un procesador Intel Core i7-3770k (octa-core de 3.5 GHz), 16 Gb de memoria RAM y almacenamiento en un disco duro SSD con suficiente memoria disponible para las simulaciones.

Macro caso 1

La siguiente tabla resume los casos a ser analizados en el MC 1:

Tabla 3.4: Definición de los casos en el MC 1.

Caso	Modelos usados	Pot. contratada MW	Planta FV MW	Cap. energ. del BESS, MWh	Cap. pot. del BESS, MW
C1.1	M1.1 & M1.2	43	0 – 100	10	2
C1.2	M1.1 & M1.2	40-43	20	10	2
C1.3	M1.1	41.5	20	0,1 – 100	2
C1.4	M1.1	41, 41.3, 41.5 41.8 & 42	20	10	0 – 3

El modelo 1 de este Macro caso tiene 866 variables donde 288 son binarias, mientras que el modelo 2 tiene 10082 variables de las cuales 9504 son binarias.

Macro caso 2

La siguiente tabla resume los casos a ser analizados en el MC 2:

El modelo 1 de este Macro caso tiene 674 variables donde 96 son binarias, mientras que el modelo 2 tiene 9890 variables de las cuales 9312 son binarias.

En general, el tiempo de ejecutar cada punto de los casos con el modelo 1 fue de 0.5 segundos, mientras que para el modelo 2, se requerían sobre 3 horas para lograr converger a un resultado, mostrando lo costoso computacionalmente que es realizar el DSM.

Tabla 3.5: Definición de los casos en el MC 2.

Caso	Modelos usados	Pot. contratada MW	Planta FV MW	Cap. energ. del BESS, MWh	Cap. pot. del BESS, MW
C2.1	M2.1	43	0 – 120	10	2
C2.2	M2.1 & M2.2	39.7-43	20	10	2
C2.3	M2.1	40.5 & 41.5	20	0,1 – 60	2
C2.4	M2.1	41, 41.2, 41.5 41.8 & 42	20	10	0 – 3

3.5.2. Caso base

El caso base fue definido para ver la contribución base que puede ser obtenida de integrar una planta FV junto a un BESS de tamaños fijos en el sistema SAG, considerándose costos de inversión.

Los parámetros utilizados son una capacidad de potencia contratada de 43 MW, una planta FV de 20 MW y un BESS con capacidad energética de 10 MWh y en potencia de 2 MW.

Este caso fue desarrollado con parámetros fijos para ambos modelos de ambos Macro casos obteniéndose resultados muy similares. En todos ellos se logra una reducción del costo operacional del 15.7 %, comparado a la situación sin la planta solar FV y el BESS. Al momento de considerar la inversión, este valor baja a 4.6 % de reducción de costos. La reducción de costo operacional puede ser vista gráficamente como el área entre la curva de consumo y la potencia comprada en la Figura 3.3. Debido a que la capacidad de potencia contratada supera el máximo consumo del molino SAG y que no hay un exceso de energía FV a ser exportada, el DSM no cumple ningún rol acá.

3.5.3. Resultados Macro caso 1

A continuación se mostrarán los resultados de los casos realizados en el MC 1.

C1.1: Impacto del tamaño de la planta de energía solar FV

Las simulaciones del C1.1 muestran los diferentes comportamientos del sistema en respuesta a los cambios del tamaño de la planta y generación de energía FV, medida como la generación punta que se logra.

El escalamiento de la planta se hace mediante un factor que se multiplica por todos los valores de la generación de energía solar de la planta base de 2 MW.

Se obtuvo que plantas solares de mayor tamaño contribuyen a los ahorros operacionales en un orden de $0.9 \%/MW_{FV}^2$.

²MW de energía solar fotovoltaica

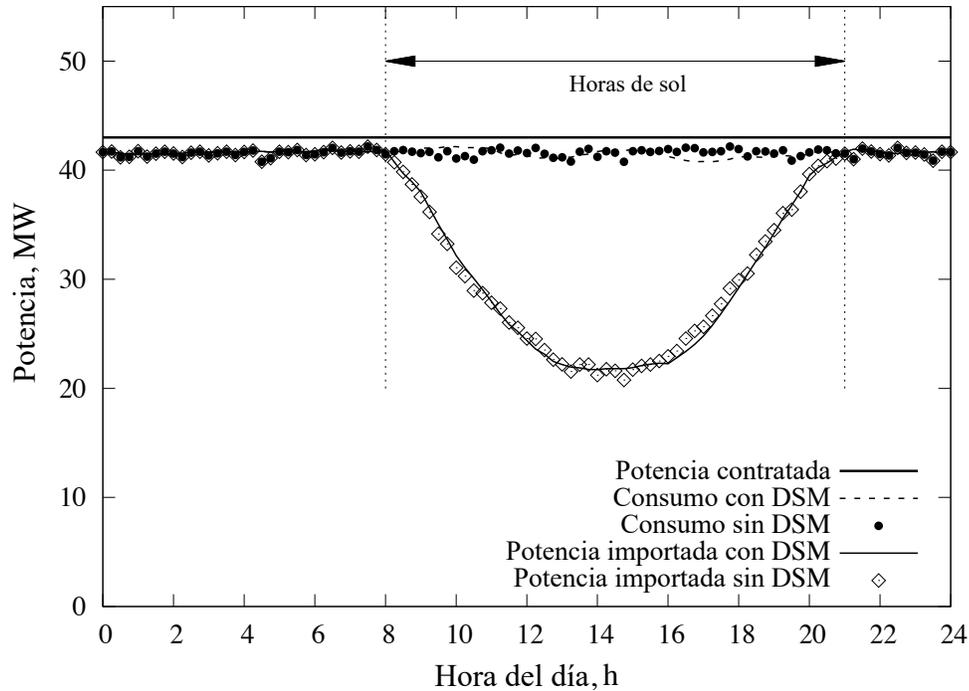


Figura 3.3: Potencia comprada con y sin la planta FV y BESS.

Como el ciclaje del BESS es costoso, este tiene un uso muy limitado para plantas FV pequeñas. De hecho la energía comprada de la red es la misma que la demanda del molino por la noche, mientras que la planta FV provee energía suplementaria durante el día, mientras que el BESS no muestra actividad alguna.

Sumado a lo anterior, el DSM no toma ningún rol importante en la reducción al considerar plantas solares FV pequeñas debido a que no hay ningún exceso de energía que administrar.

A pesar de esto, cuando se consideran plantas solares FV mayores que el máximo consumo, como se puede ver en los valores sobre 45 MW aproximadamente en la Figura 3.4, el BESS comienza a ciclar demostrado que empezó a administrar energía. Este se descarga antes de que la generación de energía solar comience para poder cargarse durante el día. Es en este momento que el DSM toma un importante rol como administrador de la energía, debido a que sin DSM, esta energía FV extra tiene que ser vendida a un precio menor del de compra, ya que no puede ser administrada más allá de los límites del BESS, produciendo que el ahorro obtenido sea de $0.4\% / MW_{FV}$, menor a las plantas más pequeñas. Al considerar el DSM, este ahorro no disminuye de manera tan drástica a $0.7\% / MW_{FV}$, lo cual es debido al límite posible de la administración del mineral y la venta de energía.

Considerando la inversión, se podrían obtener ahorros potenciales de 96.9 kUS\$/MW/año considerando plantas solares FV hasta los 45 MW. Después de ese tamaño se debe calcular de forma puntual los ahorros potenciales. A modo de ejemplo, con una planta solar FV de 60 MW, los ahorros potenciales son de 64 kUS\$/MW/año sin DSM, mientras que con DSM se obtienen ahorros de 90.2 kUS\$/MW/año.

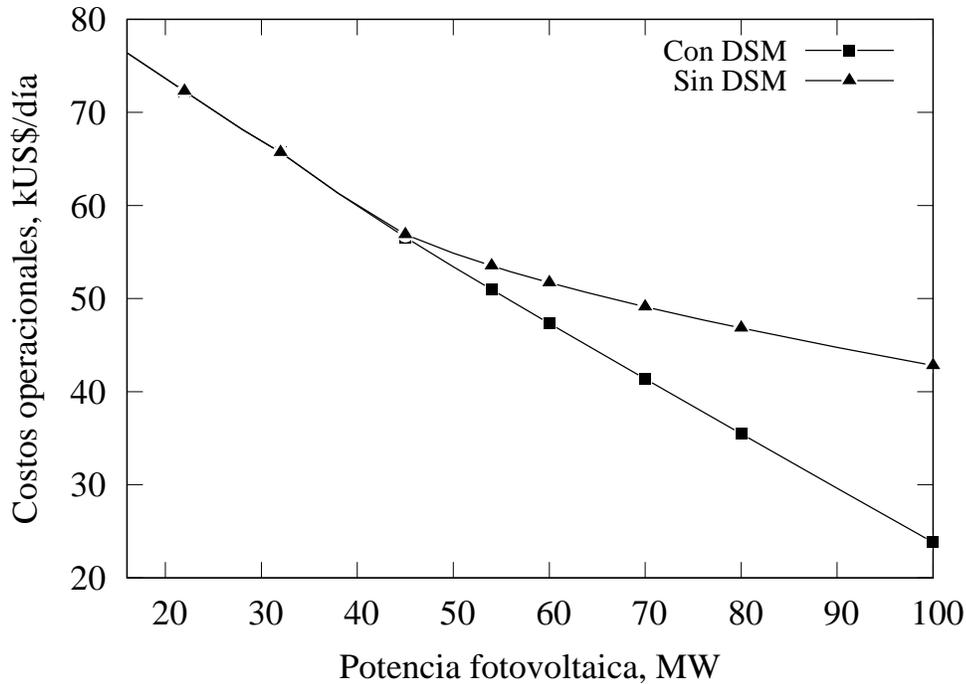


Figura 3.4: Costo operacional según la disponibilidad de energía FV.

1.2: Impacto de la capacidad de potencia contratada

Los resultados del C1.2 muestran que la optimización de la alimentación del molino juega un importante rol para tomar decisiones sobre la potencia contratada. Debido a los grandes costos de las multas, estas no deberían ocurrir, por lo que siempre hay que mantener los consumos bajo este límite.

La potencia contratada mínima para este caso en específico en donde se evitan las multas es de 41.28 MW. Este límite puede ser disminuido hasta 40.83 MW si es que se realiza el DSM. Al realizar simulaciones cercanas a ese límite, se puede ver claramente el actuar lógico que debería tener el DSM para la mayor reducción de costos en la Figura 3.5, en donde se asignan los mayores consumos al periodo donde se tiene generación de energía solar.

Debido al alto costo de las multas, el BESS muestra una importante actividad a pesar del costo del ciclaje para evitar que el sobreconsumo ocurra. Esto se puede ver en la Figura 3.6 en donde para las capacidades de potencia contratada entre 41.28 MW y 41.8 MW para el caso sin DSM, hay un leve aumento de los costos debido al ciclaje de las baterías, el cual bajo los 41.2 ya no es posible evitar la multa. Algo similar ocurre para el caso con DSM, donde este debe incurrir en el ciclaje de las baterías en el rango de 40.83 MW y 41.1 MW para evitar la multa ya que el DSM está en su óptimo.

C1.3: Impacto de la capacidad energética del BESS

La capacidad energética del BESS va a ser un factor determinante en cuanto a la reducción de la multa en los casos más ajustados. En el C1.3 se puede ver que con una potencia contratada de 41.5 MW, existe la posibilidad de incurrir en las multas si es que la batería es muy pequeña. Se vio en

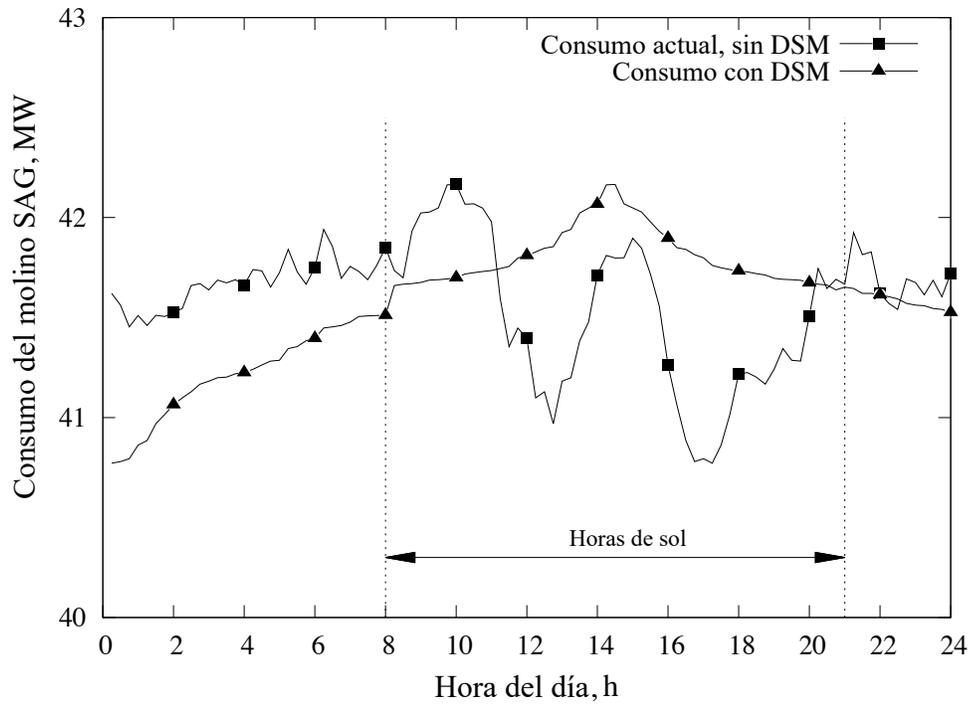


Figura 3.5: Operación del molino SAG, consumos con y sin DSM.

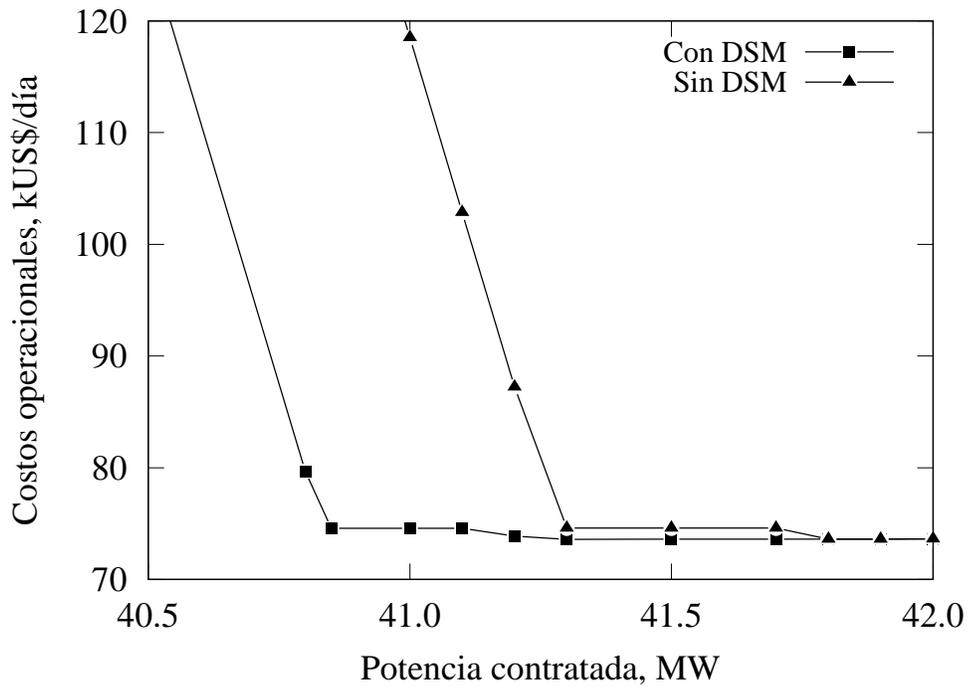


Figura 3.6: Costo operacional según la variación de la capacidad de potencia contratada.

el caso anterior que este valor se encuentra dentro del rango en donde sin DSM hay un pequeño aumento de costo por el ciclaje, por lo que el BESS tiene actividad con esa potencia contratada.

Se va a producir un punto de mínimo costo operacional a medida que se reduce la capacidad energética de las baterías antes de que se produzca la multa y se disparen los costos. Esto se puede ver gráficamente en las Figuras 3.7 y 3.8 en donde se pueden reducir costos al disminuir el tamaño de la batería hasta cierto punto. Este punto se puede ver claramente en el gráfico donde para este caso se ubica en los 4.5 MWh. Después de este punto, los costos operacionales comienzan a subir debido a la naturaleza del ciclo definido para el MC1. Debido al valor de la potencia contratada, es necesario si o si realizar un ciclo de batería. Este costo de ciclo va a aumentar dependiendo del tamaño de la batería ya que este depende de la inversión. Por lo tanto, el aumento lineal de costos después del mínimo es debido al aumento lineal del costo de ciclo.

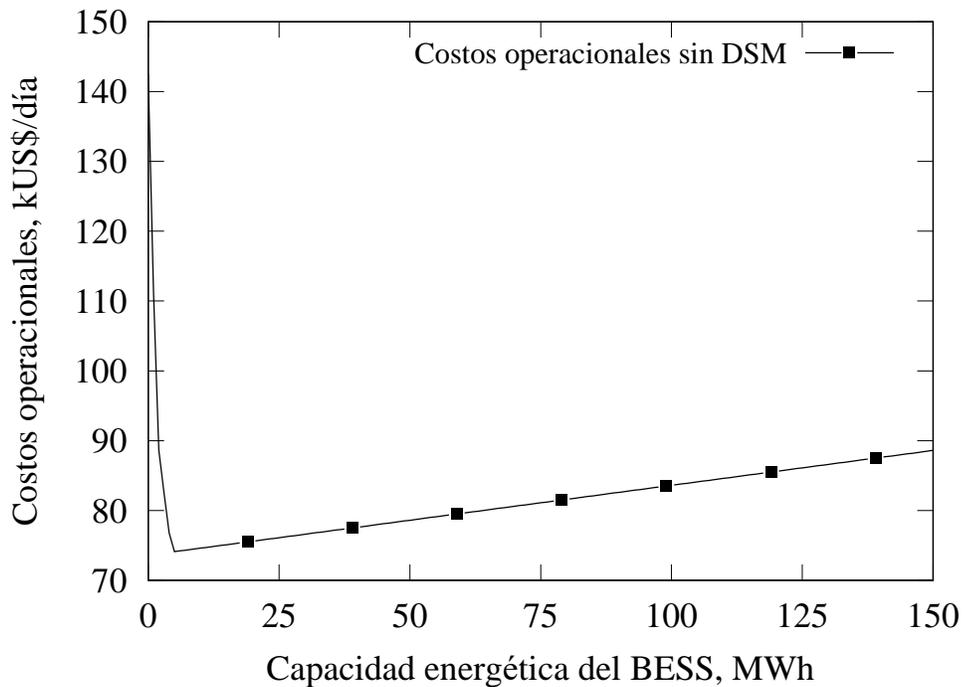


Figura 3.7: Costo operacional según la variación de la capacidad energética del BESS a gran escala.

Debido a que el estado de carga inicial y final de las baterías es el mismo, estas no aportan energía al sistema más que mayores posibilidades de mejor administración. Por ello una batería de mayor tamaño no disminuye los costos, si no que evita las multas.

C1.4: Impacto de la capacidad de potencia del BESS

Los resultados del C1.4 muestran que un aumento de la capacidad de potencia del BESS genera ahorros lineales como se pueden ver en la Figura 3.9. Estos ahorros se son del orden de 150 kUS\$/MW de BESS. A pesar de lo anterior, este ahorro tiene un límite de saturación, donde mayores capacidades de potencia no disminuyen los costos.

El límite de saturación depende de la potencia contratada, donde para una menor potencia contratada, es necesario tener un BESS mayor.

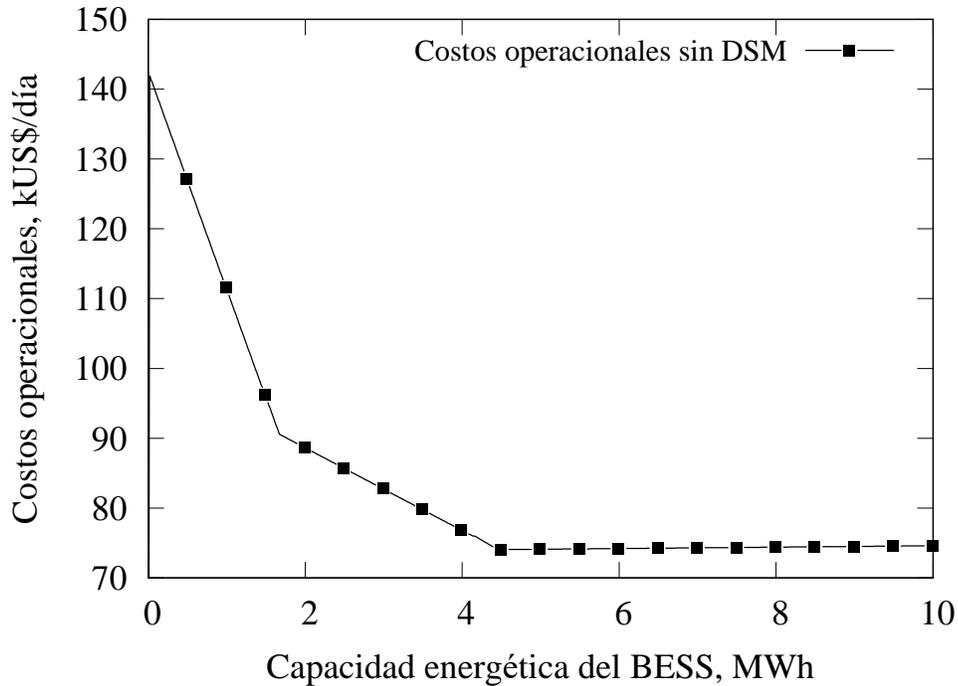


Figura 3.8: Costo operacional según la variación de la capacidad energética del BESS a pequeña escala.

Cabe destacar que esta reducción de costos es más que nada una reducción de la multa, es decir, que el punto de saturación es el punto en donde ya no se produce multa. La excepción a esto son los casos en donde se tiene una potencia contratada bajo los límites vistos en la Figura 3.6, como la curva de potencia contratada de 41 MW, en donde el punto de saturación es el punto donde se llega a la mínima multa a pagar posible, siendo esta de naturaleza inevitable. Por lo tanto, la diferencia entre la curva de estabilización de esta con las otras es la multa que se está pagando.

3.5.4. Resultados Macro caso 2

A continuación se mostrarán los resultados de los casos realizados en el MC 1.

C2.1: Impacto del tamaño de la planta de energía solar FV

Las simulaciones para este caso muestran un diferente comportamiento dependiendo del tamaño de la planta FV. Grandes plantas solares contribuyen un ahorro operacional del orden del 0.78 %/MW_{FV}, reduciéndose a 0.22 %/MW_{FV} cuando se consideran los costos de inversión. Para este caso, M2.1 y M2.2 dan los mismos resultados, por lo que no se hará diferencia y se hablará solo del M2.1.

Los ciclos del BESS al ser definidos en base a la energía procesada y teniendo la posibilidad de hacer ciclos fraccionarios, se limita aun más el uso de las baterías en los distintos casos y simulaciones. Particularmente, el uso del BESS es muy limitado cuando la potencia contratada es mayor que el máximo consumo del SAG, el cual es 42.17 MW. De hecho, la energía importada es igual a

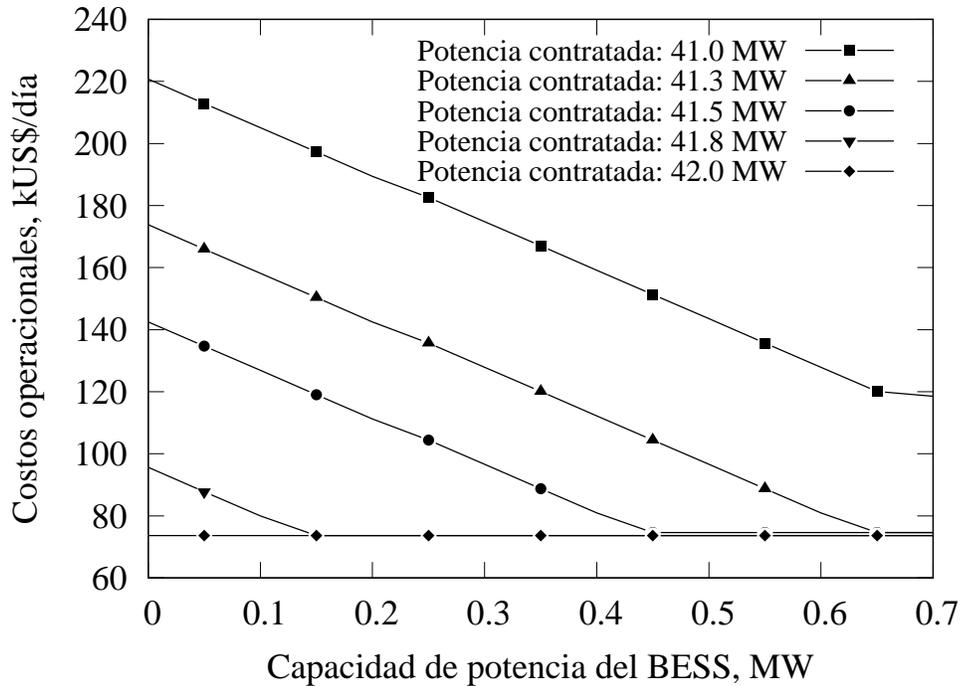


Figura 3.9: Costo operacional según la variación de la capacidad de potencia del BESS.

la energía consumida durante la noche mientras que esta es menor durante el día ya que la energía FV funciona como suplemento, dejando el BESS sin actividad alguna. Sumado a lo anterior, el DSM no tiene ninguna influencia sobre los resultados con plantas solares FV pequeñas. Esto es debido a que no hay valor en administrar energía si no hay exceso para ser administrado.

Por otra parte, cuando la energía FV es mayor que el máximo consumo durante el día, el sistema prefiere exportar energía que administrarla utilizando el BESS, provocando que este entre a ciclar. En este punto la curva de costo total³ deja de ser lineal y comienza progresivamente a aumentar su pendiente. Esto se explica por la diferencia entre el precio de compra y venta de energía desde y hacia la red. Aproximadamente, esta nueva curva tiene un ahorro de costos de un $0.2/MW_{FV}$.

Se vio el hecho de que el consumo máximo que ocurre durante el día en los periodos de mayor generación de energía solar son influyentes hacia cuando se quiebra la linealidad del ahorro de costos. Para ver este efecto, se alteró la curva de consumo del SAG inicial manteniendo un valor constante durante el día y concentrando los demás consumos durante la noche, manteniendo siempre la misma cantidad de energía total original. Una ilustración de esto se puede ver en la Figura 3.10 en donde se graficaron la curva original de consumo, junto a una curva con un consumo máximo durante el día de 30 MW y otra de 35 MW. Después de generar las curvas de costos se comprobó el hecho de que en esos valores se produce el quiebre de la linealidad, disminuyendo el ahorro potencial por MW_{FV} . Aquí recae la importancia del DSM donde, si este es capaz de asignar los valores altos de consumo durante el día, se puede extender la parte lineal de la curva obteniendo mayores beneficios por MW_{FV} . En el gráfico, la línea punteada muestra una continuación de la parte lineal de la curva, mostrando en definitiva el potencial ahorro que se podría lograr con la planta FV si toda

³Se considera como costo total la suma del costo de operación más la inversión, sin considerar el costo por ciclaje del BESS.

esa energía es utilizada por los molinos SAG y nada es vendido a la red. Por ende, las simulaciones muestran que asignar los mayores consumos al día, dejando los menores de noche tal cual como se muestra en la Figura 3.5, le permite al sistema tomar ventaja de la mayor cantidad de energía disponible, que en este caso es la energía solar, durante el día.

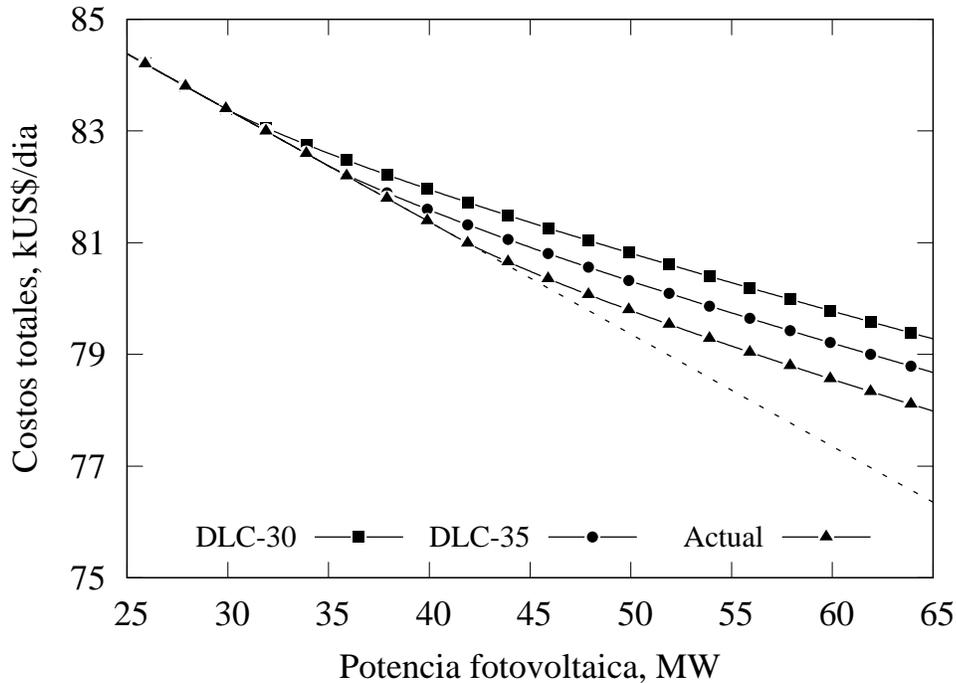


Figura 3.10: Costo total de operar los molinos SAG como función de la disponibilidad de energía FV sin DSM, considerando el máximo consumo actual (~42 MW) y con un consumo máximo durante el día de 30 MW y 35 MW.

C2.2: Impacto de la capacidad de potencia contratada

Los resultados de este caso muestran la importancia del DSM y su importante rol como factor para tomar decisiones sobre la capacidad de potencia contratada. Esto ocurre especialmente cuando se quiere disminuir la potencia contratada, donde no manejar correctamente el consumo puede llevar a tener que sufrir importantes multas.

En este caso si ocurren diferencias entre la operación con y sin DSM, por lo ambos modelos van a ser diferenciados. Se van a tomar como base las curvas mostradas en la Figura 3.5.

En la figura 3.11 se puede ver la mínima capacidad de potencia contratada en donde no ocurrirían multas por sobreconsumo. Cuando se considera la curva original sin DSM del consumo, el mínimo es 41.2 MW, mientras que si se realiza el DSM de manera apropiada, este valor se puede reducir hasta los 40.7 MW.

Como es esperado, mientras la potencia contratada sea alta, el BESS no muestra actividad alguna ya que no tiene que manejar la energía para evitar las multas. Pero al disminuir esta potencia contra-

tada, el BESS comienza a funcionar. Cabe destacar que en la Figura 3.11 no se muestran incluidos en los costos totales el costo de ciclaje del BESS.

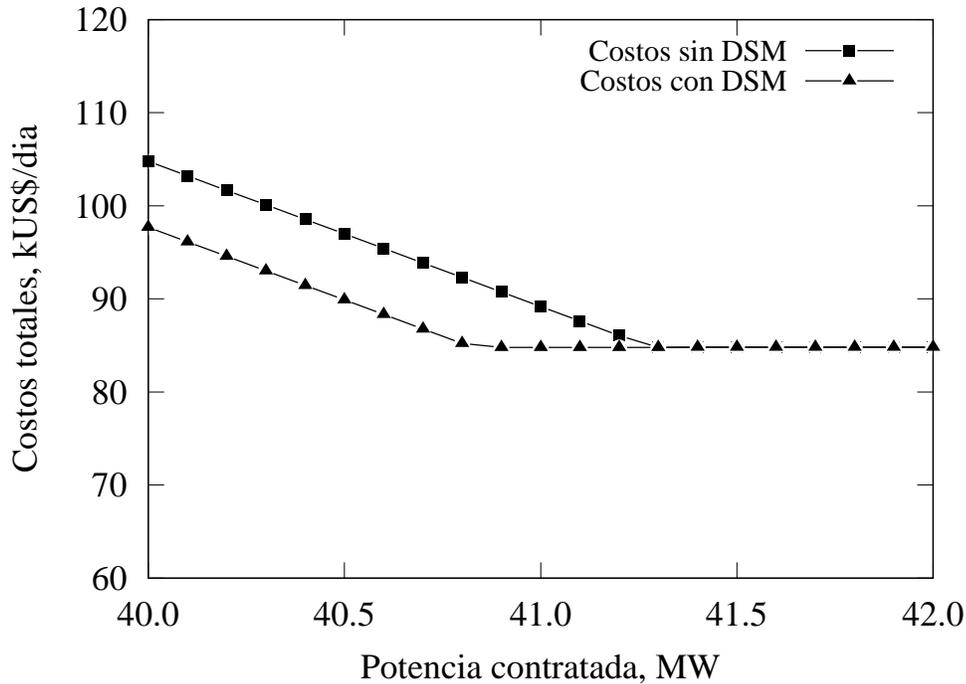


Figura 3.11: Costo total de operar los molinos SAG como función de la variación de la capacidad de potencia contratada.

Al simular en el punto de los 40.7 MW de potencia contratada, se obtiene la curva de DSM que se está considerando (Figura 3.5). Esta curva resultó ser la curva que minimiza en todos los casos el valor de la función objetivo para el modelo de DSM, es decir, es la curva que produce el mínimo global. Se produce el efecto de que al momento de realizar la simulación en un escenario que no está al límite de la multa, genera un DSM distinto a la curva mostrada, resultando ser un óptimo local, ya que esa curva sirve para valores superiores de potencia contratada analizada, pero no es la curva óptima para valores inferiores.

Es importante destacar que la disminución de la potencia contratada no significa una mayor reducción de costos como es visto en la Figura 3.11, si no que se lleva a cabo como medida de estabilización de la compra de energía de la red al punto que se fijó la potencia contratada, complementando la energía restante con la generación de energía solar FV.

C2.3: Impacto de la capacidad energética del BESS

El C2.3 analiza la importancia de la capacidad energética del BESS. La Figura 3.12 muestra que se puede alcanzar un costo mínimo dependiendo de la potencia contratada a la vez.

Para una potencia contratada de 41.5 MW en este escenario, el mínimo se alcanza con un BESS con capacidad energética de 4.4 MWh, mientras que con una potencia contratada de 40.5 MW, el

mínimo se alcanza con un BESS de 30.2 MWh.

A la izquierda del mínimo, los costos se incrementan debido al sobreconsumo y por ende, se incurre en multas. Para BESS mayores al que produce el mínimo, los costos comienzan a crecer linealmente debido al efecto de la inversión y la necesidad de reemplazo, que aumentan por cada MWh de BESS incrementado.

La importancia de este gráfico radica en la elección del BESS óptimo necesario para manejar de forma eficiente la energía y prevenir además el sobreconsumo. Debido a que el estado de carga inicial y final del BESS es el mismo, las baterías no aportan en ninguna reducción de costos adicionales.

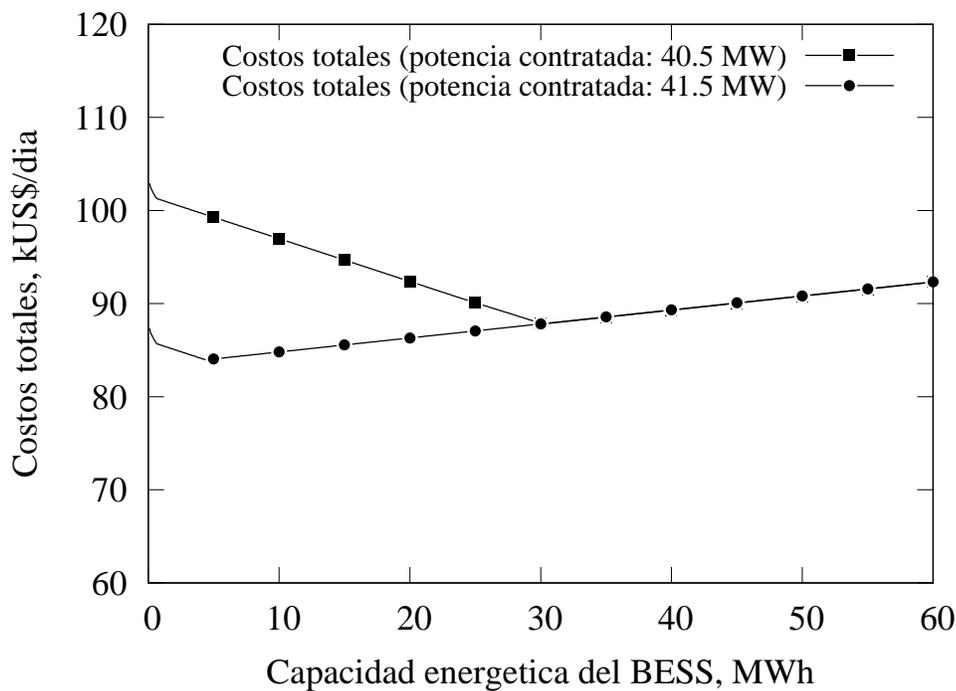


Figura 3.12: Costo total de operar los molinos SAG como función de la variación de la capacidad energética del BESS.

C2.4: Impacto de la capacidad de potencia del BESS

Los resultados del C2.4 muestran que un aumento de la capacidad de potencia del BESS produce ahorros que dependen también de la potencia contratada, como se puede ver en la Figura 3.13.

Los ahorros potenciales muestran un punto de saturación donde, en este caso de estudio, es alcanzado con un BESS de 0.15 MW para una potencia contratada de 41.8 MW, 0.45 MW para 41.5 MW y 0.7 MW para 41.2 MW y 41 MW. Para 42 MW se puede ver que los costos se mantienen prácticamente constantes. Esto muestra la fuerte relación entre la potencia contratada y el tamaño de las baterías. Como es esperado, mientras más baja sea la capacidad de potencia contratada, mayor tiene que ser el tamaño del BESS para compensarlo.

Hay una máxima capacidad de potencia del BESS hasta donde es efectiva la reducción de costos. Como fue mencionado, este punto de saturación está relacionado con la potencia contratada. Para potencias contratadas de 41.5 y 41.8 MW, se puede ver que las capacidad de potencia del BESS se saturan en la misma curva que con una potencia contratada de 42 MW, mientras que para potencia contratadas de 41.2 y 41 MW, el punto de saturación ocurre sobre la curva de 42 MW.

En general, un aumento de la capacidad de potencia del BESS permite una mayor reducción de la potencia contratada. A pesar de esto, como la planta solar FV se mantiene constante en este caso, una reducción de la potencia contratada en cierto punto no va a poder ser compensada por un aumento de la capacidad de potencia del BESS y, por ende, se produciría un sobreconsumo provocando multas por un déficit del balance energético. Esto puede ser inferido por el salto de costos entre las potencias contratadas de 41.2 y 41 MW, considerando los BESS con capacidades mayores a 0.7 MW.

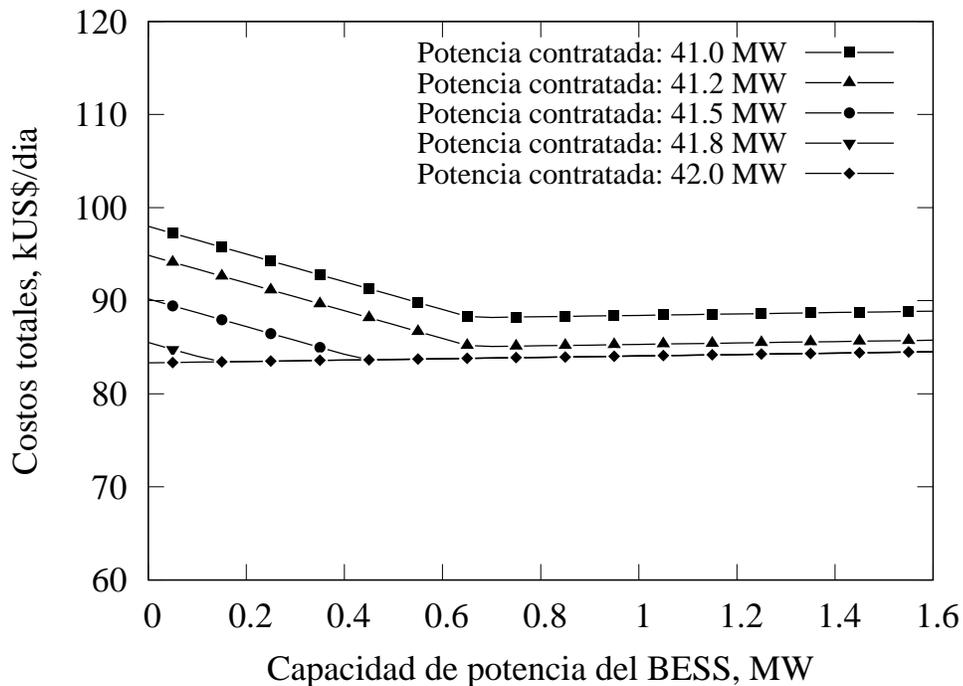


Figura 3.13: Costo total de operar los molinos SAG como función de la variación de la capacidad de potencia del BESS.

3.5.5. Impacto del DSM

El DSM tiene un gran impacto en como es utilizada la energía solar FV y sobre la inversión que es necesaria hacer en el sistema BESS y FV. A pesar de que el consumo total del molino SAG no se modifica con el DSM, su implementación permite una integración más profunda de la energía solar en el proceso.

El DSM asigna el mineral más duro (que tiene un mayor consumo energético) durante el día y el más blando durante la noche, resultando en una compra energética de la red más pareja. Además,

permite reducir la potencia contratada sin incurrir en costos por multas de sobre consumo.

Sumado a lo anterior, el DSM permite en un escenario de planta solar FV y potencia contratada constantes, reducir el tamaño necesario de las baterías (ya sea de capacidad energética y de potencia) y, por lo tanto, reducir la inversión necesaria para obtener mejores resultados. A pesar de todo esto, los costos asociados a realizar el DSM no son considerados en este estudio.

3.5.6. Resumen de resultados

A continuación se presenta la Tabla 3.6 en donde se resumen los principales resultados obtenidos con la optimización determinista.

Tabla 3.6: Resumen de resultados optimización determinista.

Caso	Variable	Resultados principales
1	Tamaño FV	<ul style="list-style-type: none"> ● Se obtienen ahorros de $0.2 \%/MW_{FV}$ para todos los escenarios. Una planta FV de 100 MW producen 20 % de ahorros. ● El efecto de la potencia contratada no fue considerada en este caso. ● El DSM tiene una importante influencia sobre la potencial reducción de costos. ● Los efectos del BESS no fueron considerados en este caso.
2	Potencia contratada y DSM	<ul style="list-style-type: none"> ● El efecto del tamaño de la planta FV no fue considerada en este caso. ● La potencia contratada puede ser reducida con DSM, en este caso, el mínimo es reducido de 41.2 a 40.7 MW. ● El DSM muestra un potencial de reducción de costos de un 10 %. ● EL BESS no tiene un importante rol con altas potencias contratadas, mientras que con bajas potencias contratadas el BESS ayuda a evitar multas.
3	Capacidad de energía del BESS	<ul style="list-style-type: none"> ● Mayores capacidades energéticas del BESS no contribuyen a mayores ahorros debido al tamaño limitado de la planta FV en este escenario. ● Mayores capacidades energéticas del BESS permiten menores potencias contratadas. ● El efecto del DSM no fue considerado para este caso. ● Para potencias contratadas de 41.5 y 40.5 MW, las capacidades de energía resultantes son 4.4 y 30.2 MWh.
4	Capacidad de potencia del BESS	<ul style="list-style-type: none"> ● Mayores capacidades de potencia del BESS no contribuyen a mayores ahorros debido al tamaño limitado de la planta FV en este escenario. ● Hay una mínima capacidad de potencia del BESS necesaria para evitar las multas asociadas a cada potencia contratada. ● El efecto del DSM no fue considerado para este caso. ● Para una potencia contratada de 41.5 MW, la capacidad de potencia del BESS es 0.45 MW.

Capítulo 4

Desarrollo del modelo estocástico

Debido a la naturaleza del problema que se está analizando, no es ajeno pensar en la incertidumbre asociada a este, y cómo puede afectar esta incertidumbre al dimensionamiento de una planta para que esta funcione con el mayor grado de certeza posible frente a posibles multas.

Por lo anterior, se replanteó el problema para realizar una optimización estocástica incluyendo la variabilidad e incertidumbre de la generación de energía solar y de la dureza del mineral. Para poder ver de manera más notoria el efecto de la variabilidad, se extendió el horizonte temporal de la optimización a un año, en resolución horaria.

La estrategia a seguir para implementar un modelamiento estocástico del problema va a ser la de utilizar una gran cantidad de casos aleatorios de las variables con incertidumbre dentro de una misma optimización para obtener el valor esperado de la variable y utilizar esta para dimensionar la planta de energía solar más baterías y potencia contratada necesarios. Debido a esto, se va a realizar un modelamiento en tres partes. La primera parte corresponde al modelamiento de la incerteza solar, en donde se va a buscar generar años de generación de energía solar aleatorios que cumplan con las condiciones de que la variabilidad y estadísticas sean similares a los datos originales, pero además deben cumplir que las transiciones de un tipo de día a otro (por ejemplo soleado a nublado, etc.) sean lógicas y sigan la tendencia. La segunda parte corresponde a generar una secuencia de extracción de mineral que va a alimentar a la planta. Para esto se va a utilizar un plan minero basado en la extracción de mineral caracterizado por unidades geometalúrgicas dependientes de su distribución de un parámetro de dureza que van a alimentar a la planta. Se considera además la posibilidad de manejar la dureza del mineral con diversos *stockpiles*. Por último, estos dos modelos alimentan a un marco general, el cual integra todo y contiene la optimización en general.

4.1. Modelamiento de la estocasticidad solar

El pronóstico del clima en Atacama es bastante certero de un día para otro, pero cuando se quiere conocer lo que va a ocurrir para todo un año siguiente, se vuelve complicado, en especial conocer con certeza el número de días malos consecutivos seguidos (nublados por ejemplo). Esto impacta en las decisiones de inversión ya que el tamaño de la planta y contratos se definen en un momento presente, pero los días críticos podrían venir después de varios años. Por esto mismo se debe considerar varios escenarios para la toma de decisiones.

Debido a la necesidad de tener una cantidad considerable de distintos años solares, los cuales sean de características y comportamiento similares en cuanto al clima, se van a utilizar datos reales para la generación de diversos datos aleatorios utilizando un algoritmo basado en Cadenas de Markov.

El primer paso es obtener los datos a ser utilizados como base. Como se necesita más de un año para poder tener el comportamiento de transición de un día a otro de manera más representativa, no se podían utilizar los datos solares obtenidos anteriormente. Por esto se recurrió a la página web del Explorador Solar del Ministerio de Energía con el Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile [66]. Este recurso de libre acceso entrega información sobre la irradiancia solar con resolución a 90 metros de datos de los años 2004 al 2016. Además, cuenta con modelos integrados en la página para poder generar a partir de la irradiancia, valores de potencia fotovoltaica a una resolución horaria dependiente de la tecnología seleccionada. Para este caso se obtuvieron datos de un lugar en el Desierto de Atacama con la ubicación geográfica determinada por: Lat=-26.4088, Lon=-70.0269 y altura=869 m.s.n.m. Se simuló la generación de energía utilizando paneles solares de seguimiento horizontal uniaxial (Este-Oeste), con cobertura anti-reflectante y factores de pérdidas del 10 %, eficiencia del inversor del 1 % y coeficiente de temperatura de $-0.5 \%/^{\circ}\text{C}$.

Luego de obtener los datos, es necesario realizar una clasificación para poder aplicar las Cadenas de Markov. Se va a asignar una clasificación cualitativa a cada día según su energía diaria generada. Esta calificación va a ser por cuatro secciones en excelente, bueno, moderado y malo. Para poder normalizar a un indicador los valores y considerar la estacionalidad de cada mes (de esta manera se pueden comparar todos los días del año por igual), se dividió cada cantidad de energía generada diaria por el máximo generado en el transcurso de los 13 años de un día en el mes correspondiente. Es decir, se obtienen 12 valores referentes (uno para cada mes) los cuales son el máximo valor que va a ser la máxima generación posible de ese mes. La división del valor diario con el máximo mensual correspondiente entrega la fracción del máximo posible que se generó en ese día específico. Se construyó un histograma para visualizar la distribución de los datos y decidir sobre qué porcentajes separar. Este histograma se puede ver en la Figura 4.1.

Utilizando este histograma, se establecen los rangos de los cuatro segmentos según la cantidad de ocurrencias de cada fracción, los cuales son mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Rangos utilizados para la clasificación de días solares.

Clasificación	Rango	
Excelente	100 %	95 %
Bueno	95 %	85 %
Moderado	85 %	60 %
Malo	60 %	0 %

Una vez clasificados todos los días, se procede a fabricar una matriz de transición. Esta matriz representa cuantas veces pasó un tipo de día a otro (por ejemplo, cuantas veces ocurrió que de un día bueno pasara a un día excelente), permitiendo calcular una probabilidad de ocurrencia de cada transición independiente para cada mes. Esta probabilidad de transición es utilizada por el algoritmo de Cadenas de Markov. El método de Cadenas de Markov utilizado es el del modelo simple

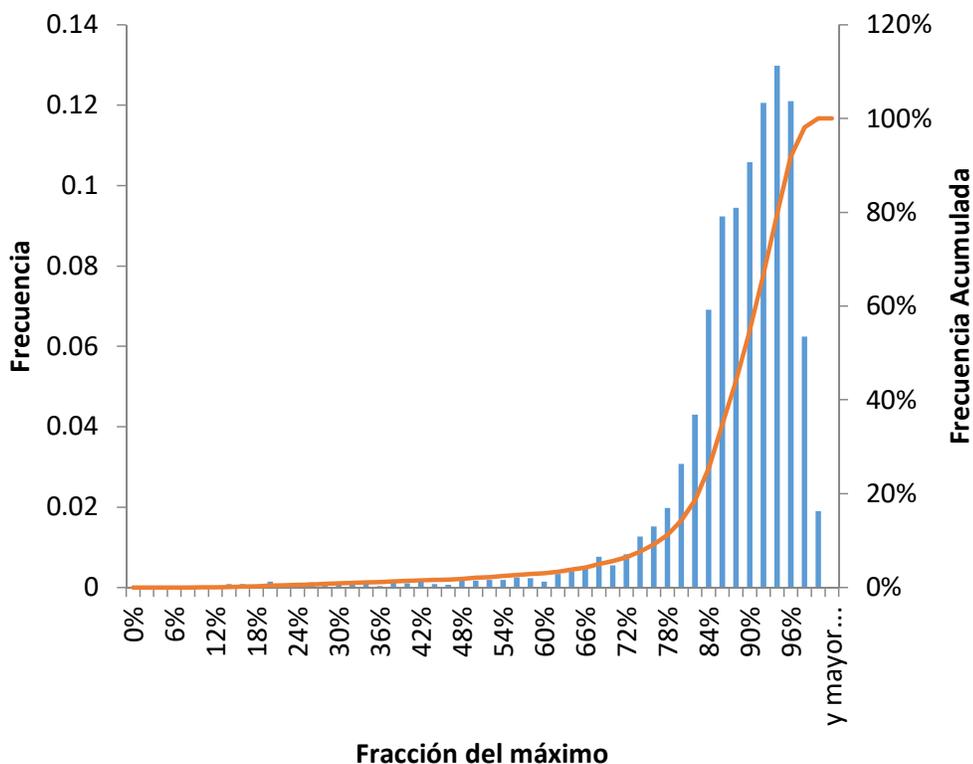


Figura 4.1: Histograma de la frecuencia de las distintas fracciones del máximo solar diario.

linear autoregresivo. Este consiste en que se determina un evento basado en el que ocurrió anteriormente, de manera independiente al resto de la línea temporal [67]. Por lo tanto, utilizando las probabilidades de transición se establecen rangos (cuatro rangos comprendidos entre 0 y 100) acumulando los valores por tipo de día previo de manera independiente, para luego generar un número aleatorio y asignar el nuevo tipo de día según el valor obtenido y en que rango está comprendido.

Ahora se tiene un año fabricado donde cada día recibió una clasificación. Para poder asignarle a cada día valores de potencia manteniendo las características estacionales y horarias, se van a utilizar los datos reales asignando a cada día fabricado un nuevo número aleatorio entre 1 y el número de días del mismo tipo y mes de los 13 años de datos utilizados. Es decir, se pondrán dentro de una fila todos los días de las mismas características y según el número aleatorio otorgado, se copia ese día dato al día fabricado terminando en un año nuevo con resolución horaria que consiste en los datos antiguos mezclados.

Ejemplo de aplicación del algoritmo

A modo de ejemplificar el algoritmo anterior se presenta un ejemplo. Se tiene la siguiente matriz de transiciones mostrada en la Tabla 4.2, la que corresponde a los datos de mayo. Esta matriz se lee ubicándose en la fila correspondiente a su clasificación, y en la columna correspondiente para ver el día siguiente. En este ejemplo, se tiene que hubo 66 transiciones de días buenos a moderados.

Luego, utilizando los valores anteriores se obtienen frecuencias acumuladas de manera horizontal

Tabla 4.2: Número de transiciones de un tipo de día a otro.

	Excelente	Bueno	Moderado	Malo
Excelente	12	12	2	0
Bueno	10	175	66	4
Moderado	3	65	49	0
Malo	1	2	1	0

(para cada fila de manera independiente) para establecer rangos como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Matriz de probabilidades acumuladas para las transiciones.

	Excelente	Bueno	Moderado	Malo
Excelente	46 %	92 %	100 %	100 %
Bueno	4 %	73 %	98 %	100 %
Moderado	3 %	58 %	100 %	100 %
Malo	25 %	75 %	100 %	100 %

Se genera un número aleatorio para cada día entre 0 y 100 y se le asigna una clasificación al nuevo día según este valor y el rango al que pertenece de la fila correspondiente. En la Tabla 4.4 se puede ver como se clasificaron 4 días a partir del primero, el cual se definió arbitrariamente.

Tabla 4.4: Ejemplo de clasificación de días generados.

Fecha	Número Aleatorio	Estado Asignado
01-05	-	Excelente
02-05	0.88	Bueno
03-05	0.14	Bueno
04-05	0.90	Moderado
05-05	0.02	Excelente

Luego se asigna un número aleatorio entre 1 y el número de datos del mismo tipo que pasaron en enero durante los 13 años. Es decir, se cuentan la cantidad de días excelentes que hubo durante los 13 años en enero y así sucesivamente para cada tipo. Luego, estos mismos datos se ordenan en una fila para ser asignado al nuevo día el que se encuentra en el puesto igual al número aleatorio. En el ejemplo, el día 1 de mayo va a recibir los datos del día tipo excelente número 25 que ocurrió en los datos reales, mientras que el 2 de mayo recibirá los datos del día tipo bueno número 32 y así sucesivamente.

Tabla 4.5: Ejemplo de asignación de datos a días generados.

Fecha	Estado	Número Aleatorio	Día	Potencia Asignada kW/h
01-05	Excelente	25		9.81
02-05	Bueno	32		9.28
03-05	Bueno	19		9.07
04-05	Moderado	54		6.81
05-05	Excelente	42		9.84

4.2. Modelamiento de la estocasticidad del mineral

La variabilidad del mineral proviene de datos proporcionados que fueron generados a partir de datos reales. Es decir, la variabilidad es simulada mientras que la simulación es realista debido a que se realizó en base a un set de datos reales ¹. Los detalles de esta simulación no son de interés para esta tesis por lo que no son incluidos en la descripción.

Estos datos van a simular la alimentación al molino SAG, correspondientes a tonelajes fijos discretos representados por una dureza medida con el índice SPI (SAG power Index) [68], pertenecientes a tres unidades geometalúrgicas (UGM) diferentes. Cada UGM corresponde a una clasificación de dureza entre suave, mediana y duro correspondientes a SPI bajo, mediano y alto respectivamente. Además, cada una contiene una distribución de datos SPI mostradas en la Figura 4.2. Se tiene acceso a variadas secuencias de alimentación como datos de planificación (dureza incierta) para ser utilizados en el modelamiento estocástico de la operación basada en la dureza.

El factor SPI se puede utilizar para determinar el consumo específico de energía de la roca alimentada, con el cual finalmente se puede obtener la potencia requerida para molerla. La ecuación para poder obtener el CEE a partir del SPI es la mostrada en la Ecuación 4.1 [69].

$$CEE = 0,55(SPI)^{0,01} - 7,36(K_{80})^{0,01} + 0,69\left(\frac{H}{1000}\right) + 2,81\left(\frac{p}{1000}\right) \quad (4.1)$$

Donde:

- CEE es el consumo específico de energía en kWh/t.
- SPI es el SAG power index, medido en minutos.
- K_{80} es el tamaño de transferencia del SAG por donde pasa el 80 % de la muestra en μm .
- H es el tiempo que llevan en operación los revestimientos en horas.
- p es la presión sobre los piñones del SAG medida en kPa.

¹Estos datos de variabilidad fueron simulados y proporcionados por el investigador Julián Ortiz (Queen's University)

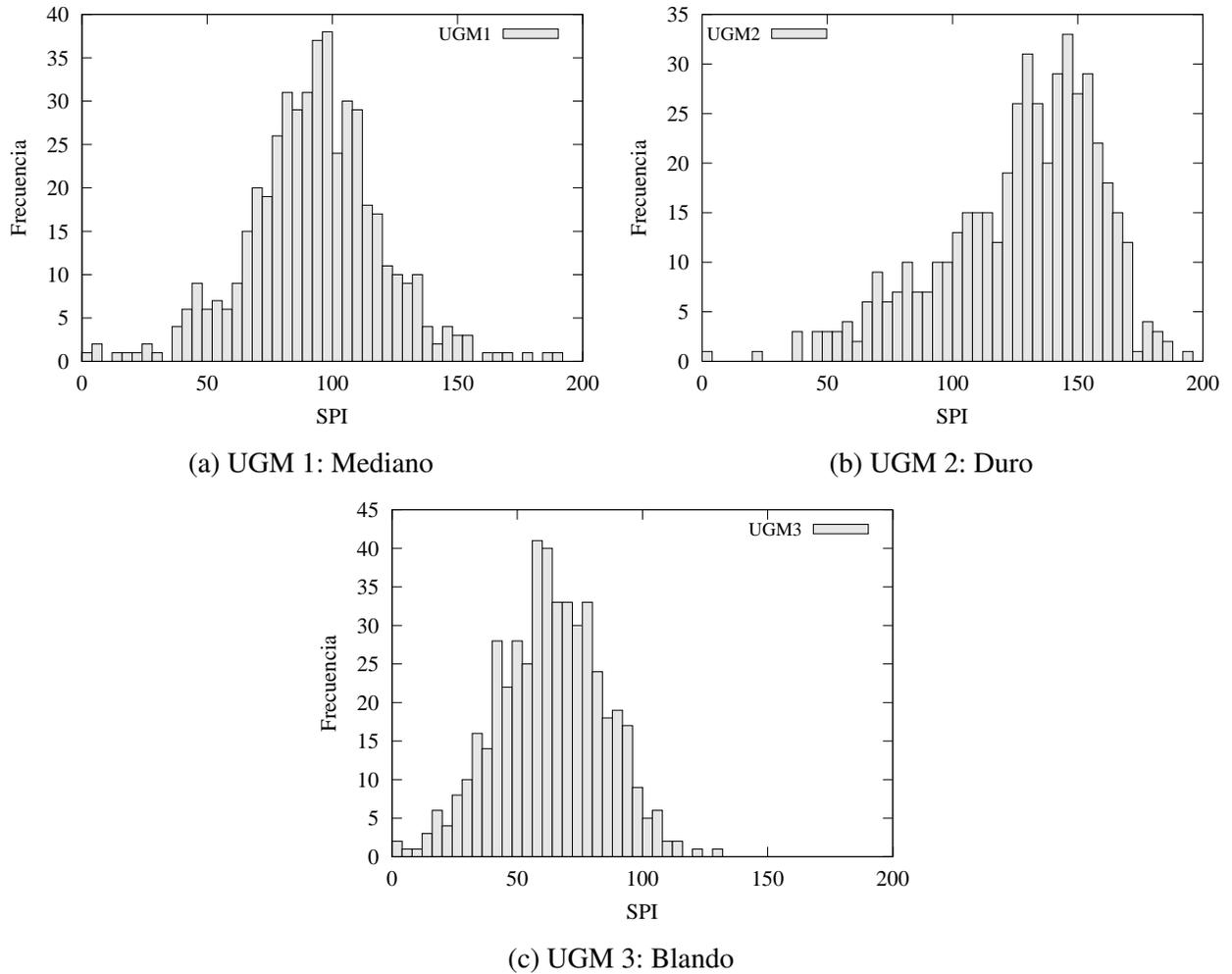


Figura 4.2: Distribución de dureza para cada UGM.

La única variable que se va a considerar para efectos de esta tesis es el SPI, por lo que las demás variables van a ser fijadas para simplificar el problema del consumo de potencia para cada mineral. Los valores utilizados son los siguientes:

- $K_{80} = 85 \mu\text{m}$
- $H = 1300$ horas
- $p = 4500$ kPa

Se van a utilizar datos planificados de alimentación al molino para simular la incerteza que se tiene al realizar el manejo de mineral, donde el operador no conoce con certeza que es lo que esta alimentando hasta que ve el comportamiento efectivo del molino reflejado en la potencia tomada derivado de la dureza. Como esta no se mide en su totalidad, se conoce solamente el plan de extracción con el cual se tiene una referencia de como operar.

Por esto, se van a utilizar los datos de planificación o modelados para establecer el comportamiento del operador dentro del modelo de optimización.

4.3. Modelo de optimización estocástico

Se van a realizar una serie de modificaciones al modelo anterior determinístico para obtener un modelo estocástico. La primera modificación es que se va a incluir el dimensionamiento de la planta dentro de la misma optimización. Es decir, la función objetivo va a incluir costos operacionales y de inversión. Para incluir la incertidumbre de la generación de energía fotovoltaica y la dureza de la roca, se va a realizar un dimensionamiento de la planta basado en el valor esperado de las variables relacionadas dentro del modelo, incluyendo en la simulación diversos casos de comportamiento, es decir, se van a simular varios años de potencia solar y secuencia de roca dentro de la misma optimización. Cabe destacar que se realiza una optimización en un solo paso, por lo que el modelo conoce todos los valores a ser ingresados como parámetros de un comienzo. Debido a la gran cantidad de datos, variables involucradas y naturaleza de estos, se decidió cambiar a un horizonte temporal de un año para considerar la estacionalidad, pero se redujo la resolución a una hora.

El nuevo modelo se va a programar en la plataforma GAMS (*General Algebraic Modeling System*), a diferencia de los anteriores que fue en MATLAB[®]. GAMS es un sistema de programación matemática y optimización que contiene un compilador e integración de diversos solvers [70]. En este caso, el *solver* a ser utilizado es CPLEX. Las principales ventajas de GAMS es la posibilidad de escribir las ecuaciones de manera algebraica y no matricial (el programa se encarga de transformar las ecuaciones en matrices), haciéndolas de fácil identificación, modificación y entendimiento manteniendo un orden adecuado, haciéndolo además apto para el trabajo en equipo.

4.3.1. Función objetivo

La función objetivo a diferencia de los modelos anteriores incluye los costos de inversión, ya que se va a dimensionar la planta necesaria dentro de la misma optimización. La nueva función mostrada en la Ecuación 4.2 se va a componer de tres partes principales que son los costos de inversión, costo de potencia contratada (ahora es una variable p^{con} del problema) y el valor esperado de los costos operacionales de los años incluidos, representando la parte estocástica del problema (método de aproximación al promedio o valor esperado). Se tiene que el valor esperado en este caso es calculado sumando los costos de cada año y y dividiéndolos por el total de años considerados en la simulación Y (Ecuación 4.3). En este caso, es aceptable o suficiente satisfacer en promedio las restricciones utilizando el valor esperado [71].

$$\min f = C^{inv} + C^{con} \cdot p^{con} + E(C_y^{op}) \quad (4.2)$$

$$E(C_y^{op}) = \frac{\sum_y C_y^{op}}{Y} \quad (4.3)$$

Costos de inversión

Los costos de inversión (Ecuación 4.4) son básicamente dos, el costo de inversión de la planta fotovoltaica (Ecuación 4.5) y el costo de las baterías (Ecuación 4.6).

$$C^{inv} = C^{inv,s} + C^{inv,b} \quad (4.4)$$

$$C^{inv,s} = Inv^s \cdot p_{max}^s \cdot Anualidad \quad (4.5)$$

$$C^{inv,b} = Inv^{bat} \cdot e_{max}^{bat} \cdot Anualidad \quad (4.6)$$

Al igual que la potencia contratada, el tamaño de la planta FV p_{max}^s y del BESS e_{max}^{bat} son variables del sistema en este modelo.

Costos operacionales

Los costos operacionales se subdividen en cinco partes como se muestra en la Ecuación 4.7, donde en orden representan los costos del sistema fotovoltaico, BESS, red, multas y otros. Se realiza un cálculo de costos operacionales para cada año considerado en la simulación, por lo que hay variables con dependencia del tiempo y del año.

$$C_y^{op} = C_y^s + C_y^{bat} + C_y^{grid} + C_y^{pen} + C^{oth} \quad (4.7)$$

El costo de operación de la planta solar fotovoltaica (Ecuación 4.8) es considerada como un costo por uso de energía. Los costos de mantención y otros están considerados entre de este valor.

$$C_y^s = \sum_t (C^{op,s} \cdot p_{t,y}^s \cdot dt) \quad (4.8)$$

El costo de operación del BESS (Ecuación 4.9) se compone por el costo de reemplazo de las baterías $C^{rep,bat}$, el cual está establecido por el ciclaje de la batería en base a un máximo número de ciclos permitidos y la profundidad de descarga. Los ciclos son definidos por la energía utilizada (ya sea de carga o descarga).

$$C_y^{bat} = \sum_t \frac{(p_{t,y}^{bch} + p_{t,y}^{bdis}) \cdot C^{rep,bat} \cdot dt}{2 \cdot N_{max}^{cycles} \cdot (1 - Soc_{min})} \quad (4.9)$$

El costo de la red (Ecuación 4.10) corresponde a la compra y venta de energía.

$$C_y^{grid} = \sum_t (p_{t,y}^{imp} \cdot C^{imp} - p_{t,y}^{exp} \cdot C^{exp}) \cdot dt \quad (4.10)$$

El costo de multa (Ecuación 4.11) está definido de la misma forma que en los modelos anteriores para cada año incluido.

$$C_y^{pen} = \sum_t (p_y^{max,imp} - p^{con}) \cdot C^{penalty} \quad (4.11)$$

Se consideran otros costos dentro de la función (Ecuación 4.12, donde en este caso no corresponde a un costo como tal, si no que una forma de restricción. El uso de las baterías en su estado de carga más bajo lleva a un mayor desgaste en ellas, es decir, es más eficiente usarlas más cargadas llevando a que tengan una mayor vida útil [72]. Por esto, se impuso una restricción por tramos, en donde el

uso con bajo estado de carga va a producir un costo, mientras que usarla cargada no produce costo alguno. Más adelante en la descripción el modelo se explica como se calcula este costo.

$$C_y^{oth} = \sum_t e f_{t,y}^{bat} \cdot dt \quad (4.12)$$

4.3.2. Restricciones de la planta fotovoltaica

Los parámetros de entrada al modelo para la generación de energía fotovoltaica va a estar dada por un perfil de generación diario $P_{t,y}^{s,profile}$ (dado por los años solares simulados, este perfil incluye la información horaria para todos los días del año de una planta de 1 MWp). Este perfil va a ser multiplicado por el factor p_{max}^s determinando el tamaño de la planta. Este factor se multiplica por el perfil para obtener la curva de potencia solar (Ecuación 4.14) que va a ser utilizada en los balances de energía.

$$p_{t,y}^s \leq p_{max}^s \quad (4.13)$$

$$P_{t,y}^s = P_{t,y}^{s,profile} \cdot p_{max}^s \quad (4.14)$$

4.3.3. Restricciones del BESS

Las variaciones principales de estas restricciones con respecto a los modelos anteriores es que no se utiliza el estado de carga como un porcentaje, si no que se utiliza como energía disponible $e_{t,y}^{bat}$. Esto se realiza para facilitar el planteamiento de las ecuaciones y poder mantener la linealidad en el dimensionamiento de la planta.

La Ecuación 4.15 muestra el uso de la proporción de la energía con la potencia del BESS para el cálculo de la última. Esta potencia es utilizada en las Ecuaciones 4.16 y 4.17 para limitar la potencia de carga y descarga del BESS.

$$p_{max}^{bat} = \frac{e_{max}^{bat}}{PE_{ratio}} \quad (4.15)$$

$$p_{t,y}^{bch} \leq p_{max}^{bat} \quad (4.16)$$

$$p_{t,y}^{bdis} \leq p_{max}^{bat} \quad (4.17)$$

El balance energético del BESS se muestra en la Ecuación 4.18, donde siempre la energía de la batería se encuentra limitada por capacidades máximas y mínimas (Ecuación 4.19) dependientes de la tecnología de batería utilizada.

$$e_{t,y}^{bat} = e_{(t-1),y}^{bat} + \eta^{bch} \cdot p_{t,y}^{bch} \cdot dt - \frac{p_{t,y}^{bdis} \cdot dt}{\eta^{bdis}} \quad (4.18)$$

$$e_{min}^{bat} \leq e_{t,y}^{bat} \leq e_{max}^{bat} \quad (4.19)$$

La Ecuación 4.20 muestra como se calcula el costo a la utilización de la batería a altos valores de profundidad de descarga (DOD, *depth of discharge*). Para mantener la linealidad del problema, se van a utilizar rectas indicadas por el subíndice p (generadas con la misma forma de ecuación), que van a representar diferentes costos para distintos rangos de cargas de la batería $e_{t,y}^{bat}$. La superposición de las diferentes rectas establece el área en donde se pueden mover los costos (área de posible solución siempre mayores a estas rectas), finalmente determinándose por la condición de minimización de los costos. La Figura 4.3 representa el gráfico de restricciones utilizadas en la optimización en este caso. Se tiene que la Restricción 2 (p2) determina el costo para estados de carga de la batería de 0 a 48 %, mientras que de 30 a 70 % se tiene otra línea de costos más bajos y de menor pendiente correspondiente a la Restricción 1 (p1). Para el rango de 70 a 100 %, no se tiene costos, ya que estos siempre son mayores o iguales a 0. Cabe destacar que los valores y ecuaciones utilizadas en el modelo fueron determinadas arbitrariamente para ajustarse a resultados razonables.

$$ef f_{t,y}^{bat} \geq Lin_p^a \cdot (e_{max}^{bat} - e_{t,y}^{bat}) - e_{max}^{bat} \cdot Lin_p^b \cdot Lin_p^a \quad (4.20)$$

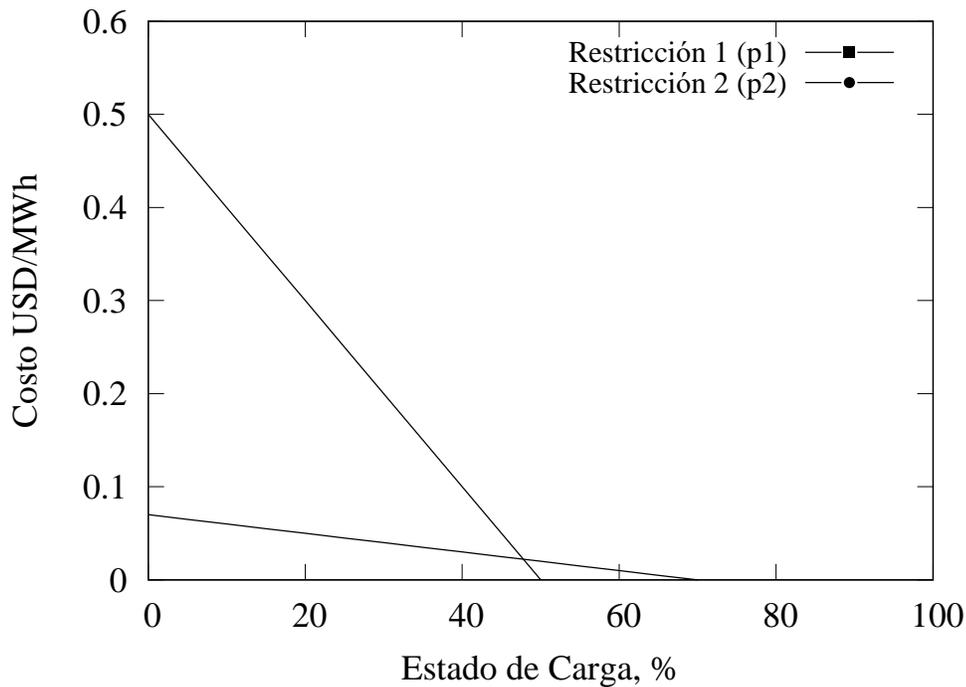


Figura 4.3: Gráfico para los costos por eficiencia de la batería.

4.3.4. Balance de energía

Otra de las diferencias de este modelo con el anterior es la potencia consumida por el SAG. En este caso se tiene que esta no va a ser un dato de entrada, si no que un resultado de un cálculo realizado basado en la operación del molino mostrada en la Ecuación 4.21. Los datos de entrada van a ser consumos específicos de la roca $CEE_{t,k,y}$, los cuales van a ser multiplicados por un tonelaje por hora TPH_k dando como resultado potencia. El subíndice k representa el *stockpile* de donde va a provenir el mineral. Como los *stockpiles* en este caso están pensados para el manejo de la fuerza

del mineral, cada *stockpile* k va a tener un CEE por cada instante t y además un tonelaje que se puede alimentar al molino de ese tipo de roca (ya que si, por ejemplo, si el mineral es blando, se puede alimentar un mayor TPH al molino para cumplir con las condiciones de máxima carga para trabajar a potencia máxima). De esta manera se introduce la variable del manejo de mineral o comportamiento del operador de la planta $op_{t,k,y}$ el cual representa la fracción del total alimentado en tiempo t , extraída del *stockpile* k , del año simulado y . Esta variable toma el valor de 1 si es que se está considerando un solo *stockpile*, o un número de 0 a 1 si es que hay más de uno. Por lo tanto, como resultado de esta ecuación se obtiene el consumo del molino SAG producto del mineral extraído del *stockpile* k .

$$p_{t,k,y}^{SAG} = CEE_{t,k,y} \cdot TPH_k \cdot op_{t,k,y} \quad (4.21)$$

Un supuesto muy fuerte con respecto al consumo final del molino es que este va a ser aditivo con respecto a los consumos de los tipos de mineral. Debido a que se requiere modelar de forma muy compleja este fenómeno, como por ejemplo con detallados balances poblacionales y modelos de ruptura de los cuales es necesario tener datos de operación específicos [73]. Por lo anterior se mantiene el supuesto para efectos de esta tesis ya que se escapa de los alcances del estudio.

La siguiente Ecuación 4.22 representa el balance de energía como tal, en donde la suma de todas las entradas y salidas de energía tienen que ser iguales al consumo del molino en tiempo t (suma de los consumos provenientes al mineral de todos los *stockpiles*).

$$p_{t,y}^s - p_{t,y}^{bch} + p_{t,y}^{bdis} + p_{t,y}^{imp} - p_{t,y}^{exp} = \sum_k p_{t,k,y}^{SAG} \quad (4.22)$$

Las Ecuaciones 4.23 y 4.24 establecen la potencia máxima importada desde la red, funcionando de la misma forma que en el modelo determinístico pero con la diferencia de que se considera como máximo el ocurrido en todos los años y simulados.

$$p_{t,y}^{imp} \leq p_y^{max,imp} \quad (4.23)$$

$$p^{con} \leq p_y^{max,imp} \quad (4.24)$$

4.3.5. Balance de masa: restricciones de los *stockpiles*

Debido a que se está considerando el manejo de mineral en *stockpiles*, y estos tienen una capacidad limitada, se establecieron restricciones de balance de masa para ser considerados con el problema.

La Ecuación 4.25 representa la salida de cada *stockpiles* dada por la alimentación al molino SAG y la mezcla elegida por el operador (optimizador). El operador del molino siempre quiere intentar operar a potencia máxima. Debido a que la potencia consumida está directamente relacionada con el nivel de llenado de este (cuanto mineral hay adentro), se trata de mantener siempre en un nivel determinado por la máxima eficiencia entre capacidad de reducción y consumo para lograr el objetivo. Debido a la incerteza del mineral, se produce una gran variabilidad ya que la entrada de un mineral duro va a producir un mayor tiempo de residencia dentro de este. Si no se reduce la

alimentación, se va a producir un sobrellenado produciendo deficiencias en la reducción de tamaño y sobre consumo de potencia. Al contrario, si se alimenta un mineral blando y no se aumenta la entrada al molino, este se vacía produciendo reducciones en potencia consumida y también déficit en la reducción de tamaño. Por esto, para mantener un presunto nivel de llenado del molino, se asignan distintos TPH de alimentación para cada dureza de mineral (*stockpile*), lo cual a la vez se ve reforzado por la Ecuación 4.26 en donde siempre tiene que haber alimentación al molino (las fracciones tomadas de todos los *stockpiles* siempre suman 1). En este problema, los TPH están calibrados para cada dureza basados en los datos reales de consumo y TPH utilizados en la optimización determinística para un molino SAG.

$$m_{t,y}^{sp,out} = \sum_k (op_{t,k,y} \cdot TPH_k) \quad (4.25)$$

$$\sum_k op_{t,k,y} = 1 \quad (4.26)$$

La Ecuación 4.27 representa un balance de masa similar al realizado con la energía en el BESS, mostrando cuanto mineral hay almacenado en el *stockpile* sujeto a sus entradas y salidas. El almacenamiento de masa del *stockpile* está limitado inferior y superiormente por valores dados (Ecuación 4.28).

$$m_{t,k,y}^{sp,sto} = m_{(t-1),k,y}^{sp,sto} - op_{t,k,y} \cdot TPH_k \cdot dt + m_{t,k,y}^{sp,in} \cdot dt \quad (4.27)$$

$$M_k^{sp,min} \leq m_{t,k,y}^{sp,sto} \leq M_k^{sp,max} \quad (4.28)$$

4.3.6. Descripción de los parámetros y variables

La nomenclatura y descripción de los parámetros y variables utilizados en el desarrollo de este modelo se resume en las Tablas 4.6 y 4.7.

Tabla 4.6: Variables utilizadas en el modelo estocástico.

Variable	Descripción	Unidades
p^{con}	Capacidad de potencia contratada	MW
p_{max}^s	Potencia máxima de la planta solar fotovoltaica	MW
e_{max}^{bat}	Capacidad energética del BESS	MWh
e_{min}^{bat}	Capacidad energética mínima del BESS	MWh
p_{max}^{bat}	Capacidad de potencia del BESS	MW
$p_{t,y}^s$	Potencia generada por el sistema fotovoltaica en el tiempo t del año y	MW
$p_{t,y}^{bch}$	Potencia cargada de las baterías en tiempo t	MW
$p_{t,y}^{bdis}$	Potencia descargada de las baterías en tiempo t	MW
$p_{t,y}^{imp}$	Potencia importada de la red en tiempo t	MW
$p_{t,y}^{exp}$	Potencia exportada a la red en tiempo t	MW
$p_y^{max,imp}$	Potencia máxima comprada de la red de todos los años y	MW
$e_{t,y}^{bat}$	Energía almacenada en el BESS en tiempo t del año y	MWh
$p_{t,k,y}^{SAG}$	Consumo en potencia de los molinos SAG en tiempo t del año y	MW
$op_{t,k,y}$	Fracción de mineral destinado a la alimentación del SAG en tiempo t del <i>stockpile</i> k en el año y	-
$m_{t,y}^{sp,out}$	Masa saliente de los <i>stockpiles</i> para la alimentación del SAG en tiempo t en el año y	Ton
$m_{t,k,y}^{sp,sto}$	Masa almacenada en el tiempo t en el <i>stockpile</i> k en el año y	Ton
$m_{t,k,y}^{sp,in}$	Masa entrante en el tiempo t al <i>stockpile</i> k en el año y	Ton

Tabla 4.7: Parámetros utilizados en el modelo estocástico.

Parámetro	Descripción	Unidades
Y	Número de años aleatorios considerados para la optimización estocástica	-
$Anualidad$	Factor correspondiente para incorporar la anualidad la de inversión	-
C^{con}	Costo de la capacidad de potencia contratada	US\$/MW
Inv^s	Costo de inversión de la planta fotovoltaica	kUS\$
Inv^{bat}	Costo de inversión del BESS	kUS\$
$C^{op,s}$	Costo de operación de la planta fotovoltaica	US\$/MWh
$C^{bat,rep}$	Costo de reposición del BESS	US\$/MWh
N_{max}^{cycles}	Vida útil del BESS medido en ciclos	-
Soc_{min}	Estado de carga del BESS mínimo	-
Soc_{max}	Estado de carga del BESS máximo	-
C^{imp}	Precio de compra (importación) de energía	US\$/MWh
C^{exp}	Precio de venta (exportación) de energía	US\$/MWh
$C^{penalty}$	Multa por sobreconsumo de potencia	US\$/MW/año
$P_{t,y}^{s,profile}$	Perfil horario de generación de potencia fotovoltaica para cada año y	MW
PE_{ratio}	Proporción entre la capacidad de potencia y energía del BESS	-
η^{bch}	Eficiencia de carga del BESS	-
η^{bdis}	Eficiencia de descarga del BESS	-
P_{max}^{bat}	Capacidad máxima en potencia del BESS limitada por los inversores	MW
Lin_p^a	Factor para el cálculo del costo por eficiencia de uso del BESS	US\$/MWh
Lin_p^b	Factor para el cálculo del costo por eficiencia de uso del BESS	-
$M_k^{sp,min}$	Capacidad másica mínima del <i>stockpile</i> k	Ton
$M_k^{sp,max}$	Capacidad másica máxima del <i>stockpile</i> k	Ton
$CEE_{t,k,y}$	Consumo específico de energía del mineral alimentado en el tiempo t del <i>stockpile</i> k del año y	MWh/Ton
TPH_k	Toneladas por hora de alimentación al molino provenientes del <i>stockpile</i> k	Ton/hora

4.4. Casos de estudio

La aplicación del modelo es llevada a cabo con 3 casos progresivos que analizan los efectos de las variables.

Se comienza con comprobar el modelo de manera determinístico utilizando solo un año en la simulación. Todavía no se introducen los múltiples *stockpiles* por lo que el mineral no es administrado.

Este primer caso contiene tres revisiones. La primera revisión se realiza analizando un año promedio de en cuanto a la suma de potencia. Este año es elegido de entre los reales obtenidos del Explorador Solar y se caracteriza por su buen clima. Esta consideración se realiza ya que como segunda revisión, se utilizará un año, que aunque tiene una generación total de potencia promedio, tiene una serie de días nublados (clasificación mala) seguidos. Se quiere ver con esto que efecto tiene el clima sobre el dimensionamiento de la planta. La tercera revisión se lleva a cabo incluyendo la estocasticidad solar, es decir, con un año tipo de mineral y con varios años solares dentro de la simulación. Con estas tres revisiones se realiza una comparación de como afecta la variabilidad solar.

Un segundo caso comprende la expansión a tres *stockpiles*, uno para el UGM más blando, otro para el intermedio y otro para el duro. Todavía utilizando un tipo de año de mineral (es decir, no hay estocasticidad de mineral aun), se quiere ver el efecto del manejo de mineral correspondiente al DSM de este modelo.

Para finalizar, se integra al uso de tres *stockpiles* variados años de mineral para realizar el modelo estocástico completo.

En la Figura 4.4 se puede ver un resumen de cómo se va a llevar a cabo el problema.

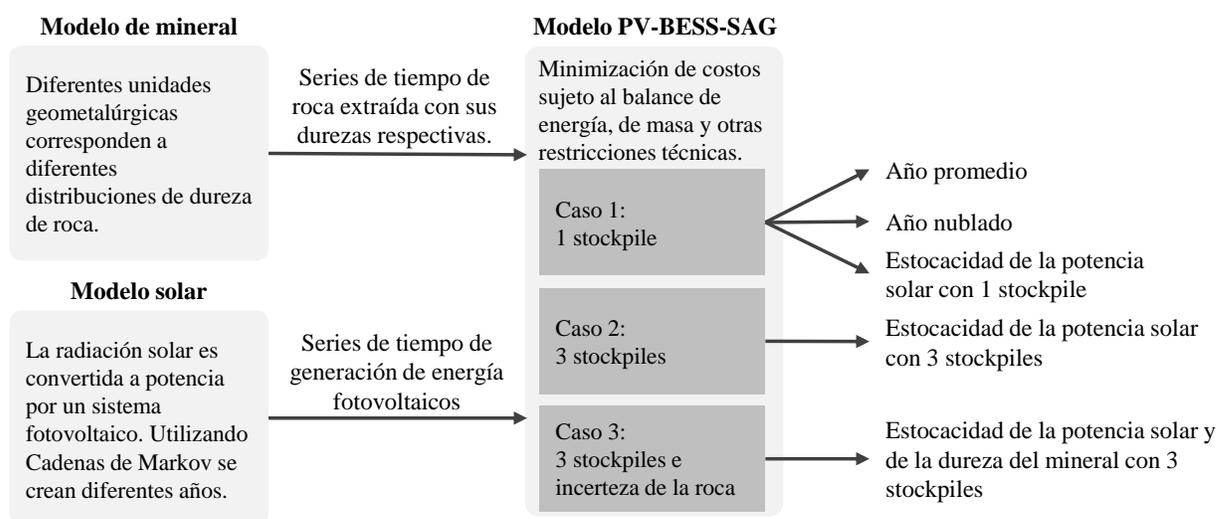


Figura 4.4: Esquema de resumen del modelo estocástico y los casos estudiados.

4.4.1. Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo varían con respecto al modelo determinístico. Los precios de compra y venta de energía son considerados como 85 y 70 US\$/MWh respectivamente, mientras que el costo de la capacidad de potencia contratada es de 12 kUS\$/MW. La multa por sobreconsumo de potencia son cargados de forma anual por el consumo máximo realizado en el periodo, considerándose un costo de 18 kUS\$/MW.

Las baterías BESS son consideradas con una razón fija de su capacidad energética con su capacidad de potencia en 4 MWh por MW. Estas tienen una vida útil de 3000 ciclos y una máxima profundidad de descarga de 70 %.

El estado de carga inicial y final del BESS se fijó en 50 %, mientras que el estado de carga máximo y mínimo que puede lograr la batería es de 100 % y 30 % respectivamente. La eficiencia de las baterías para la carga y descarga de energía se asumió como un 92 % para ambos casos.

La eficiencia del uso de BESS (Ecuación 4.20) se va a llevar a cabo en dos ecuaciones (dos tramos, como en la Figura 4.3). Los parámetros considerados fueron calibrados manualmente para obtener los resultados y rangos deseados. En este caso se consideró para lin_p^a los valores de 0.1 y 1, y para lin_p^b 0.3 y 0.5 respectivamente.

Cabe destacar que se realizó un plan de costos de inversión del sistema a 20 años con un 4 % de interés (resulta en un factor de *Anualidad* de 0.0556). Se considera un costo de inversión de 252.7 kUS\$/MWh para el BESS, con un costo de reemplazo de 127.4 kUS\$/MWh. La inversión del parque fotovoltaico es de 950 kUS\$/MW.

Los *stockpiles* se consideraron con una capacidad de masa de 4000 ton, soportando una alimentación suficiente para aproximadamente 3 días del molino SAG considerado, correspondiente a uno con dimensiones de 36'x19', con potencia de 17.000 HP.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo en un computador con un procesador Intel Core i7-3770k (octa-core de 3.5 GHz), 16 Gb de memoria RAM y almacenamiento en un disco duro SSD con suficiente memoria disponible para las simulaciones.

4.5. Resultados

4.5.1. Validación de los años solares generados

Utilizando el algoritmo explicado anteriormente se generaron 100 años solares. Se realizó una validación de estos para comprobar su similitud entre estos y los reales. Primero se realizó una validación estadística comparando los promedios diarios, la varianza y la suma anual de potencia. Además se incluye la comparación de la cantidad de días malos seguidos que ocurren, considerando en el análisis de dos a cuatro días seguidos. Por último se verifica mensualmente que la cantidad de tipos de días sea similar. No se verifica hora a hora la similitud ya que por construcción, los días de cada año generado son tomados de los reales por lo que no habría diferencia en la forma de ellos.

En la Tabla 4.8 se puede ver una comparación estadística de los años reales (cada uno con su año correspondiente) y los distintos casos solares generados. En este caso se muestran los 10 primeros casos. Se puede ver que en general, los tres estadísticos considerados son similares para todos los años. Sumado a lo anterior, la secuencia de días malos seguidos mantiene también la tendencia. Esto muestra que los años generados son bastante similares a los años reales considerados.

Con respecto a la similitud de tipos de días, se tiene que se sigue la tendencia mensual en promedio

Tabla 4.8: Comparación de estadísticas de los años generados a partir de Cadenas de Markov con los reales.

	Promedio diario, MW	Varianza	Suma anual	2 Días malos seguidos	3 Días malos seguidos	4 Días malos seguidos
2004	7.22	2.99	2644	0	0	0
2005	7.13	3.08	2601	2	0	0
2006	7.19	2.68	2623	0	0	0
2007	7.20	3.35	2626	1	1	1
2008	7.31	2.97	2674	1	0	0
2009	7.25	3.22	2646	0	1	0
2010	7.24	3.01	2641	1	0	0
2011	7.20	3.33	2629	1	0	0
2012	7.24	3.13	2651	1	0	0
2013	7.17	3.00	2618	0	2	0
2014	7.19	3.02	2623	0	1	0
2015	7.06	3.65	2556	2	1	0
2016	7.13	4.21	2603	3	1	2
Caso 1	7.20	2.84	2628	1	0	0
Caso 2	7.23	3.10	2640	1	0	0
Caso 3	7.19	3.37	2624	0	0	1
Caso 4	7.19	3.27	2625	2	0	0
Caso 5	7.18	3.43	2619	1	1	0
Caso 6	7.27	2.83	2653	1	0	0
Caso 7	7.23	3.01	2640	0	0	0
Caso 8	7.21	3.26	2630	2	0	1
Caso 9	7.23	3.02	2638	1	0	0
Caso 10	7.16	3.07	2613	0	0	0

sobre la cantidad de tipos de días con el promedio de los 13 años reales. Claramente no pueden, ni deben ser iguales estos números ya que si no, no se estarían considerando años aleatorios, especialmente para casos específicos. Esta comparación se muestra en las Tablas 4.9 y 4.10. Por la limitación de tamaño de las tablas se muestran solo los cinco primeros casos a modo ilustrativo.

Tabla 4.9: Comparación de cantidad de tipos de días de datos generados con el promedio de los reales, parte 1.

	Tipo de día	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Promedio casos	Promedio reales
Enero	0	1	3	1	1	0	1	2
	1	21	24	23	19	20	21	20
	2	9	4	6	11	10	8	9
	3	0	0	1	0	1	0	0
Febrero	0	9	2	2	14	6	7	7
	1	11	17	17	11	17	15	16
	2	5	7	8	2	5	5	5
	3	3	2	1	1	0	1	0
Marzo	0	1	6	8	0	1	3	4
	1	22	19	13	21	21	19	18
	2	8	6	10	10	9	9	8
	3	0	0	0	0	0	0	0
Abril	0	8	3	3	2	5	4	4
	1	12	17	15	19	15	16	13
	2	10	9	12	8	10	10	12
	3	0	1	0	1	0	0	1
Mayo	0	10	4	2	7	2	5	4
	1	17	19	16	14	14	16	16
	2	4	7	12	8	9	8	9
	3	0	1	1	2	6	2	3
Junio	0	2	1	2	1	5	2	2
	1	23	24	22	16	12	19	23
	2	4	4	0	6	9	5	3
	3	1	1	6	7	4	4	2
Julio	0	0	0	0	0	2	0	1
	1	19	20	19	24	20	20	20
	2	10	10	12	7	7	9	8
	3	2	1	0	0	2	1	2
Agosto	0	1	10	0	4	0	3	5
	1	21	10	14	23	13	16	13
	2	8	9	14	3	17	10	11
	3	1	2	3	1	1	2	1
Septiembre	0	6	0	6	0	1	3	4
	1	19	15	19	15	20	18	17
	2	5	14	5	15	9	10	9
	3	0	1	0	0	0	0	0

Tabla 4.10: Comparación de cantidad de tipos de días de datos generados con el promedio de los reales, parte 2.

	Tipo de día	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Promedio casos	Promedio reales
Octubre	0	2	2	5	3	4	3	4
	1	21	16	20	20	17	19	18
	2	8	12	5	8	9	8	9
	3	0	1	1	0	1	1	0
Noviembre	0	7	10	10	8	9	9	8
	1	13	16	14	16	16	15	15
	2	10	4	6	6	5	6	6
	3	0	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	1	3	8	1	9	4	4
	1	20	23	15	23	15	19	18
	2	10	5	8	7	7	7	9
	3	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	48	44	47	41	44	45	49
	1	219	220	207	221	200	213	208
	2	91	91	98	91	106	95	97
	3	7	10	13	12	15	11	11

4.5.2. Resultados modelo de optimización estocástica

A continuación se presentarán los principales resultados para cada caso descrito. Los tiempos de ejecución del modelo de optimización en GAMS son variados. Si se considera el problema determinístico (solo un año solar y mineral), se tienen tiempos de solución de 1 a 5 minutos aproximadamente. En cambio al aumentar la cantidad de años considerados en la simulación, como por ejemplo, 25 años, el tiempo de ejecución sube a 2 horas aproximadamente por caso mientras que con 100 años, el tiempo de simulación sube de 12 a 24 horas por caso. Se configuró CPLEX para que utilizara el método del punto interior o barrera [74] para la aproximación más rápida del resultado

Caso 1

Utilizando el año de potencia solar promedio (en este caso, el correspondiente al 2006) se obtiene el comportamiento general del modelo de optimización. Se puede ver una fracción de este en la Figura 4.5, el cual muestra dos días completos de operación. Cabe destacar que este resultado se muestra para un molino SAG normalizado a un consumo de 1 MW (en promedio) con el fin de ver las variaciones y comportamientos, sumado a que esto acelera la optimización. Para obtener los valores de un consumo del molino de mayor tamaño, basta con multiplicar los resultados por la potencia deseada.

El comportamiento del balance energético obtenido por el sistema en general es el esperado, en donde producto de la generación de energía FV, el BESS tiende a descargarse justo antes del comienzo de las horas de sol de tal manera de cargarse y almacenar la energía para la noche. Además se puede ver que el sistema se dimensiona para que durante las horas solares, la compra de energía desde la red se disminuya lo más posible (sea 0 en muchos casos). De esta manera un consumo plano durante la noche, soportado por el BESS que funciona como suplemento. Esta meseta de potencia importada muchas veces es igual a la potencia contratada, de tal manera de aprovechar al máximo el contrato que se considera como una inversión.

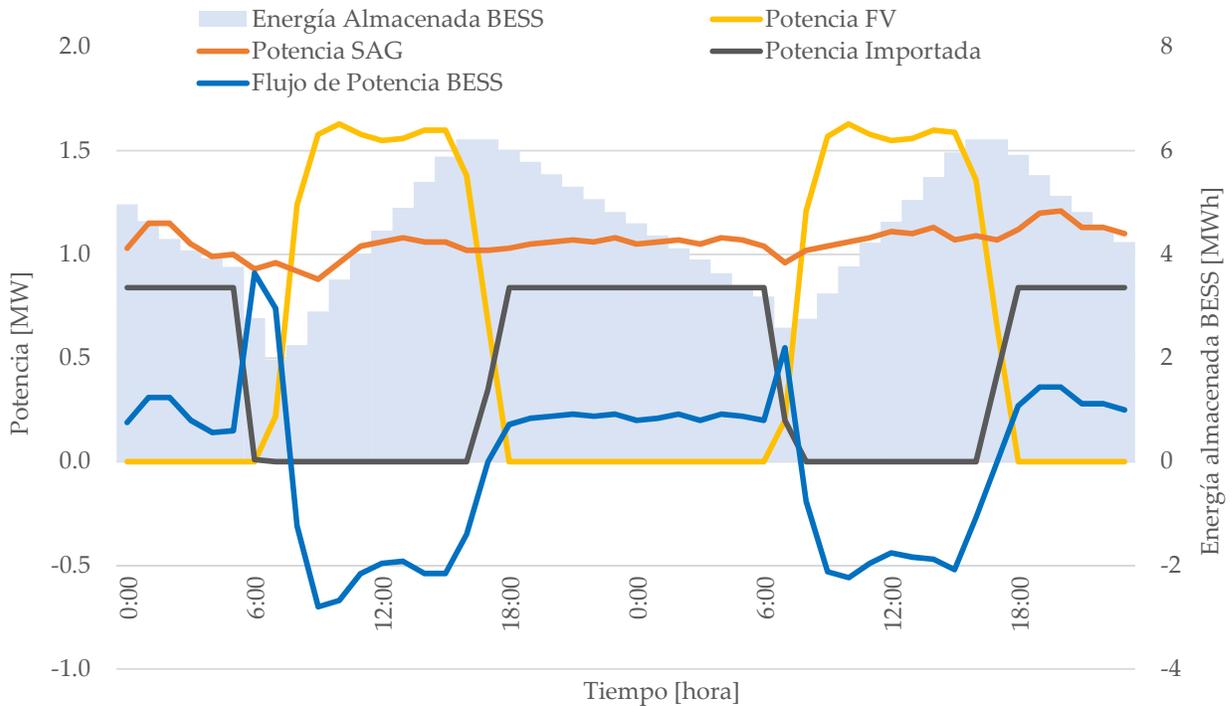


Figura 4.5: Comportamiento de las variables del modelo estocástico de dos días de operación.

Los valores obtenidos del dimensionamiento considerando este molino corresponden a una potencia contratada de 0.84 MW, un BESS de 6.22 MWh con capacidad de potencia de 1.55 MW y una planta FV de 2.74 MW, generando suficiente energía para tener una fracción solar del 0.8 (es decir, un 80 % de la energía utilizada proviene de la generación solar FV).

Comparando este a un caso base en donde no se tiene una planta FV ni BESS, se obtiene que la potencia contratada se reduce en un 32.3 % considerando la instalación de una planta, sumado a que los costos totales (inversión más operación) también disminuyen, en un valor de 31.3 %. Los beneficios de tener un sistema como el planteado son bastante altos comparado estos valores.

A pesar de lo anterior, el estudio del caso promedio es más bien optimista, por lo que valdría la pena pensar que ocurriría con el dimensionamiento del sistema si se considera que hay un año malo. Este año definido como malo es el que contenga una alta secuencia de días malos (nublados) seguidos, más que una potencia baja (es decir, el efecto del clima en el dimensionamiento). Para este caso, se utiliza el año 2016 de los datos del Explorador Solar. Por último, se contrasta el caso

promedio con el de malos días continuos y con uno que incluya muchos tipos de años, es decir, el estocástico. En este estudio, se incluyen 100 años solares diferentes en la simulación. Cabe destacar que la variación del mineral aun no se toma en cuenta. Los resultados de esto se muestran en la Figura 4.6. Estos resultados se expresan normalizados a los resultados del año promedio.

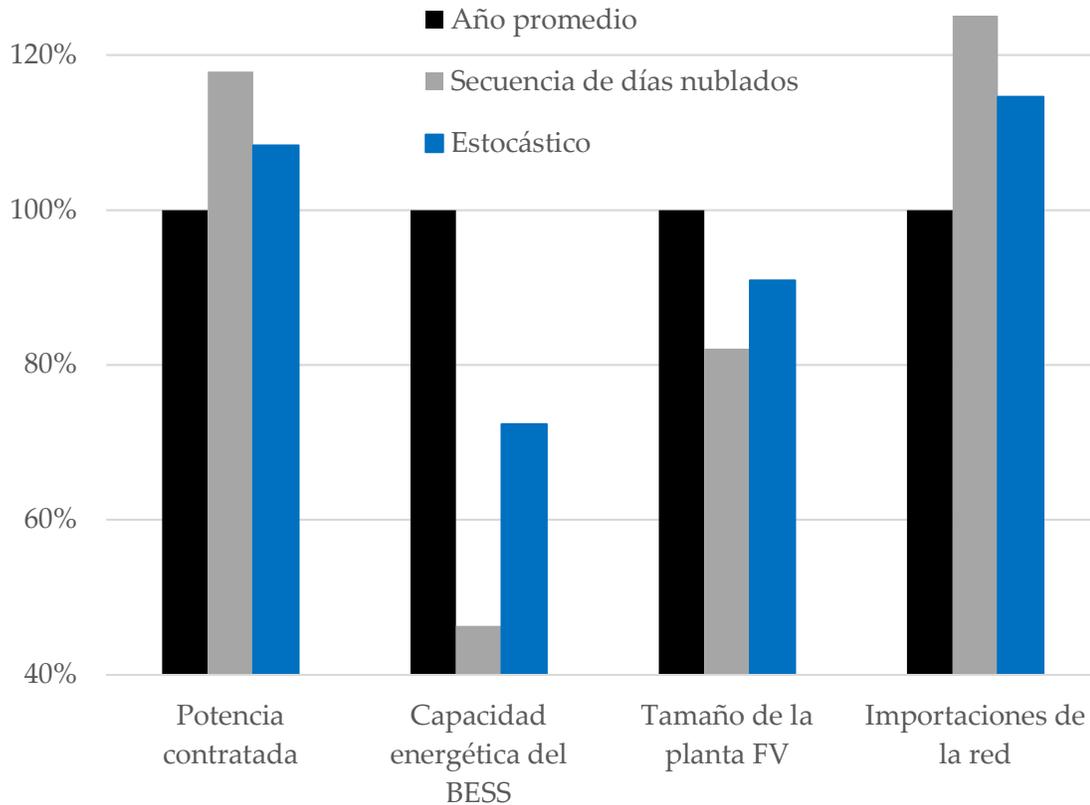


Figura 4.6: Resultados caso 1 modelo estocástico.

Los resultados muestran la alta influencia del clima en el dimensionamiento del sistema SAG-BESS-FV, en donde el optimizador prefiere utilizar una mayor energía proveniente de la red más que confiar en las baterías y paneles FV. Con un año de una larga secuencia de días nublados se obtiene un 18 % más de potencia contratada, 54 % menos de BESS, 18 % menos de planta FV instalada e importaciones de la red un 30 % mayores. A pesar de esto, los costos resultan ser un 3 % mayores comparados al año promedio solamente. En el caso en que se simula la estocasticidad del sol, la potencia contratada resulta ser un 8 % mayor, el BESS un 28 % menor, la planta FV un 9 % menor y las importaciones de la red un 15 % mayores. El costo total comparado al año promedio es solo un 2 % mayor.

Al analizar este comportamiento, es lógico pensar que el sistema dimensione una menor batería cuando tiene una larga secuencia de días malos, y/o una incerteza sobre lo que viene. Cuando pensamos en una larga secuencia de días nublados, el sistema BESS tiene que ser capaz de almacenar suficiente energía para poder suministrar lo faltante entre la potencia contratada y el consumo del SAG en ese momento. Gracias al pronostico del clima, es posible prepararse con antelación a estos malos frentes, pero todo tiene un límite. Si es muy larga la secuencia, resulta más barato subir todo

el año la potencia contratada y consumir más desde la red, que tener una batería mucho más grande solo para cubrir esa ocasión y después tener capacidad ociosa. Por eso es que el sistema decide ser más austero y confiar más en la red que en un sistema más autónomo. Algo similar ocurre en la formulación estocástica. Como el sistema tiene que ser capaz de cubrir en promedio todos los años, dentro de ellos puede ser que se involucre uno malo por lo que tiene que ser austero con el dimensionamiento y no apoyarse por completo en el sistema BESS-FV para evitar posibles multas.

Caso 2

Hasta ahora, solo se ha modelado el mineral como una hilera que alimenta al molino sin manejo alguno. Debido a la naturaleza cíclica del sol, de la dureza del mineral y lo visto en los resultados de los modelos determinísticos anteriores, es de especial interés el explorar la opción de realizar DSM junto a este modelo. En este caso, el DSM se quiere implementar nuevamente como un manejo del mineral, pero de manera más sofisticada. Se va a considerar el manejo del mineral como la separación de estos en tres *stockpiles*, uno para cada UGM con su dureza característica, y se va a alimentar el molino de manera inteligente según lo que sea conveniente, manteniendo siempre un balance de masa para evitar vaciar los *stockpiles*. En este caso, el optimizador actúa como el operador que elige de que *stockpile* (o una mezcla de estos) tomar mineral y alimentar al molino SAG, permitiéndole controlar de cierta manera la potencia consumida por estos.

Al incorporar el DSM, se obtiene el siguiente comportamiento del operador sobre que tipo de mineral alimentar, mostrado en la Figura 4.7.

Se puede ver que hay una tendencia marcada de alimentar el mineral duro durante el día, mientras que se alimenta el blando e intermedio durante la noche. Este es justamente el comportamiento esperado para integrar correctamente la energía solar fotovoltaica sobre los molinos SAG. De esta manera se aprovecha mejor la abundancia de energía durante el día moliendo el mineral que tiene mayores exigencias sobre la potencia del molino, mientras que durante la noche se cuida la energía almacenada para reducir además la energía consumida desde la red alimentando el mineral blando e intermedio. Este comportamiento no es extremadamente marcado debido a que hay una variabilidad de cada UGM, donde el mineral blando podría contener mineral más duro que la intermedia o la dura incluso (ver distribuciones de índice de dureza de cada UGM en la Figura 4.2). Debido a que la optimización es en un solo paso y se tiene acceso a la información sobre el mineral que se va a alimentar, ocurre este suavizamiento.

Otro efecto del DSM es la reducción de la necesidad del BESS. Esto quiere decir que debido a que el manejo de mineral con 3 *stockpiles* actúa como un reductor de la energía requerida de noche, se requiere además un BESS menor para actuar como complemento de la energía comprada de la red y suplir las necesidades del SAG. Este resultado va a ser discutido junto al caso 3 a continuación.

Caso 3

En este último caso, se integran todas las variabilidades del sistema, ya sea solares y del mineral con su dureza y el DSM por lo que se considera el caso donde el modelo estocástico está completo. Al igual que en el caso estocástico solar, se consideran 100 años para ambos.

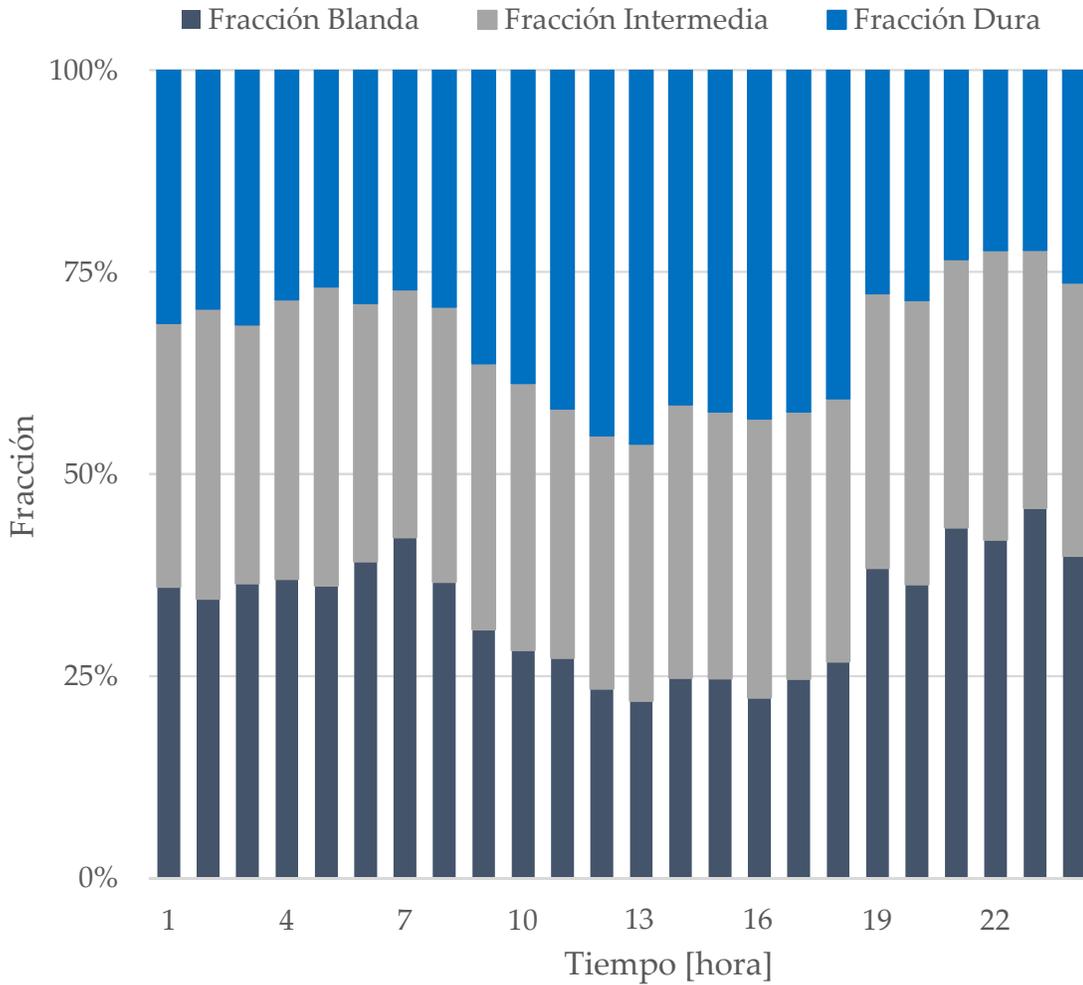


Figura 4.7: *Demand Side Management* como administración del mineral.

Los resultados de este caso y el anterior se presentan en la Figura 4.8 en donde se normalizan los últimos valores obtenidos del caso 1, es decir, sin DSM pero con el modelo estocástico solar incorporado.

Se puede ver claramente en este gráfico que la capacidad energética del BESS es menor en los casos con DSM y estocástico completo que sin DSM en un 9 % y 7 % respectivamente. Este es el efecto más pronunciado que produce el DSM más que la reducción de costos ya que estos equivalen a un 3 % y un 2 % menos respectivamente, al igual que con la planta FV. A pesar de necesitar una planta FV-BESS menor y que la potencia contratada sea un 1 % menor en ambos casos, las importaciones de la red se mantienen prácticamente al mismo nivel.

Comparando ambos casos con DSM, se tiene que al igual como ocurría al aplicar la estocasticidad del sol, el optimizador se vuelve más conservador. Esto se ve en todos los aspectos del problema salvo en la potencia contratada que se mantiene constante en ambos.

Los resultados finales de esta optimización considerando tres molinos SAG con un consumo pro-

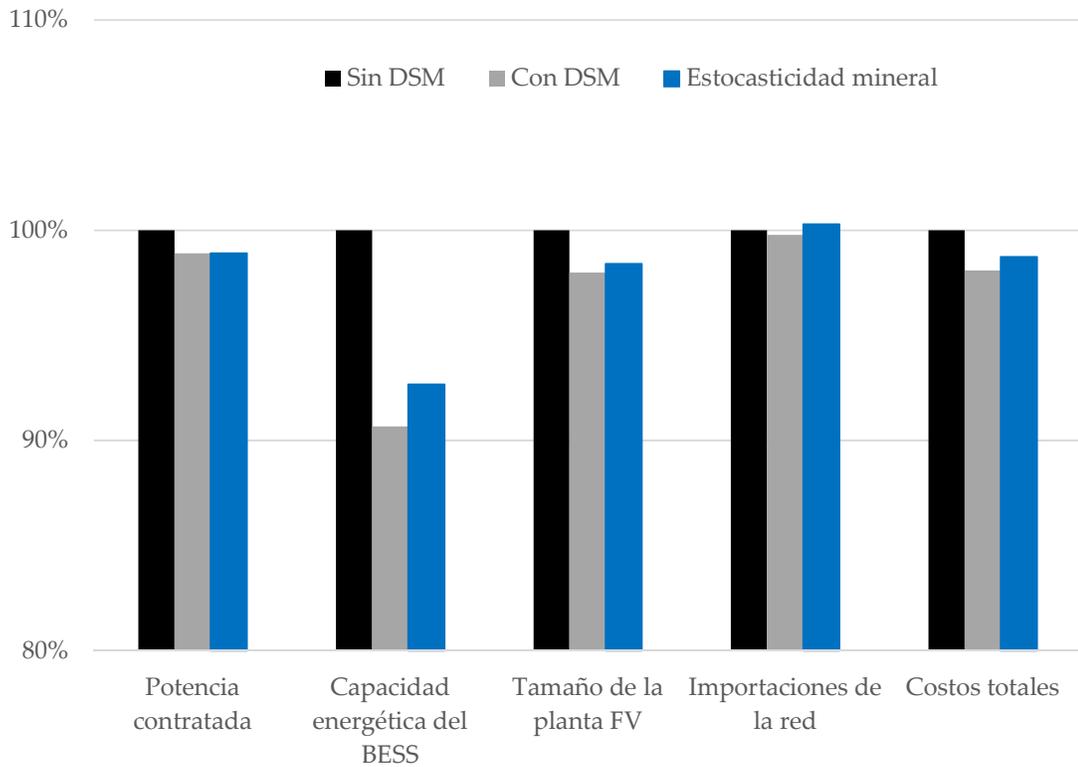


Figura 4.8: Resultados caso 2 y 3 modelo estocástico.

medio en potencia de 42 MW (como los considerados en los modelos del comienzo con los datos reales), se obtiene que se obtienen los menores costos con una potencia contratada de 37.88 MW, una planta FV de 103 MW y un BESS con capacidades energéticas y en potencia de 175 MWh y 44 MW respectivamente. Esta configuración permite una fracción solar de 0.72. Esto equivale a un costo total de 61 kUS\$/día aproximadamente. La inversión requerida para esta planta es de 197 millones de dolares aproximadamente.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

Esta tesis es desarrollada modelando y simulando la optimización determinista y estocástica de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica en conjunto a un sistema de apoyo de almacenamiento basado en baterías para suministrar energía a la operación de la molienda semiautógena de minerales para estudiar la integración y explorar la sinergia de este sistema completo. A la vez, los modelos permiten conocer cuáles son las dimensiones de la planta óptima que reduce los costos totales, incluyendo los de operación y de inversión.

Una primera aproximación a modelar el sistema se llevó a cabo de manera determinista utilizando datos reales de consumo de tres molinos SAG. Se optimizó el proceso para realizar diversas sensibilidades de los principales parámetros del sistema que son la potencia contratada, el tamaño de la planta solar y la capacidad energética y en potencia del BESS. La potencia contratada resulta ser un parámetro muy influyente frente a los requerimientos de la planta solar y BESS para reducir costos. Mientras menor sea la potencia contratada, se requiere una mayor planta para suplir los déficits energéticos que resultan entre esta y el consumo variable de los molinos SAG de tal manera de no recurrir a un sobreconsumo produciendo considerables multas. A la vez, si esto se implementa de buena manera, se pueden lograr importantes reducciones de costos.

Para lograr integrar en su totalidad el fenómeno de la molienda SAG con la generación de energía solar FV, se propuso una segunda aproximación que incluye una administración de energía o DSM. En este caso, el DSM se lleva a cabo bajo la administración del mineral, el cual debido a su variabilidad en cuanto a su dureza, genera diferentes consumos de potencia en el molino. En esta aproximación, la administración del mineral se desarrolló como un libre ordenamiento óptimo de los paquetes discretos de mineral con sus consumos asociados en el transcurso de un día. De esta manera se asigna el mineral que tiene un mayor consumo y dureza en el día, alimentando en la noche el mineral con menor consumo o blando aprovechando en su totalidad la energía solar fotovoltaica que es generada durante las horas en que hay luz solar, y almacenando parte de ella en el sistema de baterías BESS para suministrar energía durante la noche. Gracias al DSM se puede reducir la planta requerida reduciendo aun más la potencia contratada logrando mejores resultados aun en cuanto a la reducción de costos.

La modelación de la optimización determinista del modelo permite conocer a grandes rasgos el impacto de las diferentes variables al realizar sensibilidades sobre ellas, basado en dos formas de

considerar el ciclaje de las baterías mostrando ser el del Macro caso 2 el más eficiente. La principal fuente de ahorro es el tamaño de la planta fotovoltaica, solo que al agregar los costos de inversión entregan como resultado una reducción de $0.22 \%/MW_{FV}$. Se puede ver que hay un quiebre en la curva de costos en donde los ahorros bajan a $0.2 \%/MW_{FV}$. El DSM toma parte en que mientras más altos sean los consumos durante el día, la curva de mayores reducciones de costos se prolonga llegando al punto de quiebre con plantas solares más grandes aun. Además, el DSM permite una mayor reducción de la potencia contratada libre de multas. Más que una reducción de costos, esto permite estabilizar el consumo desde la red eléctrica fijándolo en el punto de la potencia contratada seleccionada y complementando la energía faltante con energía solar y la almacenada en el BESS. Por lo mismo, mientras más baja sea la potencia contratada, mayor tiene que ser el BESS para ayudar a complementar, en cuanto a potencia y energía. Debido a que la planta FV se mantiene constante durante la sensibilidad del BESS, se hace difícil analizarlos por separado y poder apreciar el verdadero potencial de este, ya que va estrechamente relacionado a la cantidad de energía FV disponible.

Con los resultados anteriores se incorpora una tercera aproximación más completa del modelo, en donde se incluye el dimensionamiento de la planta dentro de la optimización. A la vez, se incorpora la incerteza de la roca en cuanto a su dureza y de la generación de energía solar FV en una optimización estocástica. En esta aproximación ya no se utilizan los datos de potencia reales del molino SAG ni los datos de energía solar FV disponibles anteriormente y se aumenta el horizonte temporal a un año para ver la estacionalidad. Utilizando una secuencia de extracción basada en unidades geometalúrgicas con sus datos de dureza se confeccionan diversos años de alimentación al molino, obteniendo mediante los valores de SPI, los CEE de la roca alimentada. Además, desarrollando un algoritmo basado en Cadenas de Markov aplicándolo sobre 13 años de generación de energía solar obtenidos desde el Explorador Solar, se generaran diversos años aleatorios con curvas de potencia FV. Estos años de datos generados son utilizados bajo el método del valor esperado en el modelo de optimización. Por último, se incorpora un nuevo sistema de DSM basado en el manejo de mineral usando tres *stockpiles*, uno para el mineral duro, otro para el intermedio y otro para el blando. De esta manera se puede elegir desde que *stockpiles* sacar mineral alimentando una mezcla de estos para manejar el consumo.

Los resultados de esta última aproximación son de gran interés, ya que muestran posibles reducciones de costos totales de sobre 31.3% anuales, considerando un año solar promedio frente a un caso base sin instalación de una planta FV y BESS. Además, la reducción en la potencia contratada en la operación de un año es de 32.3% . Debido a que el clima, en especial una presencia de un mal frente climático prolongado (larga secuencia de días nublados), tiene un gran efecto sobre el dimensionamiento del BESS y la potencia contratada, se hace atractivo analizar el caso estocástico solar para dimensionar la planta con un grado mayor de confianza más que basarse en el caso promedio, o caer en el pesimismo del peor caso. Con respecto al año promedio, se reducen en un 54% y un 28% el tamaño del BESS, en un 18% y 9% el de la planta FV, subiendo en un 18% y un 8% la potencia contratada, además de un 30% y un 15% las importaciones de energía desde la red respectivamente para los casos de un año malo climáticamente y el estocástico considerando 100 años solares aleatorios.

Al incorporar el nuevo sistema de DSM de tres *stockpiles*, se comprueba que el optimizador asigna el mineral más duro de día y el más blando e intermedio de noche para integrar de mejor manera la energía solar tal como se piensa que es lógico. Además, al agregar el DSM al caso estocástico

solar, se permite reducir en un 9 % la capacidad energética del BESS y en un 3 % el tamaño de la planta FV. Esto ocurre porque el DSM toma el lugar del BESS al administrar el mineral permitiendo lograr el mismo efecto de administración de energía con un menor equipo de almacenamiento. Al agregar a este último caso con DSM el modelo estocástico completo del sol más la dureza del mineral considerando 100 años diferentes para cada uno, se obtiene como resultado valores más robustos, donde la reducción del BESS es de un 7 % y de la planta FV de un 2 %. Esto es debido a que se tienen que cumplir las restricciones del problema de optimización para minimizar el valor esperado de los costos operacionales de todos los años considerados, en donde se incluyen además años malos que conllevan a tomar decisiones más conservadoras para mantener la robustez de los resultados. A pesar de esto, se obtienen resultados interesantes desde el ámbito económico.

En general, los resultados muestran que es posible integrar la energía solar en el proceso de molienda y a la vez, se produce una buena sinergia entre el efecto de la dureza del mineral en el fenómeno y el sol. Con este estudio se muestra que es posible en una primera aproximación, reducir costos de una faena minera y a la vez, reducir la emisiones asociadas al consumo energético desde la red. Con estos resultados se cumplen los objetivos planteados para esta tesis.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

A pesar de las diversas evoluciones del modelo, todavía hay un vasto espacio de mejora. Por ejemplo, no se consideraron en el análisis de costos el remanaje del mineral necesario con sus diferentes opciones para poder realizar el DSM. Estos costos deberían ser considerados en un futuro para poder contrastar los resultados de los estudios con DSM de manera más correcta y ver el verdadero potencial de ahorro o si podría significar un costo mayor al final. Sumado a esto, se tiene una fuerte adversión a los cambios dentro de la mina, en especial con los operadores. El DSM para su correcta implementación tiene que ser llevado a cabo con un completo cambio en el actuar de la operación de la mina en general lo cual podría ser muy complicado de inculcar en las personas. A su vez, las instalaciones de la mina muchas veces están ya definidas y es complicado y costoso hacer modificaciones que podrían aumentar el costo de implementar este estudio. Por esto, la aplicación de DSM pensado en este trabajo es recomendado para la mina del futuro, en donde se planifique desde un comienzo la integración de energía solar en el proceso y se pueda integrar correctamente sin mayores costos asociados y en donde la operación y planificación de extracción de se defina desde un comienzo pensando en el uso correcto de esta energía renovable. La segregación de mineral duro, intermedio y blando podría traer consecuencias en las futuras etapas de la planta como es la flotación. Si es muy marcada la alimentación a la mina y además hay una preferencia natural de las leyes del valioso a alguno de los tipos de mineral, habría grandes efectos sobre la recuperación y problemas sobre los niveles de pulpa dentro de las celdas. Por eso, el DSM además se debería planificar desde la extracción del mineral, seguido de un estudio geometalúrgico asociado a este para poder controlar de mejor manera los parámetros importantes para la planta y administrarlos de mejor manera. Incluso con un buen seguimiento, se podría expandir la cantidad o organización de los *stockpiles* para incorporar un manejo de leyes dentro de las mismas UGM en el modelo de optimización. Además, se podrían incluir estudios texturales sobre los tipos de mineral ya que estos tienen gran influencia sobre las capacidades de conminución del mineral y su comportamiento en el resto de la planta. A pesar de lo anterior, los escenarios sin DSM pueden ser implementados en las minas actuales.

El BESS resulta ser de gran utilidad para la integración de la energía solar en el día a día, pero a su vez, la generación de energía solar tiene una estacionalidad latente. Hay una notable disminución de la generación de energía solar en invierno provocando que se tenga que sobredimensionar el sistema para poder funcionar durante todas las estaciones del año, es decir, si se optimiza solo para la estación de verano o invierno, se obtendrían diferentes resultados. Por esto una alternativa que podría demostrar un gran atractivo es el uso de un sistema de múltiples tipos de batería, por ejemplo, una para el corto plazo (para el día a día) y otra para el largo plazo (para las estaciones). De esta manera se podría suplir el déficit de energía solar en invierno.

Por último, se propone que, para poder cuantificar el ahorro ambiental de implementar el sistema SAG-BESS-FV, se lleve a cabo un análisis de ciclo de vida y así ver el impacto en el potencial reducción de la huella de carbono que tendría el sistema.

Bibliografía

- [1] C. N. de Energía, “Historial de precios de energía.” [En línea] <http://www.cne.cl/wp-content/uploads/2015/05/hist_pn.xls>, 2015. [Consulta: 30 de octubre 2015].
- [2] SunEdison. [En línea] <<http://www.sunedison.cl/info/noticias/bachelet-planta-solar-fotovoltaica.html>>, 2014. [Consulta: 30 de octubre 2015].
- [3] M. Concha, “Escondida construirá mayor planta desalinizadora.” 2013. [En línea] <<http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=110991>>. [Consulta: 05 de diciembre 2016].
- [4] SolarServer, “kwp.” 2015. [En línea] <<http://www.solarserver.com/knowledge/lexicon/k/kwp.html>>. [Consulta: 08 de abril 2017].
- [5] Collahuasi, “Comienza la construcción de a planta solar fotovoltaica de 25 mwp pozo almonte solar.” [En línea] <<http://www.collahuasi.cl/espanol2/noticias2/planta-solar-p-almonte.asp>>. [Consulta: 28 de septiembre 2015].
- [6] E. y Negocios, “Aumentan plantas desaladoras en Chile y se proyectan cerca de 20 en cinco años.” 2015. [En línea] <<http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=173478>>. [Consulta: 05 de diciembre 2016].
- [7] S. García, *Guía Técnica de Energía Solar Termoeléctrica*. Madrid: solar, 2012.
- [8] U. Herrmann, B. Kelly, and H. Price, “Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants,” *Energy*, vol. 29, no. 5, pp. 883–893, 2004.
- [9] L. Cifuentes and J. Simpson, “Temperature dependence of the cathodic and anodic kinetics in a copper electrowinning cell based on reactive electro dialysis,” *Chemical engineering science*, vol. 60, no. 17, pp. 4915–4923, 2005.
- [10] B. Panda and S. Das, “Electrowinning of copper from sulfate electrolyte in presence of sulfurous acid,” *Hydrometallurgy*, vol. 59, no. 1, pp. 55–67, 2001.
- [11] ENERMINE, “Energía solar térmica.” [En línea] <http://www.enermine.cl/portal/est_2.html>. [Consulta: 05 de diciembre 2016].
- [12] E. Córdoba, J. Muñoz, M. Blázquez, F. González, and A. Ballester, “Leaching of chalcopyrite with ferric ion. part i: General aspects,” *Hydrometallurgy*, vol. 93, no. 3, pp. 81–87, 2008.

-
- [13] J. Vilcáez, K. Suto, and C. Inoue, “Bioleaching of chalcopyrite with thermophiles: temperature–ph–orp dependence,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 88, no. 1, pp. 37–44, 2008.
- [14] J. Zeballos, “Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre al año 2012,” tech. rep., COCHILCO, 2013.
- [15] W. G. Davenport, M. J. King, M. E. Schlesinger, and A. K. Biswas, *Extractive metallurgy of copper*. Elsevier, 2002.
- [16] D. C. Sepúlveda, “Análisis del modelo del balance de aguas del tranque de relaves laguna seca y de su impacto económico en los procesos de minera escondida limitada,” 2014.
- [17] F. N. Kissell, *Handbook for dust control in mining*. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh Research Laboratory, 2003.
- [18] R. Josephs, *Solar cell array design handbook*. NASA, 1976.
- [19] A. Goetzberger and V. U. Hoffmann, *Photovoltaic solar energy generation*, vol. 112. Springer Science & Business Media, 2005.
- [20] T. E. Hoff and R. Perez, “Quantifying pv power output variability,” *Solar Energy*, vol. 84, no. 10, pp. 1782–1793, 2010.
- [21] R. Cordero, A. Damiani, G. Seckmeyer, J. Jorquera, M. Caballero, P. Rowe, J. Ferrer, R. Mubarak, J. Carrasco, R. Rondanelli, *et al.*, “The solar spectrum in the atacama desert,” *Scientific reports*, vol. 6, p. 22457, 2016.
- [22] W. T. Jewell and T. D. Unruh, “Limits on cloud-induced fluctuation in photovoltaic generation,” *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 5, no. 1, pp. 8–14, 1990.
- [23] E. Fuentealba, P. Ferrada, F. Araya, A. Marzo, C. Parrado, and C. Portillo, “Photovoltaic performance and lcoe comparison at the coastal zone of the atacama desert, chile,” *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 181–186, 2015.
- [24] P. Ferrada, F. Araya, A. Marzo, and E. Fuentealba, “Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of chile,” *Solar Energy*, vol. 114, pp. 356–363, 2015.
- [25] M. Mani and R. Pillai, “Impact of dust on solar photovoltaic (pv) performance: Research status, challenges and recommendations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3124–3131, 2010.
- [26] K. Branker, M. Pathak, and J. M. Pearce, “A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4470–4482, 2011.
- [27] A. Zervos *et al.*, “Renewables 2013 global status report,” *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Paris, France*, 2013.
- [28] X. Liu and M. Zeng, “Renewable energy investment risk evaluation model based on system dynamics,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 782–788, 2017.
-

-
- [29] R. Rothen, “Inserción de energías renovables en plantas mineras,” Master’s thesis, Universidad de Chile, 2015.
- [30] F. CAT, “Palas de cable eléctrica.” [En línea] <<http://www.finningsudamerica.com/chile/sub/equipos/nuevos/palas-de-cable-el%C3%A9ctrica>>. [Consulta: 05 de diciembre 2016].
- [31] R. R. Lunt and V. Bulovic, “Transparent, near-infrared organic photovoltaic solar cells for window and energy-scavenging applications,” *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 113305, 2011.
- [32] R. S. Bhatia, S. Jain, D. K. Jain, and B. Singh, “Battery energy storage system for power conditioning of renewable energy sources,” in *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on*, vol. 1, pp. 501–506, IEEE, 2006.
- [33] K. Divya and J. Østergaard, “Battery energy storage technology for power systems—an overview,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 511–520, 2009.
- [34] S. Holm, H. Polinder, J. Ferreira, P. Van Gelder, and R. Dill, “A comparison of energy storage technologies as energy buffer in renewable energy sources with respect to power capability,” in *Proc. IEEE Young Reserchers Symposium in Electrical Power Engineering (CD ROM)*, p. 6, 2002.
- [35] D. Linden and T. Reddy, *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill, 2002.
- [36] S. Ramaprabhu, A. Gangadharan, and R. Sripada, “Binary reaction ingrained high current density and long cycle life novel anode material for lithium ion battery,” *Journal of Materials Chemistry A*, 2017.
- [37] X. Li, D. Hui, and X. Lai, “Battery energy storage station (bess)-based smoothing control of photovoltaic (pv) and wind power generation fluctuations,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 464–473, 2013.
- [38] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglabe, and W. Rosehart, “Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, no. 4, pp. 302–314, 2010.
- [39] G. K. Singh, “Solar power generation by pv (photovoltaic) technology: a review,” *Energy*, vol. 53, pp. 1–13, 2013.
- [40] Z. M. Salameh, F. Dagher, and W. A. Lynch, “Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems,” *Solar Energy*, vol. 46, no. 5, pp. 279–282, 1991.
- [41] L. Workman and J. Eloranta, “The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption,” *Proc 29th Con Explosives and Blasting Techniques, Int Society of Explosive Engineers, Cleveland OH*, pp. 1–5, 2003.
- [42] Coener, “Parque solar fotovoltaico pama.” 2014. [En línea] <<http://www.coener.cl/proyecto/detalle.index/47>>. [Consulta: 19 de octubre 2016].
-

-
- [43] CDEC SIC, “Operación real.” [En línea] <<http://www.cdecsic.cl/informes-y-documentos/fichas/operacion-real/>>. [Consulta: 19 de octubre 2016].
- [44] M. Wortley, E. Nozawa, and K. Riihioja, “Metso smarttag—the next generation and beyond,” in *35th APCOM Symposium, Wollongong*, pp. 24–30, 2011.
- [45] S. Hart, T. Rees, W. Valery, and A. Jankovic, “Process integration and optimisation of the boddington hpgc circuit,” in *SAG 2011 CONFERENCE. Canada*, pp. 25–28, 2011.
- [46] W. Valery and E. Rybinski, “Optimization process at antamina boosts production and energy efficiency,” *Engineering and Mining Journal*, vol. 213, no. 9, p. 116, 2012.
- [47] S. Morrell, “Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples,” *Minerals Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 447–451, 2004.
- [48] D. Bulled and C. McInnes, “Flotation plant design and production planning through geometallurgical modelling,” *Technical Bulletin*, p. 3, 2005.
- [49] L. T. d. Santos Junior and H. Delboni Júnior, “Modelling and simulation of the santa rita mine milling circuit,” *Rem: Revista Escola de Minas*, vol. 69, no. 2, pp. 207–211, 2016.
- [50] W. Valery, R. Vale, K.-A. Duffy, A. Jankovic, and E. Tabosa, “Complete optimisation from mine-to-mill to maximise profitability,” *Gold and Technology*, vol. 32, no. 2, 2016.
- [51] H. Wasmuth, “La determinación de la aptitud a la molienda y del consumo de específico de energía según el ensayo de bond para la molienda de minerales y rocas,” *Materiales de construcción*, no. 140, pp. 19–32, 1970.
- [52] J. Ipinza, “El consumo específico de energía en plantas concentradoras,” *Minería Chilena*, no. 342, pp. 171–173, 2009.
- [53] M. Escondida, “Fundamentos teóricos aplicado a plantas concentradoras de sulfuros de cobre,” tech. rep., Operaciones Concentradora Lagura Seca, Septiembre 2004.
- [54] T. Neesse, J. Dueck, and L. Minkov, “Separation of finest particles in hydrocyclones,” *Minerals Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 689–696, 2004.
- [55] J. Yianatos, M. Lisboa, and D. Baeza, “Grinding capacity enhancement by solid concentration control of hydrocyclone underflow,” *Minerals engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 317–323, 2002.
- [56] MathWorks, “Fuzzy c-means clustering - MATLAB fcm.” [En línea] <<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/fcm.html>>. [Consulta: 20 de octubre 2016].
- [57] MathWorks, “1-D data interpolation - MATLAB interp1.” [En línea] <<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/interp1.html>>. [Consulta: 26 de octubre 2016].
- [58] J. Garcia-Gonzalez, R. M. R. de la Muela, L. M. Santos, and A. M. Gonzalez, “Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 460–468, 2008.
-

-
- [59] P. Denholm and R. Sioshansi, "The value of compressed air energy storage with wind in transmission-constrained electric power systems," *Energy Policy*, vol. 37, no. 8, pp. 3149–3158, 2009.
- [60] A. Tuohy and M. O'Malley, "Pumped storage in systems with very high wind penetration," *Energy policy*, vol. 39, no. 4, pp. 1965–1974, 2011.
- [61] C. Suazo-Martínez, E. Pereira-Bonvallet, and R. Palma-Behnke, "A simulation framework for optimal energy storage sizing," *Energies*, vol. 7, no. 5, pp. 3033–3055, 2014.
- [62] MathWorks, "Mixed-integer linear programming (MILP) - MATLAB intlinprog." [En línea] <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>>. [Consulta: 30 de noviembre 2016].
- [63] M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499–514, 2014.
- [64] S. Vaeck, "The different roles of energy storage in highly renewable power systems," *Ku Leuven Faculteit Ingenieurswetenschappen*, 2015.
- [65] D. Chung, C. Davidson, R. Fu, K. Ardani, and R. Margolis, "Us photovoltaic prices and cost breakdowns: Q1 2015 benchmarks for residential, commercial, and utility-scale systems," tech. rep., NREL Technical Report, 2015.
- [66] M. de Energía de Chile y DGF, "Explorador solar." 2017. [En línea] <<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>>. [Consulta: 24 de marzo 2017].
- [67] S. P. Meyn and R. L. Tweedie, *Markov chains and stochastic stability*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [68] J. Starkey and G. Dobby, "Application of the minnovex sag power index at five canadian sag plants," *Proceeding Autogenous and Semi-Autogenous Grinding*, pp. 345–360, 1996.
- [69] M. Jahani, M. Noaparast, A. Farzanegan, and G. Langarizadeh, "Application of spi for modeling energy consumption in sarcheshmeh sag and ball mills," *Journal of Mining and Environment*, vol. 2, no. 1, 2012.
- [70] GAMS, "Gams - introduction." 2017. [En línea] <<https://www.gams.com/products/introduction/>>. [Consulta: 26 de marzo 2017].
- [71] R. Toscano, *Structured controllers for uncertain systems: A stochastic optimization approach*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [72] T. Guena and P. Leblanc, "How depth of discharge affects the cycle life of lithium-metal-polymer batteries," in *Telecommunications Energy Conference, 2006. INTELEC'06. 28th Annual International*, pp. 1–8, IEEE, 2006.
- [73] R. P. King, *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier, 2012.
-

- [74] IBM Knowledge Center, “Introducing the barrier optimizer.” [En línea] <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SS9UKU_12.4.0/com.ibm.cplex.zos.help/UsrMan/topics/cont_optim/barrier/02_barrier_intro.html>. [Consulta: 04 de abril 2017].

Capítulo 6

Anexos

6.1. Artículos científicos confeccionados en el transcurso de la tesis

6.1.1. Artículo de conferencia Enermin 2016

Se envió un artículo titulado *Combined operational model of a copper SAG mill, photovoltaic and battery energy storage system* al congreso Enermin 2016, el cual fue realizado en agosto del 2016.

Este trabajo fue aceptado y seleccionado para presentación en el congreso. La versión final de este trabajo se encuentra adjunta a continuación.

Combined operational model of a copper SAG mill, photovoltaic and battery energy storage system

Giovanni Pamparana^{1*}, Willy Kracht^{1,2}, Rodrigo Palma-Behnke³, Gustavo Díaz³, Jannik Haas^{3,4}, Roberto Román³

1. *Department of Mining Engineering, University of Chile, Chile*
2. *Advanced Mining Technology Center, AMTC, University of Chile, Chile*
3. *Energy Center, Department of Electrical Engineering, University of Chile, Chile*
4. *Department of Stochastic Simulation and Safety Research for Hydrosystems (IWS/SC SimTech), University of Stuttgart, Germany*

ABSTRACT

The increasing energy cost and greenhouse gas mitigation targets have a strong impact on the mining sector. Within the mining-milling processes, and specifically in mineral processing, the grinding operation is responsible for almost 50% of the energy consumption. At the same time, it is highly variable, which forces to arrange large power capacity contracts. This work explores the synergy that occurs when combining the energy from the grid, a photovoltaic system (PV) and a battery energy storage system (BESS) to operate a copper SAG mill. For this, a mixed-integer linear programming model was developed. It minimizes the operational costs of running three SAG mills under several technical and economic constraints. Furthermore, a demand side management option is explored by adjusting the blending of the SAG's feed, in terms of the rock hardness, to the availability of PV and battery energy. As expected, the consumption from the grid can be reduced, depending on the PV plant generation capacity, leading to a relevant reduction in operational costs. Further savings are achieved by planning the rock hardness in the SAG's feed. Additionally, the consumption level is kept below the contracted power, which suggests the possibility of reducing the capacity contract without incurring into fines. BESS becomes crucial for larger PV plants, where also the demand side management is a key contributor in cost reduction. The developed simulator provides useful insights for planning power contracts, investments in PV and BESS. Moreover, recommendations for operators feeding the SAG mills to minimize costs can be derived. For a future work, long-term simulation with a battery ageing implementation is planned, including the optimization of the plant sizing.

Key words: SAG mill power consumption, short-term cost optimization model, battery energy system (BESS), photovoltaic energy integration, demand side management, planning of mining operations

*Corresponding Author: Department of Mining Engineering, University of Chile, Tupper 2069, Santiago, Chile. Phone: +569-88882035 Email: giovanni.pamparana@ug.uchile.cl

INTRODUCTION

The increasing presence and interest in solar energy of Chile's mining industry has been triggered by high energy prices, larger concern for the environment pollution associated with the use of fossil energy, and new CO₂ emission targets (SunEdison, 2014). Additionally, a steady increase of energy consumption in the mines has been observed, pressed by diverse factors including the change to a deeper mineralogy, lower mineral grades and increasing rock hardness (Zeballos, 2013). Also, many desalination plants have emerged as response to the lack of fresh water in the north of Chile, further stressing the costs (Concha, 2013) (Ibarra, 2015).

The grinding in Semi-Autogenous Grinding (SAG) Mills is one of the main processes in the grinding operation. They are responsible in average for almost 50% of the electrical energy consumption of the entire mining process in Chile (Zeballos, 2013). The many factors that affect the consumed energy, make it highly dynamic in time, which is why several forecast methods have been developed. The generally accepted and most accurate load forecasting model uses a pilot circuit with a 6'x2' mill (Mosher and Bigg, 2001). Other studies relate the energy consumption with the rock mass characterization, providing an easier mine-to-mill study (Morrell, 2003).

To confront the variability and uncertainty of the SAG mill's load and photovoltaic (PV) energy, battery energy storage systems (BESS) are an attractive alternative. Moreover, BESS may provide frequency regulation; altogether contributing with stability and reliability to power systems (Miller et al., 2010). However, the services a BESS can provide in such joint -mining and PV- installations, remain unstudied. The objective of this paper is to understand the possible advantages of a BESS and a PV power plant integrated into the operation of a copper SAG mill in the Atacama Desert.

This paper continues describing the proposed methodology. After that, the case study is presented with the corresponding description of the system and data followed by the results and discussions. The paper finally presents the conclusions and future work.

METHODOLOGY

The working hypothesis of this paper is that BESS can provide multiple services in the context of PV integration into SAG mills operation. For this, an optimization model is proposed, that minimizes the operational costs of the system composed by the mills, PV, and BESS, including its cycling. A mixed-integer linear programming model is implemented using MATLAB®.

Further operational flexibility, and its consequent cost savings, can be achieved by managing the feed of the SAG mills, considering the tonnage and rock hardness during the operation where both have a direct influence on the mill power load. For this, another model was developed to plan the mineral blending. This constitutes a demand side management option that allows adapting the power consumption to the availability of the PV system and BESS.

In summary, two models are proposed which will be explained as follows:

Model 1, without demand side management, involving equations (1)-(2), (6)-(19); and

Model 2, with demand side management, involving equations (1), (3)-(19).

Both models are tested in several case studies with specific sensitivity analysis to obtain results.

Optimization model

The model considers a SAG Mill connected to the grid, including a PV power plant and a BESS (Figure 1). Missing and excess energy can be bought and sold from/to the grid. The model minimizes the total operational costs of running the mills taking into account the cost of penalties when exceeding the contracted power, cost of imported energy, income of exported energy, and cost of the BESS in terms of cycling.

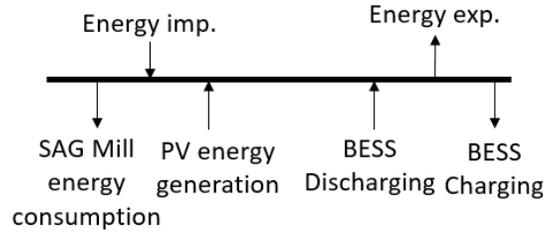


Figure 1 Scheme of the system to be modelled

The costs associated to the investment of PV and BESS, as well as power capacity contracts, are not considered endogenously in the optimization. Instead, scenario analysis was performed ex-post for different sizes of these parameters. The objective function and constraints of the optimization model are explained in this section.

Objective function

The objective function consists in minimizing the total operational cost (OC) of operating the SAG mills (Equation 1).

$$\begin{aligned}
 \min OC = & P_{con} \cdot C_{con} + (p_{max}^{imp} - P_{con}) \cdot C_{penalty} - \sum_{t=1}^T p_t^{exp} \cdot C_{exp} \cdot dt + \sum_{t=1}^T p_t^{imp} \cdot C_{imp} \cdot dt + \\
 & \sum_{t=1}^T cc_t^+ \cdot \frac{Inv_{bat}}{N_{max}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

The first term is the contracted power capacity cost. Both P_{con} and C_{con} are inputs to the problem and not a decision variable. The second term is the penalty cost, given by the difference between the maximum imported power (optimization variable) and the contracted capacity. The third and fourth terms are the total cost of exported and imported energy respectively. The last term is the cycling cost of the BESS, which is expressed as a cost per cycle made. The cost per cycle is estimated on basis of the invested capital for the BESS divided by it maximum of life-cycles. A cycle is here defined as a change in status from discharge to charge mode.

System energy balance constraints without demand side management

$$(p_t^{imp} + p_t^s - p_t^{exp} + p_t^{bdis} - p_t^{bch}) \cdot dt = P_t^{SAG} \cdot dt \quad \forall t
 \tag{2}$$

Equation (2) shows the energy balance between the imported and exported energy, the energy generated by the PV plant (p_t^s), the energy involved in the BESS charging and discharging stages, and the energy consumed by the SAG mills. This equation is only used by Model 1.

System energy balance constraints with demand side management

$$(p_t^{imp} + p_t^s - p_t^{exp} + p_t^{bdis} - p_t^{bch} - \sum_{i=1}^T a_{it} \cdot P_i^{SAG}) \cdot dt = 0 \quad \forall t \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^T a_{it} = 1 \quad \forall t \tag{4}$$

$$\sum_{t=1}^T a_{it} = 1 \quad \forall i \tag{5}$$

Equations (3)–(5) are analogous to the previous energy balance constraints, but is used by Model 2 to allow demand side management. The last term in the left side of equation (3) is the one responsible for making the arrangement of the SAG mill energy power consumption, simulating the mineral planning and blending. It is assumed that the operator can freely sort the demand of the mills, by picking demand among historic data without replacement. This means, the blending rearranges the power consumption packages, while maintaining the same overall power used by the mill, but providing an additional degree of freedom for cost reduction.

For this, equations (4) and (5) are used. They assure that the matrix a_{it} has only one time the number one on each line and column, so only one of the historic P_i^{SAG} is on each line and is not repeated.

Maximum imported power constraint

$$p_t^{imp} - p_{max}^{imp} \leq 0 \quad \forall t \tag{6}$$

$$P_{con} \leq p_{max}^{imp} \tag{7}$$

The maximum imported power additional variable is used to calculate the penalty of overconsumption for a given contracted power value. Equation (6) saves the value of maximum imported power.

Equations (7) sets p_{max}^{imp} as P_{con} , if overconsumption does not occur, implying that the penalty in Equation (1) is zero. Conversely, if overconsumption does happen, p_t^{imp} stays larger than the contracted power, and the penalty in the objective function becomes positive.

Energy balance in the BESS

$$p_t^{bdis} \cdot \frac{1}{\eta_{bdis}} \cdot dt - p_t^{bch} \cdot dt \cdot \eta_{bch} - soc_t \cdot E_{max}^{bat} + soc_{t+1} \cdot E_{max}^{bat} = 0 \quad \forall t \tag{6}$$

$$soc_1 = Soc_{ini} \tag{7}$$

$$soc_{T+1} = Soc_{final} \tag{8}$$

$$Soc_{min} \leq soc_t \leq Soc_{max} \quad \forall t \tag{9}$$

The energy balance of the BESS at time period t+1, equation (8), equals to the energy stored at the previous period t, plus the energy charged, minus the energy discharged, considering conversion losses. The initial and final states of charge are set in equations (9) and (10). Equation (11) assures the state of charge is always above its minimum and below its maximum.

Battery charge or discharge status constraint

The lifetime of the BESS is modelled as maximum number of cycles (charge-discharge). This is

controlled by a cycle counter, variable which is included in the total cost function.

$$p_t^{bdis} - b_t^{dis} \cdot P_{max}^{bat} \leq 0 \quad \forall t \tag{10}$$

$$p_t^{bch} - (1 - b_t^{dis}) \cdot P_{max}^{bat} \leq 0 \quad \forall t \tag{11}$$

Equation (12) assures that the BESS discharging power is always limited by its maximum capacity. The binary variable b_t^{dis} is used to ensure that the BESS only discharges when turned on, while equation (13) is analogous for charging. Moreover, by using the expression $(1 - b_t^{dis})$ it is assured that the BESS cannot charge or discharge at the same time.

Cycle counter constraint

$$b_t^{dis} - b_{t-1}^{dis} - cc_t^+ + cc_t^- = 0 \quad \forall t \tag{12}$$

$$cc_1^+ = 0 \tag{13}$$

$$cc_1^- = 0 \tag{14}$$

The binary variable cc_t^+ is used to indicate every start of discharging cycle. When a new cycle starts, equation (17) forces cc_t^+ to become positive. Consequently, the sum of cc_t^+ corresponds to the total number of cycles in the simulated time period (Equation 1). The binary cc_t^- is an auxiliary variable for the counter.

CASE STUDY

Case definition and input data

The models are applied to an academic case study. Four cases, in addition to the base case, are studied using the models proposed earlier. Table 1 describes the definition of each case. Some variables are subjected to sensitivities, such as the contracted capacity in C2, size of PV plant in C1, BESS energy capacity in C3, and BESS power capacity in C4.

Table 1 Definition of cases

Case	Models used	Contracted power [MW]	PV plant [MW]	BESS energy capacity [MWh]	BESS inverter power [MW]
BC	Both models	43	20	10	2
C1	Both models	43	Variable	10	2
C2	Both models	Variable	20	10	2
C3	Model one	41.5	20	Variable	2
C4	Model one	41.5	20	10	Variable

As what refers to the inputs, real SAG mill power consumption data and real PV generation curves located on the Atacama Desert in Chile are used. Data of a 15 minutes time resolution are used, for a simulation period of one day.

The selling and purchasing price of energy are considered as 71.5 US\$/MWh and 85.7 US\$/MWh,

respectively, while the costs for the contracted power is 42.8 US\$/MW. The fines for power consumption are charged for the whole year for the peak load, which is considered as 156 kUS\$/MW. The BESS investment cost is 200 kUS\$/MWh (Vaeck, 2015) with a battery life of 2000 cycles.

The initial, final, maximum and minimum SOC was set to 50%, 50%, 100% and 20%, respectively. The BESS is assumed to have an efficiency of 95% for discharging and 95% for charging. The maximum SAG mill power consumption is 42.17 MW and the minimum is 40.77 MW whilst the average is 41.58 MW.

The simulations have been run in a computer with a 3.5 GHz octa core processor and 16 GB of RAM using the optimization toolbox from MATLAB®. The first model has 962 variables where 384 are binaries, and the second model has 10 178 variables where 9600 are binaries.

Results and discussion

Impact of BESS and PV on SAG operation

The BC is solved in 0.20 seconds and 0.25 seconds for Model 1 and Model 2, respectively. The results operation of Model 1 and 2 are slightly different (Figure 2). Both achieve a 15.7% cost reduction, when compared to comparing the situation without the PV power plant and BESS. Since the power contract is above the maximum consumption and there is no PV energy excess to export, the mineral blending does not provide any improvement.

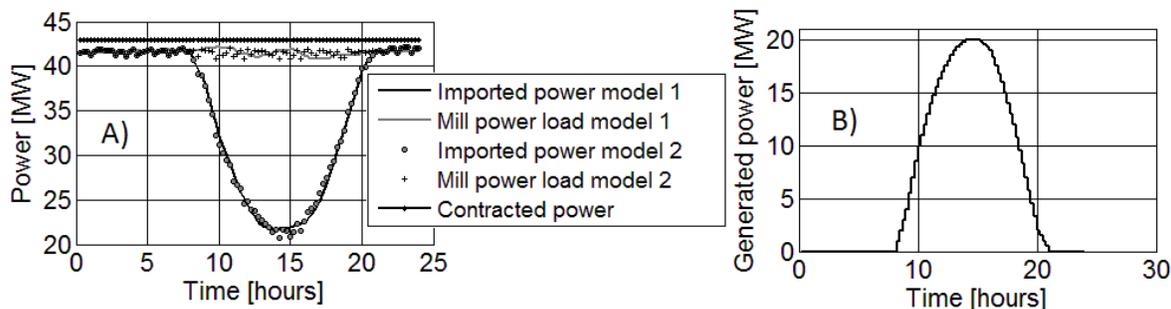


Figure 2 A: the simulation of both models for the base case, B: the PV energy generation curve

Impact of PV power plant size

The simulation of C1 shows the different behaviors of the system in response to PV plant sizes. Larger PV sizes contribute to operational savings, in the order of 0.9% per MW_{PV}. The computationally most expensive cases (PV capacity over 42 MW) of Model 1 take 0.21 seconds to run in average, while those of Model 2 about three hours.

As the cycling of BESS is costly, the BESS usage is limited for small PV plants. In fact, imported energy matches demand during the night, PV provides the supplement during the day, and BESS shows no activity. Also, the mineral blending at low PV generation does not contribute towards lower costs. There is no value in managing energy, if there is no excess to be managed.

However, when the generated PV energy is higher than the maximum consumption, the BESS starts

managing the energy. It discharges completely before the PV generation starts, to be able to charge it during day time. Excess energy is exported. But, the contribution to operational savings is with 0.4%/MW_{PV} a bit lower when compared to smaller PV plants, conditioned by the conversion losses of the BESS. Considering an inversion on 1500 kUS\$/MW (Goodrich et al., 2012) and an annuity of 10% of the inversion to 25 years, a 96.9 kUS\$/MW/year savings can be obtained discounting the annuity until 45 MW. At 60 MW, a difference is obtained where without mineral blending you achieve 64.0 kUS\$/MW/year and with mineral blending 90.2 kUS\$/MW/year.

The mineral blending derives in further cost reductions, when compared to the case without blending management. These savings grow for larger PV power plants, in about 0.7%/MW_{PV}, as shown in Figure 3. Hence, for PV plants larger than the SAG mill load, the impact of optimizing the blend is similarly important than extending the PV plant.

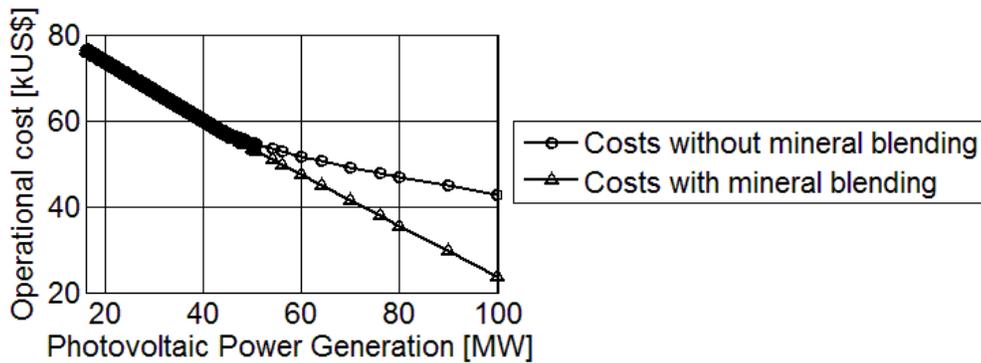


Figure 3 Operational cost on PV energy availability

Impact of contracted capacity

Results from C2 show that the feed optimization has an important role when making decision on the contracted power. Especially, for lower contracted power, not managing the feed leads to important penalty costs. The computing times are similar to those of the previous section.

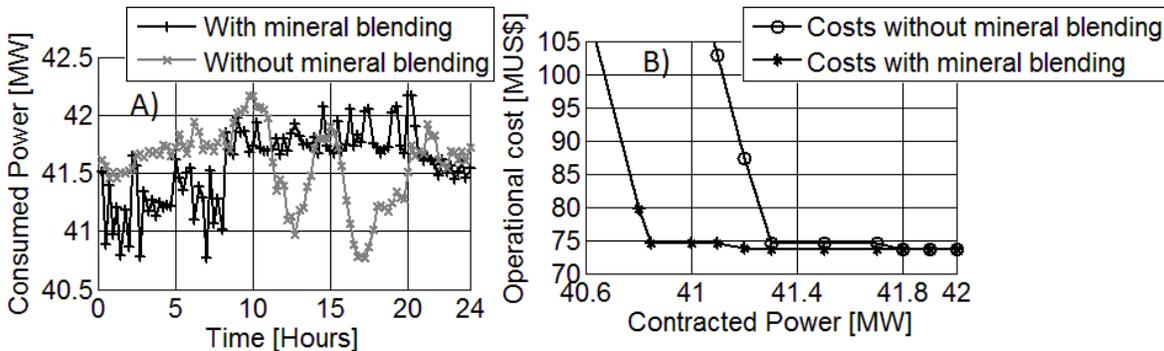


Figure 4 A: the optimized power consumption from the mineral blending, B: the operational costs corresponding to the contracted power variation

The minimum power contract, in which no penalty fees are incurred, is 41.28 MW. If the mineral blend is optimized, this limit can be lowered to 40.83 MW. For this case, the difference of operation with and without mineral blending is depicted in Figure 4. It can be observed that a higher power

consumption occurs during daytime. Between 41.28 and 41.60 optimizing the blend still provides advantages, but they become smaller.

When the contracted power capacity is high, BESS show no activity. However, for smaller power contracts, the model prefers using the BESS.

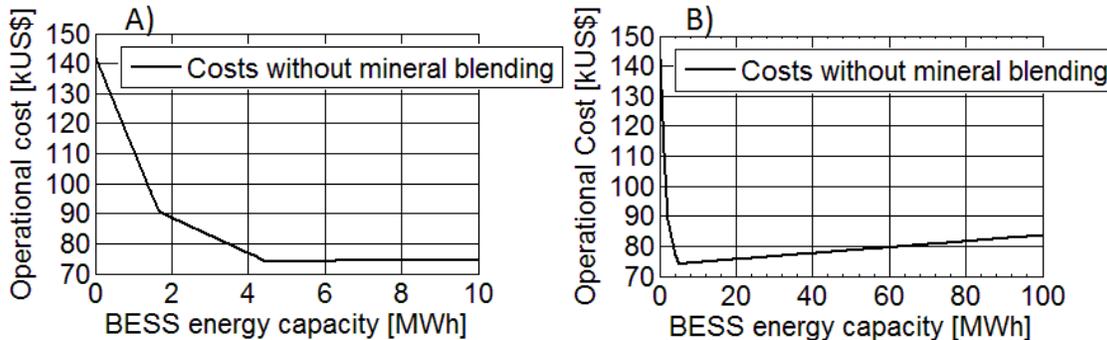


Figure 5 Cost curve of BESS energy capacity with a 2 MW BESS maximum power. A: shows the behavior for small energy capacities, B: shows the behavior with larger capacities

Impact of BESS energy capacity

C3 analyzed the importance of the BESS energy capacity. Most interestingly, a minimum cost is achieved for a BESS of 4.5 MWh, as seen in Figure 5. Before that point, increasing the storage size allows further savings in terms of avoiding penalties. Beyond that size, the cost increases due to cycling costs.

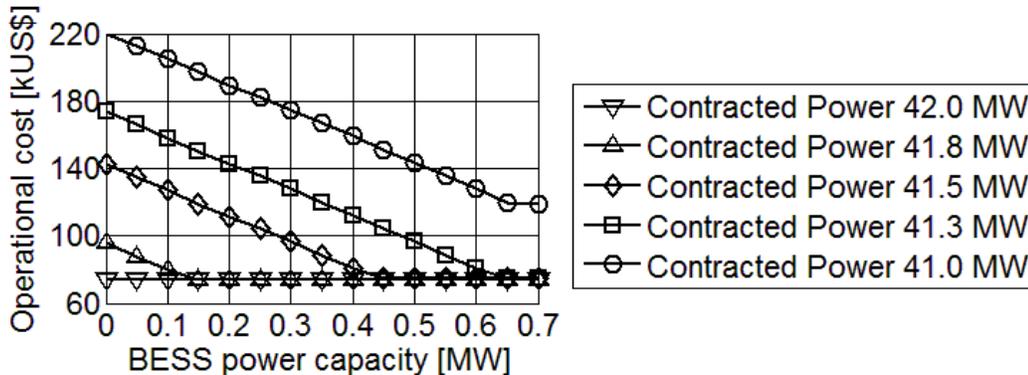


Figure 6 Operational cost against BESS maximum power capacity for different contracted power

Impact of BESS power capacity

Results of C4 show that the BESS power capacity generates linearly increasing savings as seen in Figure 6. The order of magnitude of these savings is 150 kUS\$ per MW of BESS. The achievable savings, however, show a saturation point. In the case study, this point is reached with a BESS of 0.44 MW (for a contracted power of 41.5MW).

This point strongly depends on the contracted power. Consequently, when the contracted power is low, it is more important to get a larger BESS.

CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper, a short-term optimization for the joint operation of a BESS, PV power plant and a SAG mill is proposed. It also includes an optimized mineral blending profile as demand side management option. When the PV power plant is smaller than the SAG mill load, the savings per MW of installed PV are maximum. But, the value of BESS is minimal. For PV power plants larger than the load, BESS is an attractive alternative to achieve savings. Furthermore, the BESS can contribute to reduce the contracted power capacity. Optimizing the mineral blending profile, in addition to the PV plant and BESS, becomes particularly convenient for large PV plants. Here, the marginal benefit of optimizing the blend is similarly important than extending the PV plant. Through sensitivity analysis, the maximum contracted capacity and energy was found.

As a future work, it is proposed to include the size of the PV, BESS, and power contract as decision variables, and the phenomenon of battery ageing. Finally, an extension of the analysis to a long-term life-cycle analysis of the solutions is planned.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Solar Mining (Program for international cooperation CONICYT-BMBF 20140019), SERC (CONICYT/FONDAP/15110019) and AMTC.

NOMENCLATURE

Table 2 Parameter and variable nomenclature

Nomenclature	Description	Unit
Parameters		
T	Number of temporal periods	-
dt	Length of temporal period	Hours
C_{con}	Contracted power cost	US\$/MW
$C_{penalty}$	Penalty for over consumption	US\$/MW/year
p_t^{SAG}	Power consumption of SAG mills at time t	MW
E_{max}^{bat}	Energy capacity of batteries	MWh
p_{max}^{bat}	Maximum power capacity of batteries, limited by inverter	MW
C_{exp}	Selling price of energy	US\$/MWh
C_{imp}	Purchase price of energy	US\$/MWh
P_{con}	Contracted power	MW
SoC_{min}	Minimum state of charge	-
SoC_{max}	Maximum state of charge	-
Inv_{bat}	BESS investment	US\$
N_{max}^{cycles}	BESS life time measured in cycles	-
η_{bdis}	Charging efficiency of BESS	-
η_{bch}	Discharging efficiency of BESS	-

Variables

p_t^{imp}	Power imported from the grid at time t	MW
p_t^{exp}	Power exported to the grid at time t	MW
p_t^S	Power generated by the photovoltaic system at time t	MW
p_t^{dis}	Power discharged from the batteries at time t	MW
p_t^{bch}	Power charged to the batteries at time t	MW
soc_t	State of charge of the batteries at time t	-
p_{max}^{imp}	Maximum power bought from the grid during T	MW
a_{it}	(i x t) binary variables matrix used for rearranging SAG power consumption	-
b_t^{dis}	Binary variable, 1 when BESS is discharging at time t	-
cc_t^+	Binary variable counter, 1 when BESS starts a discharge cycle	-
cc_t^-	Binary variable, auxiliary for the counter	-
t	Index for temporal periods from 1 to T ($t \cdot dt$ = actual time in hours)	-
i	Index from 1 to T	-
p_t^{imp}	Power imported from the grid at time t	MW
p_t^{exp}	Power exported to the grid at time t	MW

REFERENCES

- CIFES (2016) *Energías Renovables en el Mercado Eléctrico Chileno*, Reporte CIFES febrero 2016, Ministerio de Energía, Chile, accessed 18 February 2016, http://cifes.gob.cl/wp-content/uploads/2016/02/Reporte_CIFES_Febrero2016.pdf.
- Concha, M. (2013) *Escondida construirá mayor planta desalinizadora*, Economía y Negocios, accessed 18 February 2016, <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=110991>.
- Goodrich, A. James, T. Woodhouse, M. (2012) *Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities*, Technical Report NREL/TP-6A20-53347, NREL, United States.
- Ibarra, V. (2015) *Aumentan plantas desaladoras en Chile y se proyectan cerca de 20 en cinco años*, Economía y Negocios, accessed 18 February 2016, <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=173478>.
- Miller, N. Manz, D. Roedel, J. Marken, P. Kronbeck, E. (2010) 'Utility scale Battery Energy Storage Systems', *Power and Energy Society General Meeting 25-29 July 2010*, IEEE, IEEE, pp. 1-7.
- Ministerio de Energía (2013) *Propicia la ampliación de la matriz energética, mediante fuentes renovables no convencionales*, Ley 20698, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Chile, accessed 18 February 2016, <http://bcn.cl/1m1bu>.
- Morrell, S. (2003) 'Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples', *Minerals Engineering*, vol. 17, issue 3, pp. 447-451.
- Mosher, J. Bigg, T. (2001) 'SAG mill test methodology for design and optimization', *International Conference on Autogenous and Semi-autogenous Grinding Technology 30 September-October 3rd 2001*, SAG Conference, Vancouver, Canada, pp. 348-361.
- SunEdison (2014) *Presidenta Bachelet inaugura planta solar fotovoltaica más grande de Latinoamérica*, accessed 17 February 2016, <http://www.sunedison.cl/info/noticias/bachelet-planta-solar-fotovoltaica.html>.
- Vaeck, S. (2015) *The Different Roles of Energy Storage in Highly Renewable Power Systems*, Ku Leuven Faculteit Ingenieurswetenschappen, de Vlaamse Scriptie Bank.
- Zeballos, J. (2013) *Actualización de Información sobre el Consumo de Energía Asociado a la Minería del Cobre al Año 2012*, COCHILCO, Santiago, Chile, accessed 18 February 2016, http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/INFORME_05-09-2013_Consumo_energia_2012.pdf.

6.1.2. Artículo de revista Journal of Cleaner Production

Se envió un artículo científico de revista titulado *Integrating photovoltaic solar energy and a battery energy storage system to operate a semi-autogenous grinding mill* al Journal of Cleaner Production para su publicación.

El trabajo se encuentra en estado de revisión por parte de la revista.

Integrating photovoltaic solar energy and a battery energy storage system to operate a semi-autogenous grinding mill

G. Pamparana^{a,b}, W. Kracht^{a,b,*}, J. Haas^{c,d}, G. Díaz-Ferrán^{c,e}, R. Palma-Behnke^{c,f},
R. Román^{c,e}

^a*Department of Mining Engineering, Universidad de Chile, Chile*

^b*Advanced Mining Technology Center, AMTC, Universidad de Chile, Chile*

^c*Energy Center, Universidad de Chile, Chile*

^d*Department of Stochastic Simulation and Safety Research for Hydrosystems (IWS/SC Simtech),
University of Stuttgart, Germany*

^e*Department of Mechanical Engineering, Universidad de Chile, Chile*

^f*Department of Electrical Engineering, Universidad de Chile, Chile*

Abstract

The mining sector in Chile is facing a steady increase of energy consumption, which is mainly explained by the lower grades, the increase in rock hardness, and deeper mines. Although much of the mining activity in Chile is located in the Atacama Desert, where the solar radiation is high, the integration of solar energy in mining remains elusive. This work explores, through simulation, the use of a solar photovoltaic energy system (PV) and a battery energy storage system (BESS), combined with energy from the grid, to operate a semi-autogenous grinding mill (SAG). For this, a novel mixed-integer linear programming model was developed to optimize the operational costs of the joint SAG-PV-BESS operation, after which the best sizes of PV and BESS components are defined through scenario inspection. Further, the implementation of a demand side management (DSM) option is considered by a proper sequencing of the SAG feed to make a more efficient use of the solar energy. The results show an interdependent behavior of the SAG-PV-BESS system and a strong influence of DSM. The use of both PV and BESS allows reducing the contracted power for the SAG, without incurring into overconsumption penalties. If DSM is implemented, the system allocates the higher consumption, associated to harder ore, during daytime to use the available PV energy. Overall, the combined effect of PV and BESS operation of SAG mills allows reducing the energy-associated operational costs. This effect is exacerbated when DSM is implemented.

Keywords: Sustainable mining, Solar energy, Battery energy storage system, Semi-autogenous grinding mill, Demand side management

*Corresponding author at: Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile.
Email address: wkracht@ing.uchile.cl (W. Kracht)

1. Introduction

The Chilean copper mining sector is facing several challenges. From an energy perspective, a steady increase of energy consumption is observed, explained by the lower mineral grades, increase in rock hardness and deeper mines (Harmsen et al., 2013; Cochilco, 2013). Additionally, the country’s CO₂ targets motivate the sector to transit to a cleaner production (McLellan et al., 2012). Coincidentally, much of the copper mining extraction occurs in the Atacama Desert, where the solar radiation level is high, and the levelized costs of energy (i.e., the average energy costs of a given energy source, considering investment and operational costs) of photovoltaic (PV) power plants have become competitive even in absence of subsidies (Fuentealba et al., 2015), thus, emerging as a valuable choice for mining activities.

In Chile, comminution is responsible –in average– for almost 50% of the electrical energy consumption of the entire copper mining process (Cochilco, 2013), being the largest greenhouse gas emitter in the copper concentrate production (Norgate and Haque, 2010). Semi-autogenous grinding mills (SAG) are energy intensive, and operate with a variable power profile, mainly explained by the variable feed rate and ore hardness. These are difficult to forecast (Mosher and Bigg, 2001; Morrell, 2004), and have a strong impact on the power scheduling and the involved energy costs. In fact, mining companies in Chile pay for consumed energy (in \$/MWh) and contracted power (in \$/MW). In case the contracted power is exceeded, a fine in terms of that excess (difference between the maximum power consumption and the contracted power) is applied.

The aforementioned variability and uncertainty might be exacerbated when a PV system is added to the copper production. In other industries, battery energy storage systems (BESS) are a frequent solution to these issues. Nowadays, there are many different BESS technologies, each with characteristic power and energy capacities, reaction times, lifetimes and costs (Beaudin et al., 2010). Hence, their type and size vary strongly with the application. An updated database of worldwide battery energy storage systems is provided by the U.S. Department of Energy (US Department of Energy, 2016). To mention a few, the “Gills Onions” BESS (Vanadium Redox flow, 0.6 MW, 6 h of storage) in the U.S., smoothens the energy demand of a biogas production; Tehachapi Wind Energy Storage Project (Li-ion, 8 MW, 4 h of storage), also in the U.S., improves the grid performance (voltage and frequency

control, congestion management, reliability, etc.). Similarly, Los Andes Substation BESS (Li-ion, 12 MW, 0.3 h of storage) in Chile supports the stability of the electric grid; and Ford used a BESS (Lead acid, 0.8 MW, 2.6 h of storage) for integrating photovoltaic power into their car manufacturing.

35 Finding the optimal size and type of BESS in the context of integration of variable renewable energy systems has been object of research since the '90s. Initially, the approaches were based on a simple energy balance (Schoenung and Burns, 1996; Protogeropoulos et al., 1997). In time, the models have gained more operational details, including their energy and power capacity, and energy balance equation with up to hourly resolution for a whole
40 planning year (Steinke et al., 2013; Schill, 2014; Zerrahn and Schill, 2015). Other operational phenomena, such as self-discharge, variable efficiency and temperature requirements, are often neglected. Also, aging (reduced lifetime of a BESS as a consequence of responding to frequent fluctuations) is rarely captured in expansion planning of storage systems, with the exception of only a few studies (Hajipour et al., 2015; Yao et al., 2009). In the planning of
45 mining operations, considering PV systems and BESS is not well understood but desirable for improved reliability, good practices, cost savings and emission reduction. (Levesque et al., 2014).

The main cause of the SAG energy fluctuation is the variability of the rock hardness (Workman and Eloranta, 2003). In contrast to a conventional mining operation, where the
50 power systems assumes the responsibility of buffering these fluctuations, a SAG-PV-BESS system would benefit from a more flexible load. For example, concentrating load during daytime would reduce the investment costs of BESS. This can be achieved by managing the SAG's feed with the aid of stockpiles, in such a way that hard ore is processed during the day and soft ore during the night (henceforth referred to as Demand Side Management, DSM).
55 The implementation of DSM brings new challenges to the design and operation of mines and concentrators, and may have an impact on the integration of renewable energies in the copper mining process. However, the impact of implementing DSM has not been explored in the literature.

This work aims to explore the synergies that can occur through the implementation
60 of a combined SAG-PV-BESS system. Through an optimization based simulation it will

be explored on how the variability of the SAG mill power consumption can be reduced and stabilized by using a PV-BESS system. This should lead to a cost reduction when considering the total costs (investment, operational and replacement, due to the BESS aging). The DSM is also modeled, showing the impact it has on the combined system and its integration
65 potential.

This paper makes the following contributions: i) it models a combined SAG-PV-BESS system, including the aging of the BESS, to determine the optimal sizes in terms of total savings. And ii) it models and describes the impact of a DSM option when planning such a combined system.

70 **2. Methods**

The working hypothesis of this paper is that BESS can provide multiple services in the context of PV integration into a SAG mill operation, such as energy balance and planning power contracts. For this, an novel optimization model is proposed that minimizes the operational costs of the system composed by SAG mills, PV and BESS (SAG-PV-BESS),
75 including costs for battery replacement due to cycling. This corresponds to a mixed-integer linear programming model, which was implemented using MATLAB®.

Simulating the sizing of power plants together with their operation is computationally expensive, which is why simplifications have to be made. In the literature it can be seen that when focus is put on the operational detail, hybrid formulations are a frequent choice.
80 These, rather than formulating a global optimization for investment and operation of the system, minimize only the operational costs and find, via scenario inspection, alternative system sizes (Suazo-Martínez et al., 2014). This work follows that logic; it uses optimization to find operational costs and scenario inspection to find the best sizes of the PV and BESS systems. Further operational flexibility can be achieved by managing the feed to the SAG
85 mills, i.e., adapting the power consumption to the availability of the PV system and BESS by considering the tonnage and rock hardness during the operation, as both have a direct influence on the mill's load. For this, a sub-model was developed to simulate alternative sequencing of the ore being fed to the plant, which constitutes a DSM option that could allow consequent cost savings and a deeper solar energy penetration.

90 In summary, two model approaches are proposed and tested in a case study with sensitivity analysis: Model I without DSM, and Model II with DSM. In both models, the decision variables are the BESS and PV operation, and the grid imported and exported energy. For Model II, an additional decision variable is the way DSM is fulfilled.

2.1. Optimization model

95 The model considers a SAG mill operation connected to the grid, a PV power plant and a BESS (Figure 1). Missing and excess energy can be bought from and sold to the grid. The model minimizes the total operational costs of running the SAG taking into account the cost of penalties when exceeding the contracted power, cost of imported (purchased) energy, income of exported (sold) energy, and cost of the BESS in terms of cycling.

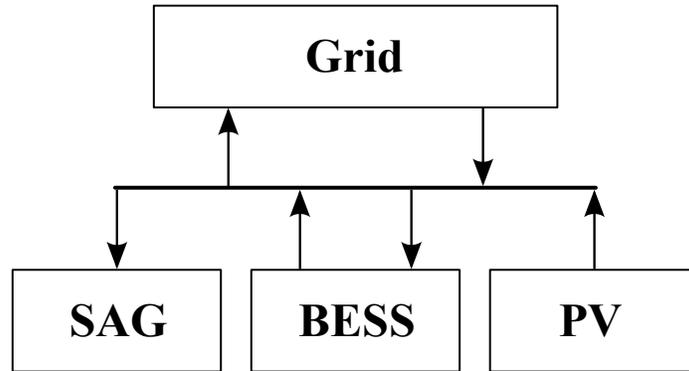


Figure 1: Schematic of the system.

100 Sizing the PV and BESS, as well as the power capacity contracts, is not considered endogenously in the optimization. Instead, for these parameters, scenario inspection is used in order to find cost optimal dimensions. The objective function and the constraints of the optimization model are explained below.

2.2. Objective function

105 The objective function minimizes the total energy operational cost (OC) of the SAG mill (Equation 1), including the battery replacement cost due to cycling, but excluding other

costs such as grinding media.

$$\begin{aligned}
min OC = & P_{con} \cdot C_{con} + (p_{max}^{imp} - P_{con}) \cdot C_{penalty} - \sum_{t=1}^T p_t^{exp} \cdot C_{exp} \cdot dt \\
& + \sum_{t=1}^T p_t^{imp} \cdot C_{imp} \cdot dt + \sum_{t=1}^T \left((p_t^{bdis} + p_t^{bch}) \frac{dt}{2E_{max}^{bat}} \frac{Inv_{bat} \cdot E_{max}^{bat}}{N_{max}^{cycles} (SoC_{max} - SoC_{min})} \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

The first term is the contracted power capacity cost. Both P_{con} and C_{con} are inputs
110 to the problem. The second term is the penalty cost, given by the difference between the
maximum imported power (optimization variable) and the contracted capacity. The third
and fourth terms are the total cost of exported and imported energy, respectively. The
last term is the cycling cost of the BESS, which is expressed as a cost per cycle (BESS
investment/replacement cost divided by its nominal number of cycles). One cycle equals
115 to fully charging and discharging the BESS, up to a given depth of discharge. Until the
end of the BESS' lifetime, its other parameters (energy and power capacity, efficiency) are
considered as constants.

2.3. Constraints

System energy balance constraints

$$(p_t^{imp} - p_t^{exp} + p_t^s - p_t^{bch} + p_t^{bdis} - P_t^{SAG}) \cdot dt = 0 \quad \forall t \tag{2}$$

$$P_t^{SAG} = \sum_{i=1}^T A_{it} \cdot P_i^{SAG} \quad \forall t \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^T A_{it} = 1 \quad \forall t, \quad \sum_{t=1}^T A_{it} = 1 \quad \forall i \tag{4}$$

120

Equation 2 shows the energy balance between the imported and exported energy (p_t^{imp}
and p_t^{exp}), the solar energy generated by the PV plant (p_t^s), the energy involved in the BESS
charging and discharging stages (p_t^{bch} and p_t^{bdis}), and the energy consumed by the SAG mill(s)

(P_t^{SAG}) .

125 Equations 3 and 4 allow the operator re-arranging the ore feed, which translates into a manageable power demand. In this simulation it is assumed that the operator can freely sequence the ore of the whole time horizon (one day). This keeps the overall energy demand constant, but provides an additional degree of freedom for cost reduction. This practice is limited by the size of the stockpiles, which is not considered in the modeling. The term
130 P_i^{SAG} corresponds to the original power consumption vector.

For modeling this, matrix A_{it} is used (equation 4). In Model I (without DSM), the matrix A_{it} is constant (i.e. no change in demand occurs) and corresponds to the identity matrix. In Model II (with DSM), it corresponds to a permutation of the identity matrix that allows re-arranging the historic load while assuring that each element is only used once (sum of
135 each row and column equals to one). The product $A_{it} \cdot P_i^{SAG}$ results in a new sequence of power consumption for the SAG mill when considering DSM.

Maximum imported power constraint

$$p_t^{imp} - p_{max}^{imp} \leq 0 \quad \forall t \quad (5)$$

$$P_{con} \leq p_{max}^{imp} \quad (6)$$

The maximum imported power variable, p_{max}^{imp} , is used to calculate the penalty of over-
140 consumption for a given contracted power value. Equation 5 saves the value of maximum imported power.

Equation 6 defines p_{max}^{imp} as P_{con} if overconsumption does not occur, implying that the penalty in Equation 1 is zero. Conversely, if overconsumption does happen, the imported power (p_t^{imp}) is higher than the contracted power (P_{con}), and the penalty in the objective
145 function becomes positive.

Energy balance in the BESS

$$soc_{t+1} \cdot E_{max}^{bat} = soc_t \cdot E_{max}^{bat} + p_t^{bch} \cdot \eta_{bch} \cdot dt - p_t^{bdis} \cdot \frac{1}{\eta_{bdis}} \cdot dt \quad \forall t \quad (7)$$

$$Soc_{min} \leq soc_t \leq Soc_{max} \quad \forall t \quad (8)$$

In equation 7, the energy balance of the BESS at $t + 1$ ($soc_{t+1} \cdot E_{max}^{bat}$), equals to the energy stored at the previous period t ($soc_t \cdot E_{max}^{bat}$), plus the energy charged ($p_t^{bch} \cdot \eta_{bch} \cdot dt$), minus the energy discharged ($p_t^{bdis} \cdot \frac{1}{\eta_{bdis}} \cdot dt$), considering conversion losses given by their corresponding efficiencies. Equation 8 defines a minimum (Soc_{min}) and maximum (Soc_{max}) value for the state of charge of the batteries (soc_t).

Battery charge or discharge status constraint

$$p_t^{bdis} - b_t^{dis} \cdot P_{max}^{bat} \leq 0 \quad \forall t \quad (9)$$

$$p_t^{bch} - (1 - b_t^{dis}) \cdot P_{max}^{bat} \leq 0 \quad \forall t \quad (10)$$

Equation 9 ensures that the BESS discharging power (p_t^{bdis}) is always limited by its maximum capacity (P_{max}^{bat}). The binary variable b_t^{dis} is used to ensure that the BESS only discharges when turned on, while equation 10 is analogous for BESS charging power (p_t^{bch}). The expression $(1 - b_t^{dis})$ is used to avoid that BESS charges and discharges simultaneously.

2.4. Case study

Case definition and input data

The models are applied to a theoretical case study. Four cases, in addition to the base case, are studied using the models proposed earlier. Table 1 describes each case.

Table 1: Definition of cases

Case	Models used	Contracted power MW	PV plant MW	BESS energy capacity, MWh	BESS inverter capacity, MW
BC	I & II	43	20	10	2
C1	I	43	0 – 120	10	2
C2	I & II	39.7-43	20	10	2
C3	I	40.5 & 41.5	20	0.1 – 60	2
C4	I	41, 41.2, 41.5 41.8 & 42	20	10	0 – 3

The variables subjected to sensitivity are the size of PV plant in C1, the contracted capacity in C2, the BESS energy capacity in C3, and the BESS power capacity in C4.

165 As what refers to the inputs, a SAG mill power consumption data and actual PV generation curves located on the Atacama Desert in Chile are used. A data set with a 15-minutes time resolution was used for a simulation period of one day. The SAG data corresponds to the operation of three mills over six months, from which a typical day was selected through fuzzy c-means clustering. The total production for this typical day was 192,000 tons for the
170 three SAG mills, with a maximum and minimum SAG mill power consumption of 42.17 MW and 40.77 MW, respectively. The average consumption for the day was 41.58 MW.

The price of selling and purchasing energy is 70 US\$/MWh and 85 US\$/MWh, respectively, whereas the price of contracted power (converted to the daily time horizon) is 40 US\$/MW and overpower consumption is 15 kUS\$/MW. These values are highly variable in
175 time and are case-specific.

The model is general enough to consider any type of batteries. In the case study the storage system consists of flooded lead acid batteries with a fixed energy-to-power ratio of 5 MWh per MW for the BC, C1, and C2, and with a variable ratio for C3 and C4. A lifespan of 1500 cycles at 70% of depth of discharge (Suberu et al., 2014) is considered. The initial
180 and final state of charge was set to 50%, and the maximum and minimum state of charge to 90% and 20%, respectively. The BESS efficiency for both charging and discharging was assumed to be 95%.

The annuities of the investment costs are calculated considering a lifetime of 30-years and

a 10% discount rate. The considered investment costs are 110 kUS\$/MWh for the BESS and
185 1,770 kUS\$/MW for the PV system (Chung et al., 2015). The resulting costs are translated
into daily values.

The simulations were run in a computer with a 3.5 GHz octa-core processor and 16 GB
of RAM using the optimization toolbox from MATLAB[®]. Model I has about 960 variables
of which 96 are binaries and takes in average 0.5 seconds to run, while Model II has 10,180
190 variables of which 9,312 are binaries and takes in average 3 hours to run.

3. Results and discussion

The model was run for different cases. The base case (BC) defines the base contribution
that can be obtained by using a constant PV and BESS system, considering the investment
costs. Case 1 (C1) studies the impact of changing the size of the PV plant. In this case,
195 the DSM is justified by showing different total costs curves, which include operational and
investment cost. The contracted power capacity variation in Case 2 (C2) allows seeing the
effect of decreasing the contracted power capacity before incurring into consumption above
the contracted capacity, showing the point of possible power consumption stabilization. In
cases 3 and 4 (C3 & C4), the BESS energy capacity and power variation show what battery
200 size will be needed to manage different power contracts that allow further costs reduction.

Base case

In the base case, the results for Model I and II are quite similar (Figure 2). Both achieve
a 15.7% operational cost reduction, when compared to the situation without the PV power
plant and BESS. Considering the investment costs, a 4.6% cost reduction is achieved. Since
205 the power contract is above the maximum consumption, and there is no PV energy excess
to export, the DSM does not play a role here.

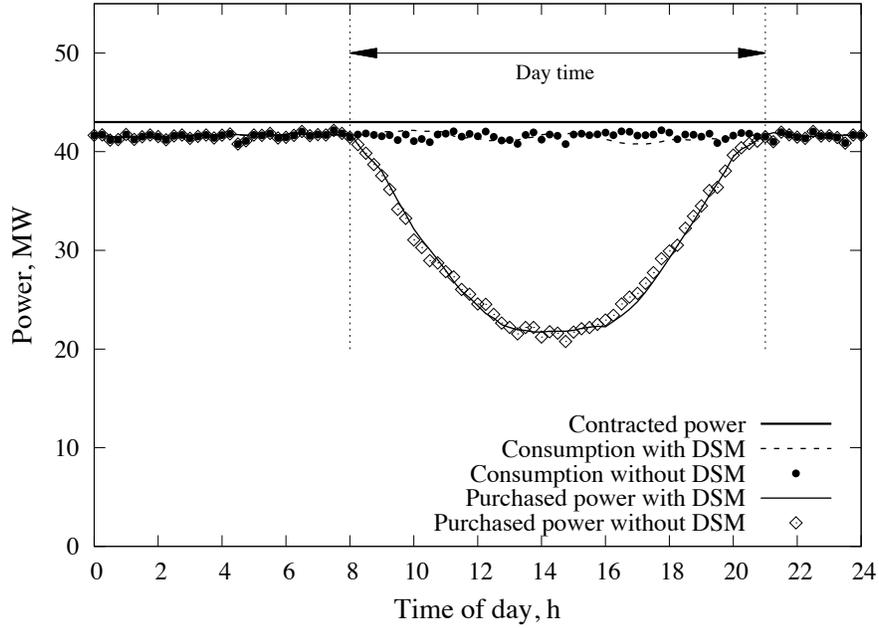


Figure 2: Purchased power with and without PV plant and BESS.

Case 1: Impact of PV power plant size

The simulations for C1 show the different behaviours of the system in response to PV plant sizes. Larger PV sizes contribute to operational savings, in the order of $0.78\%/MW_{PV}$.
 210 When considering the investment costs, the savings are $0.22\%/MW_{PV}$. This means that a
 100 MW PV power plant, can achieve 22% of savings. Model I & II give the same results.

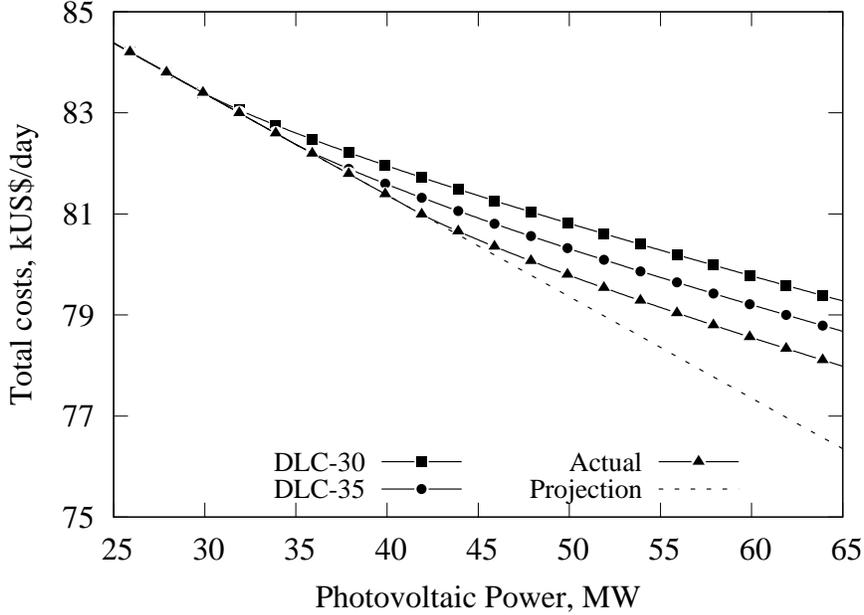


Figure 3: SAG mill total cost as function of PV energy availability without DSM considering actual maximum consumption (~ 42 MW) and with a daytime maximum consumption of 30 MW and 35 MW.

As the cycling of the BESS is costly, its usage is limited when the contracted power is higher than the maximum SAG power consumption, which is 42.17 MW. In fact, the imported energy matches demand during the night, the PV plant provides the supplement during the day, and the BESS shows no activity. Also, the DSM at low PV generation does not contribute towards lower costs. There is no value in managing energy if there is no energy excess to be managed.

On the other hand, when the generated PV energy is higher than the maximum consumption during daytime, the system prefers to export the energy rather than managing it with the BESS and incurring into cycling. At this point the total cost curve stops being linear and starts progressively increasing its slope. The change in slope is explained by the difference between selling and purchasing price of energy to and from the grid. Approximately, the total cost saving decreases to $0.20\%/MW_{PV}$.

The total costs for different load curves (but with the same energy demand) illustrate the effect of allocating the maximum consumption during daytime (Figure 3). Three different cost curves were obtained using: i) the actual SAG mill power load; and assuming a maximum load during daytime of ii) 35 MW, and iii) 30 MW. The dotted line shows the total cost

when all the PV energy is used by the SAG mills, and no energy is sold to the grid. As the total cost curve breaks right at the maximum SAG mill power load, the difference between the three curves and the dotted line shows the potential savings of DSM.

Case 2: Impact of contracted power capacity

Results of C2 show that the DSM has an important role when making a decision on the contracted power capacity. Especially, for lower contracted power capacities, not managing the feed leads to important penalty costs.

For this case, the difference of operation with and without DSM is depicted. It can be observed that a higher power consumption occurs during daytime as seen in Figure 4.

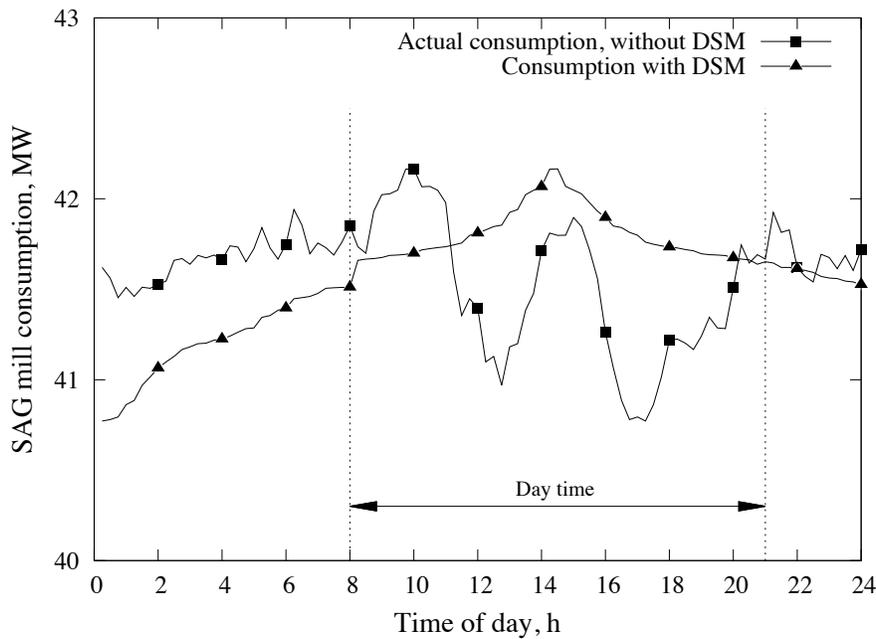


Figure 4: Operation of SAG mill, with and without DSM.

Figure 5 shows the minimum power contract, in which no penalty fees due to overconsumption are incurred. When the actual power consumption is considered, the minimum is 41.2 MW. If the ore feed is properly sequenced through DSM, this limit can be lowered by 0.5 MW.

When the contracted power capacity is high, the BESS shows no activity, as in the BC. However, for lower contracted power capacities, the model prefers to use the BESS than incurring into overconsumption fines.

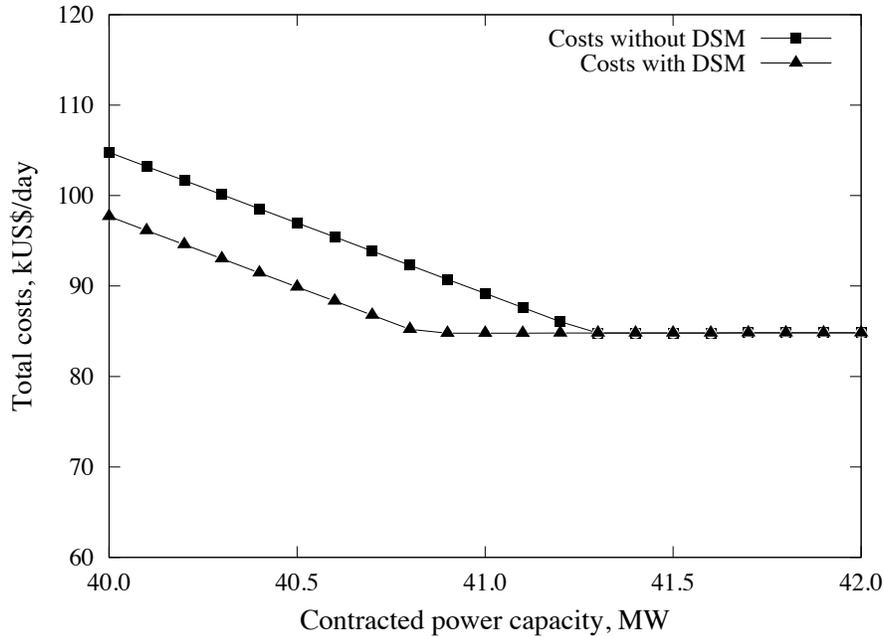


Figure 5: The total costs corresponding to the contracted power variation.

It is worth noticing that the optimized curve generated by the DSM of a contracted
 245 power equal or less than 40.7 MW is the optimum consumption curve for every case. The
 ones generated over this value, are local optima for their value and higher contracted power
 capacities. A lower contracted power means that the imported energy from the grid can be
 stabilized to that point complementing the remaining power from the sun, through PV gen-
 eration. As the PV-BESS parameters are fixed in this case, the constant cost gap occurring
 250 on lower contracted power represents the overconsumption penalties.

Case 3: Impact of BESS energy capacity

C3 analyzes the importance of the BESS energy capacity. As it can be seen in Figure 6,
 a minimum cost is achieved, which also depends on the contracted power. For a contracted
 power of 41.5 MW, the minimum is achieved with a 4.4 MWh BESS energy capacity, while
 255 for 40.5 MW contracted power, the minimum with a 30.2 MWh BESS.

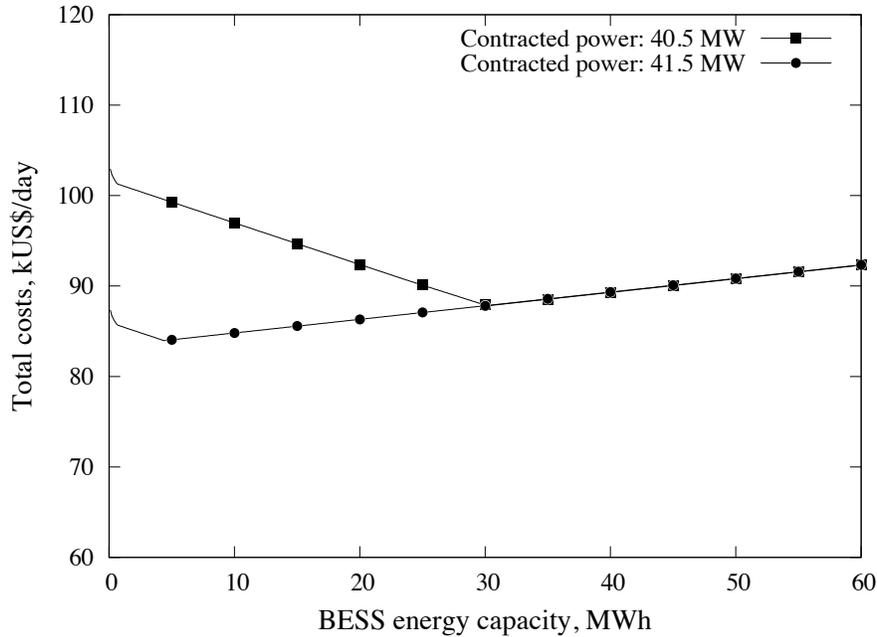


Figure 6: Total cost against BESS energy capacity variation for different contracted power.

To the left of the minimum, the costs increase due to power consumption above the contracted capacity. For larger BESS energy capacities, the cost starts raising due to higher investment/replacement costs of the BESS. This shows the optimum BESS needed to manage energy to prevent overconsumption and take account of all other variabilities.

260 *Case 4: Impact of BESS power capacity*

Results for C4 show that increasing the BESS power capacity produces savings that depend on the contracted power, as seen in Figure 7. The achievable savings show a saturation point, which is reached with a BESS of 0.15, 0.45, 0.70 and 0.70 MW for a contracted power of 41.8, 41.5, 41.2 and 41.0 MW. For 42 MW it can be seen that the costs are almost
 265 constant. The cost reduction strongly depends on the contracted power. As expected, a low contracted power has to be compensated with a larger BESS.

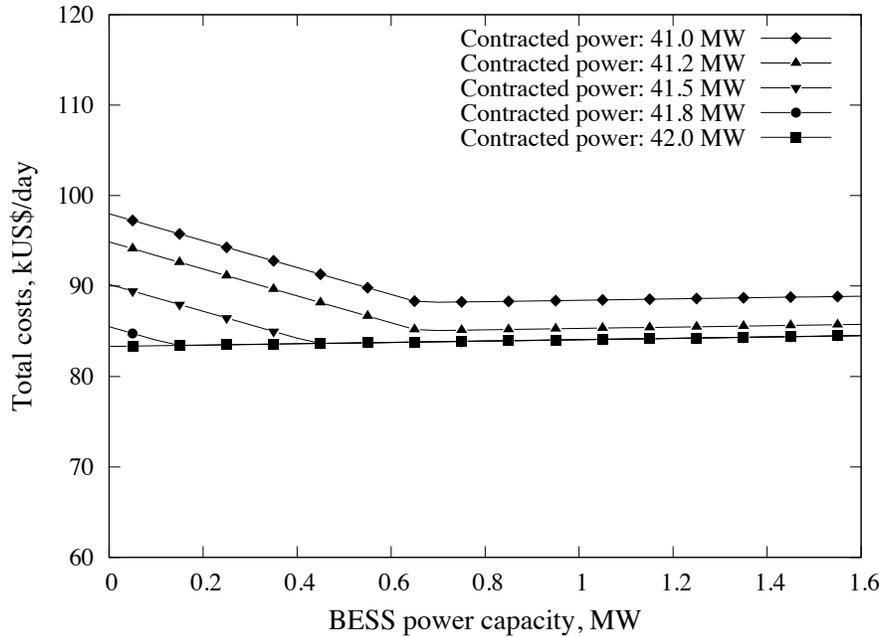


Figure 7: Total costs against BESS power capacity for different contracted power.

There is a maximum effective BESS power capacity size after which no further cost reduction is observed. This value depends on the contracted power. In C4, for contracted powers of 41.2 and 41.0 MW, the maximum effective BESS power is 0.7 MW. On the other hand, if the contracted power is 41.5 MW, a BESS with power capacity of 0.45 MW is enough. In general, an increase of the BESS power capacity allows lowering the contracted power. However, since in C4 the PV plant size is constant, a decrease in the contracted power at some point cannot be overcome by an increase in BESS capacity, and overconsumption may occur because of a deficit in the energy balance. This can be inferred from the cost gap between contracted powers of 41.2 and 41.0 MW, for BESS power higher than 0.7 MW in Figure 7.

Impact of Demand Side Management

The DSM has a great impact on how the solar energy can be used and on the investment that has to be made in BESS and the PV system. Although the overall SAG mill energy consumption does not change with DSM, its implementation allows a deeper integration of solar energy into the process. The DSM allocates harder ores (higher energy consumption) during daytime and softer ores during the night, resulting in a smoother net load. This

in turn, allows for smaller capacity contracts without incurring into overconsumption fines. For a constant capacity contract and PV plant power capacities, DSM displaces the need for larger BESS (energy and power capacity) implying that lower investments are needed to accomplish better results. The costs related to DSM were not assessed in this study.

Study case results summary

A summary of the main results is presented on Table 2.

Table 2: Results summary.

Case	Variable	Main results
1	PV size	<ul style="list-style-type: none"> • Cost savings of over 0.2%/MW_{PV} can be achieved in all scenarios. A PV plant of 100 MW can achieve a 20% of savings. • Contracted power effect was not considered in this case. • DSM has an important influence on cost reduction potential. • BESS effect was not considered in this case.
2	Contracted power and DSM	<ul style="list-style-type: none"> • PV size effect was not considered in this case. • Contracted power can be reduced with DSM, in this case, the minimum is reduced from 41.2 to 40.7 MW. • DSM shows a cost reduction potential of about 10%. • BESS has no important role under high contracted power, while with low contracted power BESS helps to avoid fines.
3	BESS energy capacity	<ul style="list-style-type: none"> • Larger BESS energy capacities do not contribute to further savings, due to the limited PV size of this scenario. • A larger BESS energy capacity allows smaller power contracts. • DSM effect was not considered in this case. • For a contracted power of 41.5 and 40.5 MW, the resulting energy capacity is 4.4 and 30.2 MWh.
4	BESS power capacity	<ul style="list-style-type: none"> • Larger BESS power capacities do not contribute to further savings, due to the limited PV size of this scenario. • There is a minimum BESS power capacity needed to avoid fines associated with each power contract. • DSM effect was not considered in this case. • For a contracted power of 41.5 MW, the resulting BESS is 0.45 MW.

4. Conclusions

290 In this paper, a novel short-term optimization approach for the joint operation of a semi-autogenous grinding mill, photovoltaic power plant and a battery energy storage system (SAG-PV-BESS) is presented. The model assigns a cycling cost to account for the batteries aging, and considers a demand side management (DSM) for solar energy integration.

The results show that when the contracted power capacity is above SAG maximum load, 295 the BESS plays a minor role. Here, PV excesses are exported to the grid instead of being stored, to avoid cycling costs of the batteries. The BESS, therefore, will only be used to avoid overconsumption.

If DSM is implemented, the system allocates the harder ores when PV energy is available (daytime). Moreover, the implementation of DSM together with the BESS can contribute 300 to safely reduce the contracted power capacity.

For a given contracted power capacity and PV plant size, the simulations allow finding the optimum BESS size. For smaller BESS sizes, the cost increases due to overconsumption; and for larger BESS sizes, due to higher investment/replacement costs of the batteries.

In general, an increase in BESS power capacity allows lowering the contracted power 305 capacity. However, the interdependency of the SAG-PV-BESS system makes that from some point on further increases in BESS capacity no longer allow lowering the contracted power without incurring into overconsumption fines.

Finally, the DSM proves to have a great impact on the PV and BESS sizes. By implementing DSM, a larger integration of solar energy into the process can be achieved.

310 Ongoing research on the topic includes the SAG-PV-BESS simulation for longer periods, and the integration of stochastic simulation of SAG mill power consumption based on variable ore hardness as a way to determine operational constraints that may be faced when DSM is implemented.

Acknowledgments

315 This work was supported by the Chilean National Commission for Scientific and Technological Research (CONICYT), through the Solar Energy Research Center SERC-Chile

(FONDAP 15110019) and the Solar Mining project (CONICYT-BMBF 20140019), and the German Academic Exchange Service (DAAD). This work made use of the free plotting package Gnuplot.

320 Nomenclature

Table 3: Parameters.

Parameter	Description	Unit
T	Number of time steps	-
dt	Length of time step	Hours
C_{con}	Contracted power cost	US\$/MW
$C_{penalty}$	Penalty for over consumption	US\$/MW/year
P_t^{SAG}	Load of SAG mills at time t	MW
E_{max}^{bat}	Energy capacity of batteries	MWh
P_{max}^{bat}	Max. power capacity of batteries, limited by inverter	MW
C_{exp}	Selling price of energy	US\$/MWh
C_{imp}	Purchase price of energy	US\$/MWh
P_{con}	Contracted power capacity	MW
Soc_{min}	Minimum state of charge	-
Soc_{max}	Maximum state of charge	-
Inv_{bat}	BESS investment cost	US\$
N_{max}^{cycles}	BESS life time measured in cycles	-
η_{bch}	Charging efficiency of BESS	-
η_{bdis}	Discharging efficiency of BESS	-

Table 4: Decision variables.

Variable	Description	Unit
p_t^{imp}	Power imported from the grid at time t	MW
p_t^{exp}	Power exported to the grid at time t	MW
p_t^s	Power generated by the photovoltaic system at time t	MW
p_t^{bdis}	Power discharged from the batteries at time t	MW
p_t^{bch}	Power charged to the batteries at time t	MW
soc_t	State of charge of the batteries at time t	-
p_{max}^{imp}	Maximum power bought from the grid during T	MW
A_{it}	$(i \times t)$ binary variable matrix used for rearranging SAG power consumption	-
b_t^{dis}	Binary variable, 1 when BESS is discharging at time t	-
t	Index for time steps from 1 to T ($t \cdot dt = \text{actual time in hours}$)	-
i	Index from 1 to T	-

References

- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenbergglabe, A., Rosehart, W., 2010. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development* 14 (4), 302–314.
- 325 Chung, D., Davidson, C., Fu, R., Ardani, K., Margolis, R., 2015. Us photovoltaic prices and cost breakdowns: Q1 2015 benchmarks for residential, commercial, and utility-scale systems. Tech. rep., NREL Technical Report.
- Cochilco, 2013. Actualización de información sobre el consumo de energía asociado a la minería del cobre al año 2012. Tech. rep., COCHILCO.
- 330 Fuentealba, E., Ferrada, P., Araya, F., Marzo, A., Parrado, C., Portillo, C., 2015. Photovoltaic performance and LCoE comparison at the coastal zone of the Atacama Desert, Chile. *Energy Conversion and Management* 95, 181–186.
- Hajipour, E., Bozorg, M., Fotuhi-Firuzabad, M., 2015. Stochastic capacity expansion plan-

- ning of remote microgrids with wind farms and energy storage. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 6 (2), 491–498.
- 335
- Harmsen, J., Roes, A., Patel, M. K., 2013. The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios. *Energy* 50, 62–73.
- Levesque, M., Millar, D., Paraszcak, J., 2014. Energy and mining—the home truths. *Journal of Cleaner Production* 84, 233–255.
- 340 McLellan, B., Corder, G., Giurco, D., Ishihara, K., 2012. Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential. *Journal of Cleaner Production* 32, 32–44.
- Morrell, S., 2004. Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples. *Minerals Engineering* 17 (3), 447–451.
- Mosher, J., Bigg, A., 2001. SAG mill test methodology for design and optimization. *Proceedings international autogenous and semiautogenous grinding technology* 1, 348–361.
- 345
- Norgate, T., Haque, N., 2010. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production* 18 (3), 266–274.
- Protogeropoulos, C., Brinkworth, B., Marshall, R., 1997. Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage. *International Journal of Energy Research* 21 (6), 465–479.
- 350
- Schill, W.-P., 2014. Residual load, renewable surplus generation and storage requirements in germany. *Energy Policy* 73, 65–79.
- Schoenung, S. M., Burns, C., 1996. Utility energy storage applications studies. *IEEE transactions on Energy Conversion* 11 (3), 658–665.
- 355 Steinke, F., Wolfrum, P., Hoffmann, C., 2013. Grid vs. storage in a 100% renewable Europe. *Renewable Energy* 50, 826–832.
- Suazo-Martínez, C., Pereira-Bonvallet, E., Palma-Behnke, R., 2014. A simulation framework for optimal energy storage sizing. *Energies* 7 (5), 3033–3055.

Suberu, M. Y., Mustafa, M. W., Bashir, N., 2014. Energy storage systems for renewable en-
360 ergy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable
Energy Reviews* 35, 499–514.

US Department of Energy, 2016. DOE Global Energy Storage Database.

Workman, L., Eloranta, J., 2003. The effects of blasting on crushing and grinding efficiency
and energy consumption. *Proc 29th Con Explosives and Blasting Techniques*, Int Society
365 of Explosive Engineers, Cleveland OH, 1–5.

Yao, D., Choi, S., Tseng, K., Lie, T., 2009. A statistical approach to the design of a dispatch-
able wind power-battery energy storage system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*
24 (4), 916–925.

Zerrahn, A., Schill, W.-P., 2015. A greenfield model to evaluate long-run power storage
370 requirements for high shares of renewables. *DIW Berlin Discussion Paper*.