

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