

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Hipótesis	4
Alcances.....	4
Estructura de memoria.....	5
Análisis crítico de la literatura.....	6
Antecedentes de Flotación	6
1.1 Principios de flotación de minerales	6
1.2 Celdas y circuitos industriales de flotación de minerales	9
1.3 Caracterización de la dispersión del gas en celdas de flotación.....	12
1.4 Reactivos de flotación y la determinación de su concentración a escala industrial	16
1.5 Flotación selectiva de molibdenita.....	17
1.6 Benchmarking de plantas de flotación de Molibdeno.....	21
Antecedentes de la faena.....	23
2.1 Mina El Teniente.....	23
2.2 Historia.....	24
2.3 Método de explotación y procesamiento de minerales	25
2.4 Planta de flotación selectiva de molibdeno	26
3.5 Producción y comercialización de concentrados	28
Protocolos Experimentales	30
1. Evaluación de planta selectiva de molibdeno de El Teniente.....	30
2. Análisis teórico nodal de la recuperación global	33
3. Caracterización de columnas presentes en el circuito de limpieza.....	34
4. Experimentos cinéticos de flotación a escala de laboratorio	37
5. Modelamiento y Simulación del circuito de flotación selectiva.....	39
Resultados y Discusiones	41
1. Evaluación de planta selectiva de molibdeno de El Teniente.....	41
1.1 Balance de masa global.....	41
1.2 Otros parámetros	45
2. Análisis teórico de la recuperación global	59

3. Caracterización de columnas presentes en el circuito de flotación.....	64
3.1 Caracterización de la dispersión de gas y estimación de la carga de burbujas	64
3.2 Estudio exploratorio de balance de masa de reactivo	70
4. Experimentos cinéticos de flotación a escala de laboratorio	84
4.1 Determinación del tiempo máximo de flotación en la etapa Rougher	84
4.2 Componentes de flotabilidad.....	84
4.3 Recuperación metalurgica y recuperación másica	85
4.4 Curva de recuperación y ley.....	85
5. Simulación de la planta de selectiva de flotación y sus variantes.....	89
5.1 Simulación Columnas de flotación	89
5.2 Evaluación de las alternativas simuladas	91
Conclusiones.....	92
Recomendaciones	93
Bibliografía.....	94
Anexos.....	99
Anexos A: Antecedentes: Características de la Molibdenita.....	99
Anexos B: Proceso productivo de El Teniente	102
Anexos C: Materiales, equipamiento.....	103
1.1 Reactivos	103
1.2 Equipamiento menor	103
1.3 Equipamiento mayor	104
Anexos D: Metodología de caracterización de muestras minerales.	106
1. Determinación de la densidad de pulpa y porcentaje de solido	106
2. Determinacion del pH y potencial redox.....	107
3. Determinación de la gravedad específica.....	107
4. Determinación de la granulometría	108
5. Distribución de tamaños de partícula mediante Cyclosizer	108
6. Leyes de molibdeno y cobre.....	109
7. Análisis teórico de la recuperación global	110
8. Cinética de flotación.....	118
9. Parámetros de simulación.....	118
Anexos E: Evaluación de la planta Selectiva de molibdeno de El Teniente	119
1. Balance de masa global	119
1.1 Leyes de cobre, molibdeno e insoluble	121

2. Otros parámetros	123
Anexos F: Caracterización de columnas presentes en el circuito de limpieza	140
1. Caracterización de la dispersión de gas y estimación de la carga de burbujas	140
2. Estudio exploratorio de balance de masa de reactivos	142
2.3. Espectrometría muestras directas de la planta de flotación.....	199
Anexos G: Experimentos de cinética de flotación a escala de laboratorio	220
1. Obtención de la recuperación intrínseca y la constante de flotabilidad	220
2. Componentes de flotabilidad.....	223
3. Recuperación metalúrgica y recuperación másica	230
4. Curvas de recuperación y ley	231
Anexos L: Simulaciones	234
1. Caso base.....	234
2. Columna Corta	240
3. Celdas convencionales	248
4. Evaluación de las alternativas simuladas	254

Índice de tablas

Tabla 1: Benchmarking de plantas de flotación de Molibdeno (N.R: no reportado).....	21
Tabla 2: Requerimientos de los clientes del concentrado de molibdeno de la planta de flotación selectiva división El Teniente.....	29
Tabla 3: Parámetros de caracterización de las muestras de pulpa del balance global y específico de columnas.....	32
Tabla 4: Concentraciones y mezclas utilizadas en la espectrometría mezcla de reactivos.	36
Tabla 5; de pH, densidad de pulpa y porcentaje de sólido, cinética de flotación bath.....	38
Tabla 6: Error incurrido al realizar la reconciliación de datos.	43
Tabla 7: Recuperaciones por etapas y global, muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	44
Tabla 8: índice de selectividad para cada una de las etapas de flotación.	45
Tabla 9: Potencial Redox, tomado a la 3° y 4° limpieza en el muestreo específico columnas.	51
Tabla 10: Velocidad superficial de gas medido en las columnas 3, 4 y 6 de la planta de flotación selectiva de molibdeno.	64
Tabla 11: Velocidad superficial de gas medido de forma local en la cámara de visualización para las columnas 3, 4 y 6 de la planta de flotación selectiva de molibdeno.	64
Tabla 12: Velocidad superficial de área de burbuja.	65
Tabla 13: Diámetros característicos d_{32} , d_{21} y d_{10} obtenidos del análisis realizado a las columnas 3, 4 y 6 de la planta de flotación de molibdeno.....	65
Tabla 14: Distancia Euleriana entre d_{10} - d_{21} , d_{21} - d_{32} y distancia promedio de estas para las 3 columnas de flotación analizadas.	65
Tabla 15: Carga de burbuja, para cada una de las columnas de la planta de flotación selectiva de molibdeno.	66
Tabla 16: Recuperación de espuma y recuperación en la zona de pulpa.	66
Tabla 17: Valores promedios de Top of Froth tomados en todas las columnas 3, 4 y 6 de la planta de flotación selectiva de molibdeno.	67
Tabla 18: Absorbancia, Absortividad, longitud de onda que minimiza el error y error incurrido para el NaSH, Tiofos, Kerosene y ácido sulfúrico, para muestras con una concentración del reactivo de 1, 2, 3 y 5 ml.	71
Tabla 19: Desviación estándar de los reactivos analizados de forma individual.	72
Tabla 20: Absortividad mezcla Tiofos-NaSH, para una longitud de onda de 208 nm (NaSH) y 196 nm (Tiofos), para muestras con una concentración del reactivo de 1, 2, 3 y 5 ml.	73
Tabla 21: Absortividad mezcla NaSH-Tiofos, para una longitud de onda de 208 nm (NaSH) y 196 nm (Tiofos), para muestras con una concentración del reactivo de 1, 2, 3 y 5 ml.	73
Tabla 22: Absortividad mezcla Tiofos-ácido sulfúrico, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	74
Tabla 23: Absortividad mezcla ácido sulfúrico-Tiofos, Absortividad mezcla Tiofos-ácido sulfúrico, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	74
Tabla 24: Absortividad mezcla Tiofos-Kerosene, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.....	74
Tabla 25: Absortividad mezcla Kerosene-Tiofos, Absortividad mezcla Tiofos-Kerosene, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.....	74
Tabla 26: Absortividad mezcla NaSH-Ácido sulfúrico, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	75
Tabla 27: Absortividad mezcla Ácido sulfúrico-NaSH, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	75
Tabla 28: Absortividad mezcla NaSH-Kerosene, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	76

Tabla 29: Absortividad mezcla Kerosene-NaSH, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	76
Tabla 30: Absortividad mezcla ácido sulfúrico- Kerosene, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	76
Tabla 31: Absortividad mezcla Kerosene - ácido sulfúrico, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	77
Tabla 32: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para la muestra tomada en la alimentación al estanque acondicionador Titanic.	81
Tabla 33: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para la muestra de la alimentación Rougher.	81
Tabla 34: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para el concentrado Rougher.	81
Tabla 35: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para el concentrado 1° Limpieza.	82
Tabla 36: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para el concentrado 2° Limpieza.	82
Tabla 37: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para el concentrado 3° Limpieza.	82
Tabla 38: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para el concentrado 4° Limpieza.	83
Tabla 39: Absorbancia NaSH, Tiofos, kerosene y ácido sulfúrico para el concentrado 5° Limpieza.	83
Tabla 40: Parámetros del modelo Arev para las etapas Rougher, 1°, 2° y 5° limpieza.	88
Tabla 41: Parámetros del modelo Arev para las etapas Rougher, 1°, 2° y 5° limpieza.	88
Tabla 42: Simulación caso base sin realizar ninguna modificación.	89
Tabla 43: Simulación caso columna corta sin realizar ninguna modificación.	90
Tabla 44; Simulación caso celdas convencionales sin realizar ninguna modificación.	90
Tabla 45: Ganancia anual al realizar el cambio columnas por celdas convencionales, en base a las simulaciones realizadas.	91
Tabla 46: Especificaciones técnicas del espectrofotómetro 6705.	105
Tabla 47: Parámetros de la simulación caso base y columna corta.	118
Tabla 48: Parámetros celda Wemco 84, utilizado en la simulación del caso celdas convencionales.	119
Tabla 49: Balance de masa global, planta de flotación selectiva de molibdeno.	119
Tabla 50: Medición del caudal en el flujo del concentrado 4° Limpieza, mediante aforo de pulpa.	121
Tabla 51: Balance de masa específico muestreo columnas.	121
Tabla 52: Recuperación metalúrgica balance de masas específico columnas.	121
Tabla 53: Leyes de cobre, molibdeno e insoluble, del muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	121
Tabla 54: Leyes de Cu y Mo obtenidos del muestreo específico columnas.	122
Tabla 55: Errores en la determinación de leyes de molibdeno y cobre muestreo específico columnas.	122
Tabla 56: Porcentaje de sólidos, del muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	123
Tabla 57: Porcentaje de sólidos de la 3° y 4° limpieza del muestreo específico columnas.	123
Tabla 58: pH obtenido por lectura del sistema en línea PI.	124
Tabla 59: pH medido en terreno, muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	128
Tabla 60: pH tomado a la 3° y 4° limpieza en el muestreo específico columnas.	128
Tabla 61: Potencial Redox, muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	129
Tabla 62: Gravedad específica muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	130

Tabla 63: Gravedad específica tomada a la 3° y 4° limpieza en el muestreo específico columnas.	131
Tabla 64: Densidad de pulpa, muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	131
Tabla 65: Densidad de pulpa tomado en la 3° y 4° limpieza en el muestreo específico columnas.	132
Tabla 66: Conductividad tomada en el muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	132
Tabla 67: Conductividad tomada a la 3° y 4° limpieza en el muestreo específico columnas.	133
Tabla 68: Granulometría obtenida en el muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	133
Tabla 69: Granulometría obtenida en el muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	134
Tabla 70: Granulometría balance específico 3° y 4° Limpieza.	135
Tabla 71: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en alimentación a la 3° limpieza.	136
Tabla 72: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en concentrado de la 3° limpieza.	137
Tabla 73: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en cola de la 3° limpieza.	138
Tabla 74: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en concentrado de la 4° limpieza.	139
Tabla 75: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en cola de la 4° limpieza.	140
Tabla 76: Ley de Mo, Top of Froth columna 3,4 y 6.	140
Tabla 77: Ley de Mo en el concentrado para la columna 3 y 4 en conjunto y la columna 6.	141
Tabla 78: Análisis QEMSCAN, por elemento a las muestras obtenidas de las columnas de flotación.	141
Tabla 79: Análisis QEMSCAN, por elemento a las muestras obtenidas de las columnas de flotación.	141
Tabla 80: Análisis QEMSCAN, grado de liberación de la molibdenita en las muestras obtenidas de las columnas de flotación.	142
Tabla 81: Espectrometría muestra individual NaSH.	142
Tabla 82: Espectrometría muestra individual TioFos.	146
Tabla 83: Espectrometría muestra individual Kerosene.	151
Tabla 84: Espectrometría muestra individual ácido sulfúrico.	154
Tabla 85: Absorbancia muestra Tiofos-NaSH.	162
Tabla 86: Absorbancia muestra NaSH- Tiofos.	165
Tabla 87: Concentraciones muestra NaSH-Tiofos.	167
Tabla 88: Concentraciones muestra Tiofos- NaSH.	167
Tabla 89: Absorbancia muestra Tiofos- ácido sulfúrico.	168
Tabla 90: Absorbancia muestra ácido sulfúrico-Tiofos.	171
Tabla 91: Concentraciones muestra Tiofos-Ácido sulfúrico.	173
Tabla 92: Concentraciones muestra Ácido sulfúrico-Tiofos.	173
Tabla 93: Absorbancia muestra ácido Tiofos- Kerosene.	174
Tabla 94: Absorbancia muestra Kerosene-Tiofos.	177
Tabla 95: Concentraciones mezcla Tiofos-Kerosene.	180
Tabla 96: Concentraciones muestra Kerosene- Tiofos.	180
Tabla 97: Absorbancia muestra NaSH-ácido sulfúrico.	180
Tabla 98: Absorbancia muestra ácido sulfúrico- NaSH.	183

Tabla 99: Concentraciones muestra NaSH-ácido sulfúrico.....	186
Tabla 100: Concentraciones muestra ácido sulfúrico- NaSH.....	186
Tabla 101: Absorbancia muestra NaSH- Kerosene.....	186
Tabla 102: Absorbancia muestra Kerosene- NaSH.....	189
Tabla 103: Concentraciones muestra NaSH-kerosene.....	192
Tabla 104: Concentraciones muestra kerosene- NaSH.....	192
Tabla 105: Absorbancia muestra ácido sulfúrico- Kerosene.....	193
Tabla 106: Absorbancia muestra Kerosene - ácido sulfúrico.....	196
Tabla 107: Concentraciones muestra ácido sulfúrico-kerosene.....	199
Tabla 108: Concentraciones muestra kerosene- ácido sulfúrico.....	199
Tabla 109: Absorbancia muestra planta alimentación Rougher.....	199
Tabla 110: Absorbancia muestra planta alimentación Titanic.....	201
Tabla 111: Absorbancia muestra planta concentrado Rougher.....	204
Tabla 112: Absorbancia muestra planta concentrado 1° Limpieza.....	207
Tabla 113: Absorbancia muestra planta concentrado 2° Limpieza.....	209
Tabla 114: Absorbancia muestra planta concentrado 3° Limpieza.....	212
Tabla 115: Absorbancia muestra planta concentrado 4° Limpieza.....	215
Tabla 116: Absorbancia muestra planta concentrado 5° Limpieza.....	217
Tabla 117: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa Rougher, prueba 1.....	227
Tabla 118: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa Rougher, prueba 2.....	227
Tabla 119: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa Rougher, promedio.....	227
Tabla 120: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 1° Limpieza, prueba 1.....	228
Tabla 121: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 1° Limpieza, prueba 2.....	228
Tabla 122: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 1° Limpieza, promedio.....	228
Tabla 123: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 2° Limpieza, prueba 1.....	228
Tabla 124: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 2° Limpieza, prueba 2.....	229
Tabla 125: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 2° Limpieza, promedio.....	229
Tabla 126: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 5° Limpieza, prueba 1.....	229
Tabla 127: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 5° Limpieza, prueba 2.....	229
Tabla 128: Diferencia entre el valor teórico y experimental de 1-R, para la etapa 5° Limpieza, promedio.....	230
Tabla 129: Resultado simulación caso base sin modificaciones.....	234
Tabla 130: Resultado simulación caso base aumentando la ley a un 35%, sin variar el tonelaje de sólido.....	235
Tabla 131: Resultado recuperaciones, caso base aumentando la ley a un 35%, sin variar el tonelaje de sólido.....	236
Tabla 132: Resultado Simulaciones, caso base aumentando la ley a un 35%, aumentando el tonelaje de sólido.....	236

Tabla 133: Resultado recuperaciones, caso base aumentando la ley a un 35%, aumentando el tonelaje de sólido.....	236
Tabla 134: Resultado Simulaciones, caso base aumentando la ley a un 35%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	237
Tabla 135: Resultado recuperaciones, caso base aumentando la ley a un 35%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	237
Tabla 136: Resultado Simulación, caso base disminuyendo la ley a un 12%, sin modificar el tonelaje de sólido.....	237
Tabla 137: Resultado recuperaciones, caso base disminuyendo la ley a un 12%, sin modificar el tonelaje de sólido.....	238
Tabla 138: Resultado simulaciones, caso base disminuyendo la ley a un 12%, aumentando el tonelaje de sólido.....	238
Tabla 139: Resultado recuperaciones, caso base disminuyendo la ley a un 12%, aumentando el tonelaje de sólido.....	239
Tabla 140: Resultado simulaciones, caso base disminuyendo la ley a un 12%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	239
Tabla 141: Resultado recuperaciones, caso base disminuyendo la ley a un 12%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	240
Tabla 142: Resultado Simulación, caso columna corta, sin modificaciones.....	240
Tabla 143: Resultado recuperaciones, caso columna corta, sin modificaciones.....	241
Tabla 144: Resultado Simulación, caso columna corta, aumentando la ley a 35%, sin aumentar el tonelaje de sólido.....	242
Tabla 145: Resultado recuperación, caso columna corta, aumentando la ley a 35%, sin aumentar el tonelaje de sólido.....	243
Tabla 146: Resultado simulación, caso columna corta, aumentando la ley a 35%, aumentando el tonelaje de sólido.....	243
Tabla 147: Resultado recuperación, caso columna corta, aumentando la ley a 35%, aumentando el tonelaje de sólido.....	244
Tabla 148: Resultado simulación, caso columna corta, aumentando la ley a 35%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	244
Tabla 149: Resultado recuperación, caso columna corta, aumentando la ley a 35%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	245
Tabla 150: Resultado simulación, caso columna corta, disminuyendo la ley a 12%, sin modificar el tonelaje de sólido.....	245
Tabla 151: Resultado recuperaciones, caso columna corta, disminuyendo la ley a 12%, sin modificar el tonelaje de sólido.....	246
Tabla 152: Resultado recuperaciones, caso columna corta, disminuyendo la ley a 12%, aumentando el tonelaje de sólido.....	246
Tabla 153: Resultado simulaciones, caso columna corta, disminuyendo la ley a 12%, aumentando el tonelaje de sólido.....	247
Tabla 154: Resultado simulaciones, caso columna corta, disminuyendo la ley a 12%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	247
Tabla 155: Resultado recuperaciones, caso columna corta, disminuyendo la ley a 12%, disminuyendo el tonelaje de sólido.....	248
Tabla 156: Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, sin modificaciones en el tonelaje de sólido.....	248
Tabla 157: Resultado recuperaciones, caso celdas convencionales, sin modificaciones en el tonelaje de sólido.....	249

Tabla 158: Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, aumentando la ley a 35%, sin modificaciones en el tonelaje de sólido.....	249
Tabla 159: Resultado recuperaciones, caso celdas convencionales, aumentando la ley a 35%, sin modificaciones en el tonelaje de sólido.....	250
Tabla 160: Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, aumentando la ley a 35%, aumentando el tonelaje de sólido.....	250
Tabla 161: Resultado recuperaciones, caso celdas convencionales, aumentando la ley a 35%, aumentando el tonelaje de sólido.....	251
Tabla 162: Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, aumentando la ley a 35%, disminuyendo el tonelaje de sólido.	251
Tabla 163: Resultado recuperaciones, caso celdas convencionales, aumentando la ley a 35%, disminuyendo el tonelaje de sólido.	251
Tabla 164: Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, disminuyendo la ley a 12%, sin variar el tonelaje de sólido.....	252
Tabla 165: Resultado recuperaciones, caso celdas convencionales, disminuyendo la ley a 12%, sin variar el tonelaje de sólido.....	252
Tabla 166: Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, disminuyendo la ley a 12%, aumentando el tonelaje de sólido.....	252
Tabla 167: Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, disminuyendo la ley a 12%, aumentando el tonelaje de sólido.....	253
Tabla 168 : Resultado simulaciones, caso celdas convencionales, disminuyendo la ley a 12%, disminuyendo el tonelaje de sólido.	253
Tabla 169: Resultado recuperaciones, caso celdas convencionales, disminuyendo la ley a 12%, disminuyendo el tonelaje de sólido.	253
Tabla 170: Ganancia anual caso base, para todas las variaciones de leyes y flujos analizadas. .	254
Tabla 171: Ganancia anual Columna Corta, para todas las leyes y flujos analizadas.....	254
Tabla 172: Ganancia anual Celdas convencionales, para cada una de las leyes y flujos analidos.	255

Índice de figuras

Figura 1: Fotografía de la adhesión de una partícula de galena a una burbuja y efecto de la carga y superficie de adhesión partícula-burbuja, modificado de Sutherland, 1955.	6
Figura 2: Esquema de flujos típico de flotación.	7
Figura 3: Circuito de flotación típico en operaciones de flotación industrial, considerando etapas de flotación Rougher, Cleaner y Scavenger.	10
Figura 4: Celda de flotación mecánica; (a) Celda de flotación; (b) Zona de espuma; (c) pulpa; (d) rotor impeler, modificado de Ullmans, 2005.....	11
Figura 5: Esquema columna de flotación típica, modificado de Finch y Dobby, 1990.	12
Figura 6: Diámetro de Sauter promedio versus velocidad de gas para tres tipos de celdas (Jan et al., 2006).	14
Figura 7: Diámetro promedio de burbujas y velocidad superficial de gas, para diferentes concentraciones y espumantes, estudio en columna piloto de flotación (Filippov, et al., 1998). .	15
Figura 8: Diagrama de etapas de flotación colectiva y selectiva.....	18
Figura 9: Recuperación de Molibdenita vs pH, modificado de López y Reyes, 2005.	18
Figura 10: Formación de monocapas de iones calcio en la superficie de las partículas de molibdenita, modificado de Raghavan y Land, 1983.....	20
Figura 11: Recuperación de las partículas de molibdenita flotadas en el tiempo (modificado de López, Reyes, 2005).	21
Figura 12: Diagrama 3D, mina El Teniente.	23
Figura 13: Ritmo de producción esperado división El Teniente.	25
Figura 14: Diagrama de flujos planta de flotación selectiva de molibdeno.	26
Figura 15: Diagrama de flujos de la planta de flotación selectiva de molibdeno con los puntos utilizados para el muestreo global.	30
Figura 16: Diagrama de flujos de la planta de flotación selectiva de molibdeno con los puntos utilizados para el muestreo específico a las columnas de flotación.	31
Figura 17: Ejemplificación de análisis nodal, modificado de Imaizumi y Inoue, 1963.	33
Figura 18: Diagrama de flujos de la planta de flotación selectiva de molibdeno con los puntos utilizados para el muestreo de reactivos.	35
Figura 19: Esquema test de cinética de flotación en laboratorio.	37
Figura 20: Curva de recuperación y razón de enriquecimiento, con la identificación de los parámetros utilizados por el modelo Arev, modificado de Vera, 2002.....	39
Figura 21: Diagrama de flujo con las leyes de molibdeno, cobre e insoluble en cada uno de los puntos muestreados	42
Figura 22: Diagrama de flujo con el porcentaje de sólido en cada uno de los puntos muestreados.	46
Figura 23: Diagrama de flujo con el pH en cada uno de los puntos muestreado	48
Figura 24: Diagrama de flujo con el potencial redox en cada uno de los puntos muestreados.....	50
Figura 25: Rango de estabilidad del agua para pH 9,7 a 12, con los valores de potencial redox obtenidos de forma experimental.	51
Figura 26: Diagrama de flujo con la gravedad específica en cada uno de los puntos muestreados.	52
Figura 27: Porcentaje de Mo en las muestras de planta versus la gravedad específica.....	53
Figura 28: Diagrama de flujo con la densidad de pulpa en cada uno de los puntos muestreados.	54
Figura 29: Diagrama de flujo con la conductividad en cada uno de los puntos muestreados.	56
Figura 30: Diagrama de flujo con el porcentaje bajo tamaño en cada uno de los puntos muestreados.	57

Figura 31: Granulometría tomada en el muestreo general de la planta selectiva de molibdeno, incorporando el error estimado para las muestras.	58
Figura 32: Variación de la recuperación global con respecto a la recuperación Rougher.	59
Figura 33: Variación de la recuperación global con respecto a la recuperación 1° Limpieza.	60
Figura 34: Variación de la recuperación global con respecto a la recuperación 2° Limpieza.	60
Figura 35: Variación de la recuperación global con respecto a la recuperación 3° Limpieza.	61
Figura 36: Variación de la recuperación global con respecto a la recuperación 4° Limpieza.	62
Figura 37: Variación de la recuperación global con respecto a la recuperación 5° Limpieza.	62
Figura 38: Variación de la recuperación global con respecto a la 3°, 4° y 5° limpieza evaluando la 5° limpieza en 89,8% (punto de recuperación actual).	63
Figura 39: Variación de la recuperación global con respecto a la 3°, 4° y 5° limpieza evaluando la 5° limpieza en 80,8%.	63
Figura 40; Variación de la recuperación global con respecto a la 3°, 4° y 5° limpieza evaluando la 5° limpieza en 98,8%.	63
Figura 41: Recuperación en la zona de espuma versus dilución.	68
Figura 42: Distribución del diámetro de burbujas para la columna 3.	69
Figura 43: Distribución del diámetro de burbujas para la columna 4.	69
Figura 44: Distribución del diámetro de burbujas para la columna 6.	70
Figura 45: Espectrometría muestra individual NaSH, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	72
Figura 46: Espectrometría muestra individual Tiofos, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	72
Figura 47: Espectrometría muestra individual de kerosene para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	72
Figura 48: Espectrometría muestra individual ácido sulfúrico, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	72
Figura 49: Absorbancia Tiofos y Nash para una concentración de 3 ml, para las dos mezclas entre estos reactivos y la suma de las curvas individuales de estos.	77
Figura 50: Absorbancia Tiofos y ácido sulfúrico para 3 ml, para las dos mezclas entre estos reactivos y la suma de las curvas individuales de estos.	77
Figura 51: Absorbancia Tiofos y kerosene para 3 ml, para las dos mezclas entre estos reactivos y la suma de las curvas individuales de estos.	77
Figura 52: Absorbancia NaSH y ácido sulfúrico para 3 ml, para las dos mezclas entre estos reactivos y la suma de las curvas individuales de estos.	77
Figura 53: Absorbancia NaSH y kerosene para 3 ml, para las dos mezclas entre estos reactivos y la suma de las curvas individuales de estos.	78
Figura 54: Absorbancia ácido sulfúrico y kerosene para 3 ml, para las dos mezclas entre estos reactivos y la suma de las curvas individuales de estos.	78
Figura 55: Espectrometría muestra alimentación Rougher, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	78
Figura 56: Espectrometría muestra alimentación Titanic, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	78
Figura 57: Espectrometría muestra concentrado Rougher, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	78
Figura 58: Espectrometría muestra concentrado 1° limpieza, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	78
Figura 59: Espectrometría muestra concentrado 2° limpieza, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	79
Figura 60: Espectrometría muestra concentrado 3° limpieza, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	79

Figura 61: Espectrometría muestra concentrado 4° limpieza, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.....	79
Figura 62: Espectrometría muestra concentrado 5° limpieza, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.....	79
Figura 63: Diagrama Eh-pH para el sistema SO_4^{2-}/S^{2-} . Temperatura: 25 °C, Revenga Hernanz, 1994.	80
Figura 64: Tiempo máximo de flotación en la etapa Rougher, obtenido de los ensayos de cinética de flotación en laboratorio, resaltado en color rojo.....	84
Figura 65: Resultados obtenidos para la cinética de flotación de la etapa Rougher, 1°, 2°, 5° limpieza.	84
Figura 66: Curva de recuperación metalúrgica y recuperación másica para la cinética de flotación Rougher.	85
Figura 67: Curva de recuperación v/s ley para la etapa de flotación Rougher. 1°, 2° y 5° limpieza.	86
Figura 68: Curva de recuperación v/s ley para la etapa de flotación Rougher.....	86
Figura 69: Curva de recuperación v/s ley para la etapa de flotación 1° limpieza.	86
Figura 70: Curva de recuperación v/s ley para la etapa de flotación 2° limpieza.	87
Figura 71: Curva de recuperación v/s ley para la etapa de flotación 5° limpieza.	87
Figura 72: Curva recuperación - razón de enriquecimiento etapa de flotación Rougher.....	87
Figura 73: Curva recuperación - razón de enriquecimiento etapa de flotación 1° limpieza.	87
Figura 74: Curva recuperación - razón de enriquecimiento etapa de flotación 2° limpieza.	88
Figura 75: Curva recuperación - razón de enriquecimiento etapa de flotación 5° limpieza.	88
Figura 76: Estructura cristalina de la molibdenita (modificado de Zanin, 2009).....	100
Figura 77: Variación del potencial zeta vs pH (modificado de López y Reyes, 2005).....	100
Figura 78: Rango de estabilidad del molibdeno, (Montero-Serrano et al, 2005).....	101
Figura 79: Rango de estabilidad de la molibdenita.	101
Figura 80: Diagrama de flujos proceso productivo planta, división El Teniente.	102
Figura 81: Diagrama de flujos proceso productivo fundición, división El Teniente.	103
Figura 82: Espectrofotómetro UV-visible.....	104
Figura 83: Esquema de configuración equipo de medición Bubble viewer.	106
Figura 84: pH de los puntos analizados en terreno en el muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	127
Figura 85: Potencial redox, tomado en terreno en el muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	129
Figura 86: Gravedad específica, muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno...	130
Figura 87: Densidad de pulpa medido en el muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	131
Figura 88: Conductividad tomada en el muestreo global planta de flotación selectiva de molibdeno.	132
Figura 89: Granulometría tomada a la 3° y 4° limpieza, en el muestro selectivo a las columnas.	135
Figura 90: Distribución de leyes de Cu, Mo e insoluble en la alimentación la 3° limpieza según granulometría.....	136
Figura 91: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en concentrado de la 3° limpieza.....	137
Figura 92: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en cola de la 3° limpieza.	138
Figura 93: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en concentrado de la 4° limpieza.....	139

Figura 94: Leyes de Cu, Mo e insoluble, según distribución granulométrica en cola de la 4° limpieza.	140
Figura 95: Ajuste Kerosene longitud de onda 221nm.	151
Figura 96: Espectrometría Tiofos- NaSH, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	162
Figura 97: Espectrometría NaSH-Tiofos, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	165
Figura 98: Espectrometría Tiofos- ácido sulfúrico, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	168
Figura 99: Espectrometría ácido sulfúrico- Tiofos, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	171
Figura 100: Espectrometría Tiofos- kerosene para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	174
Figura 101: Espectrometría kerosene- Tiofos, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	177
Figura 102: Espectrometría NaSH- ácido sulfúrico. para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml. .	180
Figura 103: Espectrometría muestra sulfúrico- NaSH, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	183
Figura 104: Espectrometría NaSH- kerosene, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	186
Figura 105: Espectrometría kerosene-NaSH, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	189
Figura 106: Espectrometría ácido sulfúrico- kerosene, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	193
Figura 107: Espectrometría kerosene- ácido sulfúrico, para una concentración de 1, 2, 3 y 5 ml.	196
Figura 108: Cinética de flotación etapa Rougher, para el Mo. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	220
Figura 109: Cinética de flotación etapa Rougher, ganga. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	221
Figura 110: Cinética de flotación etapa 1° limpieza, Mo. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	221
Figura 111: Cinética de flotación etapa 1° limpieza, ganga. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	221
Figura 112: Cinética de flotación etapa 2° limpieza, Mo. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	222
Figura 113: Cinética de flotación etapa 2° limpieza, ganga. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	222
Figura 114: Cinética de flotación etapa 5° limpieza, Mo. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	222
Figura 115: Cinética de flotación etapa 5° limpieza, ganga. Considerando el modelo de Klimpel, García Zúñiga y los valores experimentales con el respectivo error asociado.	223
Figura 116: Promedio de los resultados obtenidos para la cinética de flotación de la etapa Rougher.	223
Figura 117: Promedio de los resultados obtenidos para la cinética de flotación de la etapa 1° limpieza.	223
Figura 118: Promedio de los resultados obtenidos para la cinética de flotación de la etapa 2° limpieza.	224
Figura 119: Promedio de los resultados obtenidos para la cinética de flotación de la etapa 3° limpieza.	224
Figura 120: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa Rougher, prueba 1.	224
Figura 121: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa Rougher, prueba 2.	225
Figura 122: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa 1° limpieza, prueba 1.	225

Figura 123: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa 1° limpieza, prueba 2.	225
Figura 124: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa 2° limpieza, prueba 1.	226
Figura 125: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa 2° limpieza, prueba 2.	226
Figura 126: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa 5° limpieza, prueba 1.	226
Figura 127: Valor de 1-R en el tiempo para la cinética de flotación de la etapa 5° limpieza, prueba 2.	227
Figura 128: Recuperación v/s recuperación metalúrgica etapa rougher prueba 1.....	230
Figura 129: Recuperación v/s recuperación metalúrgica etapa rougher prueba 2.....	230
Figura 130: Curva de recuperación v/s ley, cinética Rougher, prueba 1.....	231
Figura 131: Curva de recuperación v/s ley, cinética Rougher, prueba 2.....	231
Figura 132: Curva de recuperación v/s ley, cinética 1° limpieza, prueba 1.	231
Figura 133: Curva de recuperación v/s ley, cinética 1° limpieza, prueba 2.....	231
Figura 134: Curva de recuperación v/s ley, cinética 2° limpieza, prueba 1.	232
Figura 135: Curva de recuperación v/s ley, cinética 2° limpieza, prueba 2.	232
Figura 136: Curva de recuperación v/s ley, cinética 5° limpieza, prueba 1.	232
Figura 137: Curva de recuperación v/s ley, cinética 5° limpieza, prueba 2.	232
Figura 138: Curva de recuperación v/s curvatura (razón de enriquecimiento), etapa Rougher.	233
Figura 139: Curva de recuperación v/s curvatura (razón de enriquecimiento), etapa 1° Limpieza.	233
Figura 140: Curva de recuperación v/s curvatura (razón de enriquecimiento), etapa 2° Limpieza.	233
Figura 141: Curva de recuperación v/s curvatura (razón de enriquecimiento), etapa 5° Limpieza.	233
Figura 142: Diagrama de flujos caso base.....	235
Figura 143: Diagrama de flujos caso columna corta.	242
Figura 144: Diagrama de flujos caso celdas convencionales.	249

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Recuperación metalúrgica y másica en función de los flujos y leyes de la alimentación y concentrado.....	7
Ecuación 2: Equivalencia entre flujos en la alimentación, concentrado y relave.....	7
Ecuación 3: Equivalencia entre flujo de material valioso en la alimentación, concentrado y relave.	7
Ecuación 4: Criterio de reconciliación de datos entre leyes y recuperación másica,	7
Ecuación 5: Recuperación metalúrgica obtenida por medio de las leyes de la alimentación, concentrado y relave.....	8
Ecuación 6: Cinética García-Zúñiga.....	8
Ecuación 7: Modelo cinético de Klimpel.	9
Ecuación 8: Modelo Kelsall modificado.	9
Ecuación 9: Diámetro de Sauter.	13
Ecuación 10: Obtención del diámetro promedio simple, d_{10}	13
Ecuación 11: Obtención del diámetro promedio de momento 2 sobre 1, d_{21}	13
Ecuación 12: Velocidad superficial de gas.....	13
Ecuación 13: Velocidad superficial de área de burbuja	14
Ecuación 14: Cálculo de la carga de burbujas.....	15
Ecuación 15: Recuperación de espuma.	15
Ecuación 16: Índice de selectividad.	33
Ecuación 17: Ley de Beer Lambert.	37
Ecuación 18: Modelo de recuperación Arev.	38
Ecuación 19: Curvatura, obtenida con la razón de enriquecimiento, para obtener el punto óptimo de la curva recuperación versus ley, según modelo Arev.....	39
Ecuación 20: Recuperación de la especie i en procesos de flotación industrial continuos utilizado por el software JKSimFloat, (Savassi,1999).	40
Ecuación 21: Factor k, utilizado por el software JKSimFloat (Gorein,1998).	40
Ecuación 22: Reaccion de oxidación de NaSH a sulfato.....	80
Ecuación 23: Ecuación de Nernst para la oxidación de NaSH a sulfato.	80
Ecuación 24: Obtención del porcentaje de sólidos.....	106
Ecuación 25: Obtención de la gravedad específica.	107