

Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Descripción del proyecto	2
1.3. Motivación	2
1.4. Objetivos	2
1.5. Limitaciones	3
Capítulo 2: Marco Teórico y Antecedentes.....	4
2.1. Proceso del Concentrado de cobre y molibdeno.....	4
2.2. Tratamiento, Transporte y Disposición de Relaves	7
2.3. Relaves en División Andina.....	14
2.4. Modelos matemáticos de espesadores	16
2.5. Modelos de Torque en la Rastra	22
2.6. Métodos de Resolución.....	23
Capítulo 3: Metodología	27
3.1. Revisión Bibliográfica y Estudio del Sistema.....	28
3.2. Selección del Modelo y Método de Resolución	28
3.3. Implementación del Modelo	28
3.4. Validar Modelo en Condiciones Obtenidas de Literatura	29
3.5. Validar el Modelo con Datos de Planta	30
3.6. Simular en Condiciones Requeridas por la Empresa	30
3.7. Lineamientos para Protocolo de Operación	31
Capítulo 4: Resultados y Discusiones	32
4.1. Pruebas Modelo en Condiciones obtenidas de Literatura	32
4.2. Validación con datos de planta	44
4.3. Simulaciones Requeridas y Lineamientos para Protocolo de Operación	56
Capítulo 5: Conclusiones.....	70
Bibliografía	72
Anexos	76

Índice de Tablas

Tabla 1: Características espesadores de relave división Andina .	15
Tabla 2: Valores primera prueba modelo para comparar con bibliografía	29
Tabla 3: Pruebas de llenado, estado estacionario y vaciado	29
Tabla 4: Valores pruebas modelo para valores críticos.	30
Tabla 5: Condiciones simulaciones solicitadas por la empresa.	31
Tabla 6: Condiciones de operación, simulación llenado y estado estacionario espesadores.	45
Tabla 7: Distribución de tapones hacia espesadores	76
Tabla 8: Perfil de concentración inicial y final del sistema.	83

Índice de Figuras

Figura 1: Proceso del cobre. Modificado de [10].	4
Figura 2: Perforación minera. Izquierda perforación subterránea, derecha perforación mina rajo	5
Figura 3: Productos de la conminución. En café el material valioso, marcado con la letra A, y en gris la ganga. En 1 se observa la condición ideal, en 2 la condición aceptable, en 3 y 4 condiciones en que se pierde material valioso	6
Figura 4: Principio de flotación	7
Figura 5: Acción del floculante. En (a) se observa el puenteo, que es la acción de un floculante catiónico, mientras en (b) la de puenteo de ión metálico de un floculante aniónico	8
Figura 6: Sedimentación en un espesador continuo. “A” representa la zona de clarificación, “B” la zona de sedimentación, “C” la zona de transición y “D” la zona de compresión	9
Figura 7: Partes Espesador de Relave.	10
Figura 8: Sistema de auto dilución E-DUC.	11
Figura 9: Espesador de puente (izquierda) y de columna (derecha).	12
Figura 10: Espesador de tracción periférica	13
Figura 11: Clasificación operacional espesadores. (a) Es un espesador convencional, (b) de alto rendimiento, (c) de alta densidad y (d) de pasta.	13
Figura 12: Distribución espesadores de relave división Andina.	14
Figura 13: Representación modelo fenomenológico en 1 dimensión con viscosidad despreciable. Modificada de [40].	17
Figura 14: Función batch de Kynch a la izquierda y la función de difusión a la derecha para relaves de cobre. Tomado de [36].	18
Figura 15: Variables de entrada y de salida modelo fenomenológico en 1 dimensión con viscosidad despreciable. Elaboración propia.	18
Figura 16: Configuraciones posibles modelo fenomenológico en 1 dimensión con viscosidad y consolidación despreciables y área variable. En (a) se observa variación de área de las descargas, en (b) además la variación del área del equipo y en (c) además el área de la alimentación. Modificado de [39].	19
Figura 17: Variables modelo fenomenológico 1 dimensión con viscosidad y consolidación despreciables, y área variable. Elaboración propia.	20
Figura 18: Modelo fenomenológico en 1 dimensión con viscosidad despreciable y área variable. Modificado de [44].	21
Figura 19: Variables modelo fenomenológico 1 dimensión con viscosidad despreciable, y área variable. Elaboración propia.	21
Figura 20: Diagrama Metodología Memoria.	27
Figura 21: Funcionamiento general de la implementación del modelo.	29
Figura 22: Sedimentación batch. A la derecha gráfico de la publicación con método Splitting [36], a la izquierda resultado obtenido con método Upwind Flux.	32
Figura 23: A la izquierda simulación batch con concentración inicial de 0,05 y a la derecha con concentración inicial de 0,30.	34

Figura 24: Simulación de publicación usando el método de Splitting by Front Tracking.	34
Figura 25: Llenado, estado estacionario y vaciado comparativo. A la derecha el trabajo publicado [36] y a la izquierda la simulación propia.	35
Figura 26: Simulación de error de ejemplo. Concentración inicial 0,23, concentración de alimentación 0,35, velocidad de entrada 10×10^{-5} [m/s] y de salida igual a 1×10^{-5} [m/s].	37
Figura 27: Simulación sin variaciones de ejemplo, condición inicial igual a 0, concentración de alimentación igual a 0 y velocidad de entrada y de salida igual a 10×10^{-5} [m/s].	38
Figura 28: Simulación con alimentación nula de ejemplo, condición inicial 0,05, concentración de alimentación 0 y velocidad de entrada y salida iguales a 1×10^{-5} [m/s].	39
Figura 29: Simulación con alta velocidad de salida de ejemplo, condición inicial 0,35, concentración de alimentación 0,05 y velocidad de entrada 1×10^{-5} [m/s] y de salida 10×10^{-5} [m/s].	40
Figura 30: Simulación con alta velocidad de salida de ejemplo, condición inicial 0, concentración de alimentación 0,35 y velocidad de entrada 1×10^{-5} [m/s] y de salida 10×10^{-5} [m/s].	40
Figura 31: Simulación funcional de ejemplo en $t = 0,5$ d, velocidad de salida y entrada de 1×10^{-5} [m/s] y condición inicial de 0,05.	41
Figura 32: Simulación funcional de ejemplo en $t = 0,5$ d, velocidad de salida 1×10^{-5} [m/s] y concentración inicial de 0,05.	42
Figura 33: Simulación funcional de ejemplo en $t = 0,5$ d, velocidad de entrada y de salida 1×10^{-5} [m/s] y concentración de alimentación 0,05.	43
Figura 34: Simulación funcional de ejemplo en $t = 0,5$ d, velocidad de entrada 1×10^{-5} [m/s] y concentración de alimentación y condición inicial 0,05.	44
Figura 35: Validación llenado y estado estacionario espesadores 1, 2 y 3 respectivamente.	45
Figura 36: Validación estado pseudo-estacionario espesadores 1, 2 y 3 respectivamente.	46
Figura 37: Validación vaciado y estado estacionario espesador 1.	47
Figura 38: Datos de planta de Torque en el tiempo vs concentración promedio en la rastra en espesador 1.	49
Figura 39: Torque experimental del espesador 1 y el modelo obtenido a partir de la regresión vs tiempo.	50
Figura 40: Relación entre los datos simulados y los de planta para la concentración de salida.	51
Figura 41: Torque en rastra ajustado.	52
Figura 42: Datos de torque en la rastra y el modelo a partir de la regresión del espesador 1 y su corrección vs tiempo.	53
Figura 43: Torque en el Equipo vs Concentración Másica Promedio.	54
Figura 44: Torque de datos y modelo vs tiempo espesador 3.	55

Figura 45: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 1 en la prueba 1.	57
Figura 46: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 1 en la prueba 2.	58
Figura 47: Altura vs concentración másica para espesador 1 en la prueba 6.	59
Figura 48: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 1 en la prueba 6.	59
Figura 49: Altura vs concentración másica para espesador 1 en la prueba 7.	60
Figura 50: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 1 en la prueba 7.	61
Figura 51: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 2 en la prueba 11.	62
Figura 52: Altura vs concentración másica para espesador 3 en la Prueba 15.	63
Figura 53: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 3 en la prueba 15.	64
Figura 54: Altura vs Concentración Másica para Espesador 3 en la Prueba 17.	65
Figura 55: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 3 en la prueba 25.	67
Figura 56: Altura vs concentración másica para espesador 3 en la prueba 28.	68
Figura 57: Concentración másica y torque vs tiempo para espesador 3 en la prueba 28.	68
Figura 58: Distribución Alimentación Espesadores [33].	76
Figura 59: Configuración descargas espesadores [33].	77
Figura 60: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 1.	86
Figura 61: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 2.	87
Figura 62: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 3.	88
Figura 63: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 2.	88
Figura 64: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 4	89
Figura 65: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 4.	89
Figura 66: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 5.	90
Figura 67: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 5.	90
Figura 68: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 8.	91
Figura 69: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 8.	91
Figura 70: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 9.	92
Figura 71: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 9.	92
Figura 72: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 10.	93
Figura 73 : Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 10.	93
Figura 74: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 11.	94

Figura 75: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 12.	95
Figura 76 : Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 12.	95
Figura 77: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 13.	96
Figura 78: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 13.	96
Figura 79: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 14.	97
Figura 80: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 14.	97
Figura 81: Altura vs Concentración Másica para Espesador 3 en la Prueba 16.	98
Figura 82: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 3 en la Prueba 16.	98
Figura 83: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 3 en la Prueba 17.	99
Figura 84: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 18.	99
Figura 85: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 18.	100
Figura 86: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 18.	100
Figura 87: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 18.	101
Figura 88: Altura vs Concentración Másica para Espesador 3 en la Prueba 18.	101
Figura 89: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 3 en la Prueba 18.	102
Figura 90: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 19.	102
Figura 91: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 19.	103
Figura 92: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 19.	103
Figura 93: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 19.	104
Figura 94: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 20.	104
Figura 95: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 19.	105
Figura 96: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 20.	105
Figura 97: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 20.	106
Figura 98: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 21.	106
Figura 99: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 21.	107
Figura 100: Altura vs Concentración Másica para Espesador 3 en la Prueba 21.	107
Figura 101: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 3 en la Prueba 21.	108
Figura 102: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 22.	108
Figura 103: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 22.	109

Figura 104: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 24.....	109
Figura 105: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 22.	110
Figura 106: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 24.....	110
Figura 107: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 24.	111
Figura 108: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 27.....	111
Figura 109: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 27.	112
Figura 110: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 27.....	112
Figura 111: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 27.	113
Figura 112: Altura vs Concentración Másica para Espesador 3 en la Prueba 27.....	113
Figura 113: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 3 en la Prueba 27.	114
Figura 114: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 28.....	114
Figura 115: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 28.	115
Figura 116: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 28.....	115
Figura 117: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 28.	116
Figura 118: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 29.....	116
Figura 119: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 29.	117
Figura 120: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 29.....	117
Figura 121: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 29.	118
Figura 122: Altura vs Concentración Másica para Espesador 3 en la Prueba 29.....	118
Figura 123: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 3 en la Prueba 29.	119
Figura 124: Altura vs Concentración Másica para Espesador 1 en la Prueba 30.....	119
Figura 125: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 1 en la Prueba 30.	120
Figura 126: Altura vs Concentración Másica para Espesador 2 en la Prueba 30.....	120
Figura 127: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 2 en la Prueba 30.	121
Figura 128: Altura vs Concentración Másica para Espesador 3 en la Prueba 30.....	121
Figura 129: Concentración Másica y Torque vs Tiempo para Espesador 3 en la Prueba 30.	122

Simbología

Símbolo	Significado
a y b	Variables función extrapolación
$A(\phi)$	Integral de la función Difusión
α	Función Difusión
Δz	Variación de z
D_{exp}	Datos experimentales
D_{planta}	Datos de planta
$f(\phi)$	Convección total
$F(\phi)$	Upwind Flux de $f(\phi)$
f_{bk}	Función batch de Kynch
H	Paso por problema convectivo
I	Inventario
L	Altura Alimentación
N	Entero que divide T
n	Valor parcial de n
ϕ	Concentración Volumétrica
ϕ_j^L	Extrapolación de ϕ a la izquierda
ϕ_j^R	Extrapolación de ϕ a la derecha
$\phi_0(z)$	Concentración en $t=0$
$\phi_0(t)$	Concentración de salida en el tiempo
$\phi\Delta t$	Paso de ϕ
$\phi_L(t)$	Concentración en $z=L$
q	Velocidad relativa promedio
q_{in}	Velocidad de entrada
q_{out}	Velocidad de salida
Q_r	Flujo en el Estanque
$S(z)$	Función de Área
S_f	paso por problema difusivo
$S_{f_{bk}}$	Convección lineal
s_j^n	Función extrapolación
t	Tiempo
T	Tiempo máximo
τ	Paso temporal
$\tau_{\%}$	Torque porcentual
u	Convección lineal
v	ϕ convectiva
ω	ϕ difusiva
z	Altura