

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR A LAMELAS PARA TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL DEL INGENIO MINERO “NOQUES”

Por:

José Luis Sardinas Aguilar

Modalidad de graduación: “Investigación aplicada” presentado a consideración de la
“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para
optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.

Marzo de 2013

TARIJA-BOLIVIA

A José, Mirtha, Adriana, Bob y
Marcel.

ÍNDICE

	Página
Advertencia.	i
Dedicatoria.	ii
Agradecimiento.	iii
Resumen.	iv

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.	1
Justificación.	2
Objetivos.	5
Objetivo general.	5
Objetivos específicos.	5

CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO

1.1 Descripción del Ingenio Noques.	6
1.2 Características de los efluentes.	10
1.2.1 Sólidos totales.	11
1.2.2 Sólidos disueltos.	11
1.2.3 Sólidos suspendidos.	11
1.3 Determinación de la capacidad del sedimentador a lamelas.	12
1.4 Determinación de la localización del sedimentador a lamelas.	12
1.5 Selección del proceso de sedimentación.	14
1.5.1 Sedimentación de partículas discretas (Tipo 1).	15
1.5.2 Sedimentación floculenta (Tipo 2).	20

1.5.3 Sedimentación zonal o retardada (tipo 3).....	21
1.5.4 Sedimentación por compresión (Tipo 4).....	26
1.5.5 Clasificación de los sedimentadores.	29
1.6 Diagrama de flujo del tratamiento de efluentes.	29
1.7 Balance de materia para el sedimentador a lamelas.....	30
1.8 Diseño de un sedimentador a lamelas.	33
1.8.1 Análisis del sedimentador de láminas.	33
1.8.2 Principio del efecto Boycott.....	37
1.8.3 Estudio de la sedimentación en flujo inclinado.....	39
1.8.4 Tipos de sedimentadores de láminas.....	43
1.8.4.1 Sedimentadores de láminas de corriente transversal.....	44
1.8.4.2 Sedimentadores de láminas en contracorriente.	45
1.8.5 Parámetros de diseño.....	46
1.8.5.1 Ángulo de inclinación (θ) de las láminas.....	46
1.8.5.2 Distancia de separación (d_i) entre láminas.....	47
1.8.5.3 Flujo de sólidos.	47
1.8.5.4 Área total de sedimentación (A_{TS}).	48
1.8.5.5 Número de láminas (N).	49
1.8.6 Escalamiento.	50
1.8.6.1 Principios de similaridad.....	50
1.8.6.1.1 Similaridad geométrica.	51
1.8.6.1.2 Similaridad mecánica.	52
1.8.6.1.3 Similaridad térmica.	53

1.8.6.1.4 Similaridad química.	53
-------------------------------------	----

CAPÍTULO II - PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Descripción y análisis de los efluentes del Ingenio Noques.	54
2.2 Descripción del método de investigación.	54
2.3 Diseño del prototipo.	54
2.3.1 Cálculos preliminares.	54
2.3.2 Cálculo del área mínima necesaria para la clarificación (A_{CL}).	56
2.3.3 Cálculo del área mínima para llevar a cabo el espesamiento (A_{ESP}).	56
2.3.4 Cálculo del área total de sedimentación (A_{TS}).	56
2.3.5 Diseño de la cuba.	57
2.3.6 Cálculo volumétrico del prototipo de sedimentador.	58
2.4 Diseño factorial del experimento.	59
2.4.1 Factores en estudio.	59
2.5 Materiales utilizados para la construcción de los prototipos.	61
2.6 Análisis de las muestras obtenidas.	67
2.6.1 Determinación de sólidos totales.	67
2.6.2 Determinación de sólidos disueltos.	67
2.6.3 Determinación de sólidos suspendidos.	67

CAPÍTULO III - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Realización de las pruebas.	69
3.2 Resultados obtenidos.	69
3.2.1 Prueba 1.	70
3.2.2 Prueba 2.	70

3.2.3 Prueba 3.....	71
3.2.3 Prueba 4.....	72
3.2.3 Prueba 5.....	72
3.2.3 Prueba 6.....	73
3.2.3 Prueba 7.....	73
3.2.3 Prueba 8.....	74
3.3 Análisis estadístico del diseño factorial.	75
3.3.1 Análisis de la varianza.	75
3.3.2 Análisis de regresión.	77
3.4 Diseño definitivo del sedimentador.	79
3.4.1 Cálculos preliminares.....	80
3.4.2 Cálculo del área mínima necesaria para la clarificación (A_{CL}).....	81
3.4.3 Cálculo del área mínima para llevar a cabo el espesamiento (A_{ESP}).	81
3.4.4 Cálculo del área total de sedimentación (A_{TS}).	82
3.4.5 Cálculo del número de láminas (N).	82
3.4.5.1 Escalamiento de las láminas.....	82
3.4.6 Cálculo de la velocidad de las partículas críticas (V_H).	83
3.4.7 Cálculo volumétrico del sedimentador.....	84
3.4.8 Cálculo del tiempo de residencia (retención) (T_R).	86
3.4.9 Cálculo del espesor de las paredes del sedimentador.....	86
3.5 Especificaciones del sedimentador a lamelas.	87
3.6 Costo del sedimentador a lamelas.	88

CAPÍTULO IV - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.	89
4.2 Recomendaciones.....	90
Bibliografía.	91

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla I-1. Características físicas de los efluentes vertidos al Río San Juan del Oro.	11
Tabla I-2. Tipos de sedimentación que intervienen en el tratamiento de aguas residuales.	27
Tabla I-3. Ventajas y desventajas de los sedimentadores a lamelas.	37
Tabla II-1. Datos preliminares para el diseño del prototipo.	54
Tabla II-2. Dimensiones de la cuba.	57
Tabla II-3. Factores en estudio.	59
Tabla II-4. Combinaciones de los factores en estudio.	60
Tabla II-5. Número de láminas para cada prueba.	61
Tabla III-1. Características del primer paquete de láminas.	70
Tabla III-2. Resultados obtenidos con el primer paquete de láminas.	70
Tabla III-3. Características del segundo paquete de láminas.	70
Tabla III-4. Resultados obtenidos con el segundo paquete de láminas.	71
Tabla III-5. Características del tercer paquete de láminas.	71
Tabla III-6. Resultados obtenidos con el tercer paquete de láminas.	71
Tabla III-7. Características del cuarto paquete de láminas.	72
Tabla III-8. Resultados obtenidos con el cuarto paquete de láminas.	72
Tabla III-9. Características del quinto paquete de láminas.	72
Tabla III-10. Resultados obtenidos con el quinto paquete de láminas.	73
Tabla III-11. Características del sexto paquete de láminas.	73
Tabla III-12. Resultados obtenidos con el sexto paquete de láminas.	73

Tabla III-13. Características del séptimo paquete de láminas.....	74
Tabla III-14. Resultados obtenidos con el séptimo paquete de láminas.	74
Tabla III-15. Características del octavo paquete de láminas.....	74
Tabla III-16. Resultados obtenidos con el octavo paquete de láminas.	75
Tabla III-17. Datos para el análisis de varianza.	76
Tabla III-18. Factores inter-sujetos.	76
Tabla III-19. Análisis de varianza (ANOVA).....	77
Tabla III-20. Variables introducidas para el análisis de regresión.....	78
Tabla III-21. Resumen del modelo.....	78
Tabla III-22. ANOVA ^b	78
Tabla III-23. Coeficientes ^a	79
Tabla III-24. Datos preliminares para el diseño definitivo.	80
Tabla III-25. Escalamiento de las láminas.	82
Tabla III-26. Especificaciones del sedimentador a lamelas.	87
Tabla III-27. Resumen de costos del sedimentador a lamelas.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama de bloques del actual proceso de tratamiento de efluentes.	2
Figura 1-1. Diagrama de flujo del proceso.....	7
Figura 1-2. Diagrama de bloques del proceso de molienda.	8
Figura 1-3. Diagrama de bloques del proceso de flotación.....	9
Figura 1-4. Diagrama de flujo del actual proceso de tratamiento de efluentes.....	10
Figura 1-5. Plano del Ingenio Noques, incluye la ubicación del sedimentador a lamelas.....	13
Figura 1-6. Sedimentación de una partícula esférica.	15
Figura 1-7. Modelo de un tanque de sedimentación con deposición discreta de las partículas.	17
Figura 1-8. Columna de sedimentación de laboratorio.	20
Figura 1-9. Esquema de las zonas de sedimentación.	22
Figura 1-10. Análisis gráfico de la curva de sedimentación de la interfase.....	24
Figura 1-11. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento planteado.	30
Figura 1-12. Balance de materia para un sedimentador-clarificador.	31
Figura 1-13. Corte esquemático de un sedimentador convencional provisto de láminas.	35
Figura 1-14. Sedimentador no convencional provisto de láminas.	36
Figura 1-15. La sedimentación de partículas en suspensión es más acelerada en una probeta inclinada que en otra vertical.....	38
Figura 1-16. Unidad de un sedimentador a lamelas.	40
Figura 1-17. Esquema de la sedimentación en flujo inclinado, dentro	

del plano $x y$.	41
Figura 1-18. Sedimentador de láminas Rheax.	44
Figura 1-19. Funcionamiento de un sedimentador de láminas Rheax.	45
Figura 1-20. Esquema de un sedimentador en contracorriente.	45
Figura 1-21. Funcionamiento de un sedimentador en contracorriente.	46
Figura 1-22. Similaridad geométrica.	52
Figura 2-1. Esquema de diseño del prototipo.	58
Figura 2-2. Prototipos concluidos.	63
Figura 2-3. Paquetes de láminas empleados en las pruebas.	64
Figura 2-4. Prototipo empleado en las pruebas.	65
Figura 2-5. Recolección de muestras.	66
Figura 2-6. Determinación de sólidos totales.	68
Figura 2-7. Determinación de sólidos disueltos.	68
Figura 3-1. Esquema de diseño del sedimentador a lamelas.	85