

**ANÁLISIS TECNOLÓGICO DE UN SISTEMA PARA EL MANEJO
INTEGRADO DE LOS LODOS GENERADOS EN LOS BIOREACTORES
UASB DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE
RÍO FRÍO**

GENNY SANCHEZ MENDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
ABRIL, 2005**

**ANÁLISIS TECNOLÓGICO DE UN SISTEMA PARA EL MANEJO
INTEGRADO DE LOS LODOS GENERADOS EN LOS BIOREACTORES
UASB DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE
RÍO FRÍO**

GENNY SANCHEZ MENDEZ

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

**Profesor Asociado CRISOSTOMO BARAJAS
Ing. Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA**

Abril, 2005

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES PRELIMINARES	3
1.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS RÍO FRÍO	3
1.1.1 Manejo de subproductos	5
1.2 GENERACIÓN DE LODOS	7
1.2.1 Origen de los lodos	7
1.2.2 Características de los lodos	9
1.2.3 Generación actual de lodos	11
1.3 MANEJO Y UTILIZACIÓN DE LOS LODOS	12
2. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA EL MANEJO INTEGRADO DE LOS LODO	13
2.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LODOS	14
2.1.1 Diagrama general de procesos de tratamiento de lodos	15
2.1.2 Procesos Físicos	16
2.1.3 Procesos Químicos	20
2.1.4 Procesos Biológicos	20
2.1.5 Procesos Térmicos	21
2.2 SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO A EMPLEAR	26
2.2.1 Criterios utilizados en la selección del proceso	26
2.2.2 Alcances de la alternativa seleccionada	27

3.	SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE SECADO TÉRMICO Y CARACTERIZACIÓN DEL LODO DE LA PTAR RÍO FRÍO	30
3	TECNOLOGÍAS COMERCIALES PARA EL SECADO TÉRMICO DE LODOS	30
3.2	SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE SECADO TÉRMICO	30
3.2.1	Metodología para la determinación de la tecnología	31
3.3	CARACTERIZACIÓN DEL LODO HÚMEDO DE LA PTAR RÍO FRÍO	36
3.4	ANÁLISIS DEL PERFIL DE LODOS	36
3.5	CARACTERIZACIÓN DEL LODO DESPUÉS DE PRUEBAS SIMULADAS DE SECADO TÉRMICO	37
3.5.1	Pruebas de secado del lodo en un secador de bandejas	37
3.6	DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA A PARTIR DEL BIOGÁS	36
4.	ECUACIONES Y PARAMETROS DE DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS BIOLÓGICOS	45
4.1	ESTANQUE DE ACUMULACIÓN	45
4.2	DIMENSIONAMIENTO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD	46
4.2.1	Ecuaciones de balance de sólidos y caudales	46
4.3	DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO BANDA	47
4.3.1	Ecuaciones de balance de sólidos y caudales	48
4.4	DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR ROTATORIO	49
4.4.1	Balance de materia y energía sin recirculación	49
4.5	EQUIPOS AUXILIARES	53
4.6	RESULTADOS DE DISEÑO OBTENIDOS MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE CALCULO	53
4.6.1	Parámetros de diseño requeridos por el programa	54
4.6.2	Resultados y análisis resultados	56
4.7	DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO	62
4.8	ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PLANTA PROPUESTA	65
5.	CONCLUSIONES	67

RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	73

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de los lechos de secado	6
Tabla 2. Composición típica de los lodos crudos y los biosólidos	11
Tabla 3. Operaciones de tratamiento de lodos	15
Tabla 4. Características de algunos métodos físicos de espesamiento de lodos	17
Tabla 5. Análisis de las alternativas de tratamiento de lodos	23
Tabla 6. Criterios de selección de los equipos	32
Tabla 7. Análisis de los sistemas tecnológicos para el secado térmico de lodos	33
Tabla 8. Selección de equipo de secado	35
Tabla 9. Resultados de los análisis del perfil del lodo de los reactores UASB	36
Tabla 10. Análisis físico-químico de los lodos sometidos a pruebas de secado en el secador de Bandejas	38
Tabla 11. Análisis de fertilidad y humedad de los lodos sometidos a pruebas de secado en el secador de Bandejas	39
Tabla 12. Análisis microbiológicos de los lodos a diferentes temperaturas de secado	41
Tabla 13. Características del biogás en la PTAR "Río Frío"	44
Tabla 14. Dimensiones del estanque de acumulación	46
Tabla 15. Datos fundamentales de diseño requeridos por el programa computacional	55
Tabla 16. Procesamiento de lodos biológicos horario - diario - semanal - anual	57
Tabla 17. Tiempo de operación diario - semanal - anual	57

Tabla 18. Dimensiones y parámetros de operación y funcionamiento para el espesador	57
Tabla 19. Flujos másicos y volumétricos y composición de las corrientes de entrada y salida en el espesador	58
Tabla 20. Dimensiones y parámetros de operación y funcionamiento para el filtro banda	58
Tabla 21. Flujos másicos y volumétricos y composición de las corrientes de entrada y salida en el filtro banda	59
Tabla 22. Dimensiones y parámetros de diseño del Secador Rotatorio	60
Tabla 23. Condiciones de entrada y salida del aire en el secador rotatorio	60
Tabla 24. Condiciones de entrada y salida de los lodos biológicos en el secador	61
Tabla 25. Elementos constitutivos del proceso en general	62
Tabla 26. Estimación del capital total de inversión de la Planta de Tratamiento de Lodos (PTL)	65
Tabla 27. Estimación del capital total anual para la Planta de lodos	66
Tabla 28. Comparación entre los niveles de nutrientes de los fertilizantes y el lodo proveniente de aguas residuales	77
Tabla 29. Algunos niveles de indicadores patógenos para lodos mezclados	78
Tabla 30. Niveles de concentración típicos de patógenos en lodo no Estabilizado y digerido anaeróbicamente.	78
Tabla 31. Contenido Típico de Metales pesados en lodos Frescos	79
Tabla 32. Clase de biosólidos y sus características	80
Tabla 33. Ejemplo de seguimiento de secado	90
Tabla 34. Contenido de humedad de las muestras de lodos	91
Tabla 35. Ejemplo de seguimiento de secado	91
Tabla 36. Análisis de fertilidad de los lodos al momento de la purga	92

Tabla 37. Análisis de metales pesados de los lodos al momento de la purga.	93
Tabla 38. Análisis microbiológico de los lodos al momento de la purga	93
Tabla 39. Carga másica para espesadores por gravedad	96
Tabla 40. Componentes que hacen parte de las unidades fundamentales de la planta de tratamiento de lodos	132
Tabla 41. Especificación de los equipos principales y su respectivo costo FOB	133

LISTA DE FIGURA

	Pág.
Figura 1. Esquema de Tratamiento de la PTAR Río Frío	4
Figura 2. Lechos de secado	6
Figura 3. Diagrama elemental del proceso anaerobio	8
Figura 4. Representación esquemática del contenido agua en el lodo	9
Figura 5. Diagrama de flujo general para el tratamiento y disposición del lodo	16
Figura 6. Variación del contenido de humedad de un lodo en función de las operaciones unitarias aplicadas	28
Figura 7. Esquematización para la formulación de balance de masa en el espesador	47
Figura 8. Esquematización para la formulación de balance de masa en el filtro banda	48
Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de secado térmico	50
Figura 10. Diagrama general del proceso de tratamiento integral de lodos de la PTAR Río Frío	64
Figura 11. Tratamiento primario: Reactores UASB	74
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de fluidización del Rotofluid	82
Figura 13. Sistema Bojner System	83
Figura 14. Diagrama de flujo del proceso deshidratación termica ACS	84
Figura 15. Diagrama de flujo del proceso de secado térmico de Swiss Combi	85
Figura 16. Diagrama del proceso del Sistema STC	86
Figura 17. Secador rotatorio con aire caliente en contracorriente	87
Figura 18. Secado térmico de lodos aprovechando gases de cogeneración	88

Figura 19. Espesador por gravedad con mecanismo soportado por puente	94
Figura 20. Filtro banda horizontal	99
Figura 21. Configuración de los componentes de un secador rotatorio a contracorriente y de calor directo	102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. OPERACIONES UNITARIAS EN LA PTAR RÍO FRÍO	73
Anexo B. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS LODOS	76
Anexo C. TECNOLOGÍAS COMERCIALES PARA EL SECADO TÉRMICO DE LODOS	81
Anexo D. CARACTERIZACIÓN DEL LODO HÚMEDO DE LA PTAR RÍO FRÍO	89
Anexo E. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE PROCESOS DE LA PTAL Y ECUACIONES DE DISEÑO	94
Anexo F. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS AUXILIARES	110
Anexo G. METODOLOGÍA Y CODIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO EN LENGUAJE MATLAB	113
Anexo H. DESCRIPCIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE CAPITAL DE INVERSIÓN Y COSTOS ANUALES	131

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS TECNOLÓGICO DE UN SISTEMA PARA EL MANEJO INTEGRADO DE LOS LODOS GENERADOS EN LOS BIOREACTORES UASB DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DE RÍO FRÍO*

AUTOR: GENNY SANCHEZ MENDEZ**

PALABRAS CLAVES: PTAR Río Frío, Lodo Biológico, Alternativas de Tratamiento, Espesador por Gravedad, Filtro Banda, Secador Rotatorio, Diseño, Matlab

El alcance principal de este trabajo de grado, fue establecer un análisis de las ventajas y desventajas de las alternativas de tratamiento aplicables a los lodos biológicos generados en los reactores UASB de la PTAR Río Frío, información que sirvió como base de diseño para la selección de una alternativa de tratamiento; así como el dimensionamiento de un sistema para su manejo integral, implementando la simulación matemática a través de la aplicación de una herramienta de cálculo computacional MatLab 6.5® en su versión académica.

La operación de la PTAR Río Frío implica la generación de lodos (80 ton/día con 92% de humedad), cuyo destino final actual es ser depositado en una gran área (5760 m²) para su secado al aire libre, requiriendo para ello tiempos largos de secado, aumentados en épocas de lluvias, aproximadamente 35 días. Además, la generación de olores ofensivos, propagación de vectores patógenos, sumado a la presencia de microorganismo contaminantes restringen el aprovechamiento de los lodos. Lo anterior, sumado al impacto ambiental y social que genera la ocupación de suelos que cada vez son más escasos y más importantes para el desarrollo de la actividad agrícola, y las posibilidades de ocasionar un efecto perjudicial al suelo por la incorporación de lodos contaminantes, es motivo suficiente para estudiar procesos que puedan ser implementados para la reutilización de los lodos.

Como resultado final se concluye que la mejor opción de tratamiento debe considerar espesamiento, donde la masa de lodos se reduce en 33.39% de su peso, deshidratación vía filtro banda, donde la reducción en peso lograda es 58.18% y secado térmico mediante un secador rotatorio, donde la masa total de lodo se redujo en un 69.56% de su peso; con un costo total de inversión de 3'004.089US\$, logrando un costo de tratamiento del orden de los 102.1US\$/ton.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Ingeniería Química. Director: Dr. Crisostomo Barajas.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF A SYSTEM FOR THE INTEGRATED MANAGEMENT OF THE SLUDGE GENERATED BY THE UASB BIOREACTORS AT THE WASTEWATER TREATMENT PLANT OF RIO FRÍO, BUCARAMANGA, COLOMBIA*

AUTHOR: GENNY SANCHEZ MENDEZ**

KEY WORDS: Río Frío Wastewater Treatment Plant, Biological Sludge, Treatment Alternatives, Gravity Thicker, Belt Filter, Rotary Dryer, Design, Matlab.

This study analyzes the advantages and disadvantages of several technology alternatives available for the treatment of biological sludge generated by the UASB reactors in the Río Frío wastewater treatment plant. The above information was used to finally select one of the alternatives. In addition, such system was re-scaled for its extensive operation. The mathematical solution for this problem was implemented through a computational estimation tool available in the academic version of MatLab 6.5®.

The operation of the wastewater treatment plant in Río Frío generates sludge at a rate of 80 tons per day (92% water content), whose final destiny is to be disposed of in a large area (5,760 sq.mt.) for its air drying. Generally, long periods of about 35 days are required for open drying, with even longer times being required during the rainy season. The utilization of sludge is further restricted by the generation of offensive odors, propagation of pathogens, and presence of polluting microorganisms. On the other hand, several authors have shown that large environmental and social impacts are being originated by the exploitation of the increasingly scarce soils that are of great importance to sustain agricultural activities. Moreover, even greater damage can be done to these soils with the incorporation of contaminated sludge. The above concerns more than justify the need to study alternative processes that can be implemented in order to utilize sewage sludge.

This study finds that the best available alterna¹tive must consider a sequence of thickening (the sludge mass is reduced in 33.39% of its weight), dehydration via belt filter (weight reduction of 58.18%), and thermal drying through a rotary dryer, where the sludge mass is finally reduced in 69.56% of its original weight. Total cost of the system is US\$ 3,004,089, which amounts to a unit cost of about US\$ 102 per ton of sludge treated.

¹ * Thesis

** Faculty of Physical-Chemical Engineerings. Chemical Engineering. Director: Dr. Crisóstomo Barajas.

INTRODUCCIÓN

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Río Frío de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), tiene como finalidad la depuración de las aguas residuales domésticas del área sur de Bucaramanga, mediante la utilización de reactores biológicos anaeróbicos tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), en cuyo proceso se degrada la materia orgánica presente en las aguas, conduciendo a la formación de biogás y semisólidos ricos en nutrientes llamados lodos biológicos, últimamente denominados biosólidos para enfatizar su naturaleza eminentemente biológica ya que están compuestos por bacterias, fomentando con ello su reciclaje o reutilización .

Actualmente, la CDMB ha planificado un proyecto para la modificación y reconversión de la PTAR Río Frío, en el que se incorporará una nueva línea de proceso para el tratamiento integral de los lodos biológicos, ausente hoy en día en la PTAR; en este momento los lodos provenientes de los reactores UASB son secados al aire libre en lechos de secado, requiriendo para tal fin grandes extensiones de terreno, tiempos largos de secado, aumentados en épocas de lluvias, generación de olores ofensivos y propagación de vectores patógenos. Esto último, sumado a la presencia de microorganismos contaminantes han impedido un adecuado aprovechamiento de los lodos.

En otro orden de ideas, la reutilización de los lodos es una de las vías con más futuro, y son muchos los escritos que hablan de su uso como mejorador de suelos o en la agricultura, que se ofrece como una solución eficaz e integral si se cumple una serie de requisitos.

Este documento pretende buscar los mecanismos adecuados para desarrollar un proyecto de aprovechamiento de lodos, cuyo objetivo principal, es analizar y diseñar un sistema para el manejo integrado de los lodos generados en los birreactores UASB de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío, implementando como herramienta de cálculo computacional un programa desarrollado en MatLab 6.5®.

Este trabajo constituye una buena base de documentación para quienes quieran estudiar o establecer tecnologías de tratamiento de lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del tipo anaerobio o aerobio. Además, puede ser un referente importante cuando se trate de comparar las ventajas y desventajas de diferentes tecnologías para el tratamiento integral de lodos.

El proyecto se estructuró en cuatro capítulos principales. El capítulo uno incluye antecedentes preliminares como generalidades de la PTAR Río Frío y aspectos relacionados con la generación de lodos biológicos, así como las principales propiedades y características típicas. En el segundo capítulo se describen los procesos de tratamiento de lodos, destacando las ventajas y desventajas de cada proceso y su aplicabilidad a los lodos. En base a estos procesos se seleccionará una alternativa de tratamiento integral. En el tercer capítulo se presentan las tecnologías comerciales para el secado más usadas a nivel mundial, además se presentan las ventajas y desventajas de cada tecnología al igual que se selecciona una de ellas. El capítulo cuarto presenta el dimensionamiento de los equipos de la alternativa seleccionada, igualmente se muestra los resultados de diseño obtenidos mediante la herramienta de cálculo desarrollada y se describe el costo total de inversión y el costo total anual de la alternativa seleccionada.

1. ANTECEDENTES PRELIMINARES

1.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS RÍO FRÍO

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de “Río Frío” (figura 1) es una de las obras de ingeniería más sobresalientes que se ha realizado en el marco de la aplicación del Plan Integral de Saneamiento Ambiental de Bucaramanga (PISAB). Esta planta es la primera de las tres previstas en el PISAB, plan estratégico que tiene por finalidad, garantizar el completo tratamiento de las aguas residuales domésticas y el saneamiento de las corrientes superficiales del área metropolitana de Bucaramanga, significativamente contaminadas por el acelerado crecimiento urbanístico de los municipios que la conforman (Bucaramanga, Floridablanca y Girón)^{2, 3}

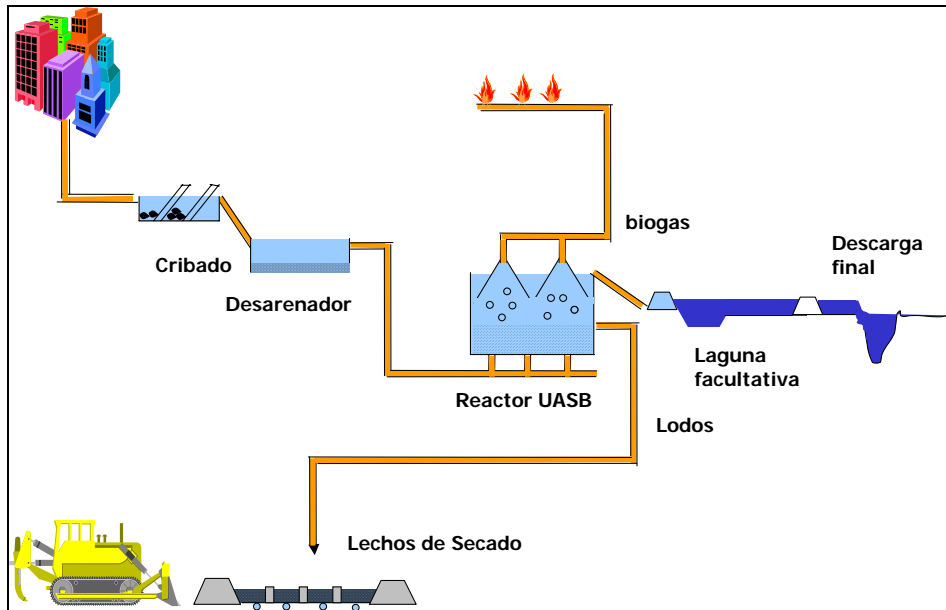
La PTAR Río Frío tiene como objetivo principal tratar las aguas residuales domésticas generadas por la población de la zona sur del área metropolitana de Bucaramanga, representada por aproximadamente 320.000 habitantes. El agua residual doméstica es conducida a la planta a través del colector maestro Río Frío, alcantarillado de tipo separado de aproximadamente 28 Km. de longitud, que termina en una tubería en 1.30 m de diámetro en la entrega.⁴

² Actualización del Plan Integral de Saneamiento Hídrico y Control Pluvial en los Municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón. Consorcio Ángel y Rodríguez Ing. Ltda. Bucaramanga. 1997.

³ Plan Integral de Saneamiento Ambiental de Bucaramanga y su Área Metropolitana. PTAR “Río Frío”, Estado actual y proyecciones. ASA Franco & Cía. Bogotá D.C. 1995.

⁴ Sitio Web: www.cdmb.gov.co

Figura 1. Esquema de Tratamiento de la PTAR Río Frío



El caudal total de agua residual a tratar en la Planta de Tratamiento, aproximadamente 720 l/s, necesita ser ajustada al rango de operación previsto. Para tal fin se cuenta con un sistema de compuertas y un canal de aproximación de 15 m de longitud, provistos de vertederos que desvían el caudal en exceso, vertiéndolo directamente al Río Frío. Estas aguas residuales presentan una carga orgánica en términos de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)* de 340 mg O₂/l en promedio.

Una vez controlado el flujo del afluente, las aguas residuales pasan al sistema de tratamiento que consta de tres etapas principales: un tratamiento preliminar, un tratamiento primario y un tratamiento secundario. De forma paralela se dispone de unidades para el manejo de subproductos generados en el tratamiento de aguas: lodos biológicos residuales y el biogás.

* La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias.

El anexo A describe las operaciones de la planta de tratamiento de la PTAR Río Frío.

1.1.1 MANEJO DE SUBPRODUCTOS

- **Proceso de purga de lodos del Reactor UASB.** La actividad bacteriana que se produce en los reactores UASB, genera un exceso de lodo biológico que es retirado periódicamente del reactor para mantener una buena eficiencia. La evacuación del lodo de los reactores se realiza por medio de tuberías localizadas a 1.5 mts y 0.5 mts del fondo del tanque. El sistema de purga de los reactores se realiza previa medición del manto expandido, donde el ideal debe estar entre 1.8 y 2.0 mts, y la otra medición del manto comprimido que debe estar en 1.5 mts. Los lodos fluyen por gravedad del interior de los reactores UASB a los lechos de secado (figura 2), las velocidades del lodo purgado se varían entre 5 - 9 lts/seg aproximadamente de acuerdo a cada reactor y el tiempo promedio de purga para cuatro lechos está entre 90 minutos a 2 horas.

En los lechos ocurre el proceso de deshidratación y secado, el cual aproximadamente y si las condiciones climáticas lo permiten demora en promedio 35 días.

Los lodos de la purga del reactor UASB, son lodos biológicos de tipo secundario y estabilizado por el mismo tratamiento anaerobio del reactor. Y aunque el sistema UASB en la PTAR está ubicado como tratamiento primario, este remueve cantidades apreciables de materia orgánica.

Figura 2. Lechos de secado



En la Tabla 1 se resumen las características de los lechos de secado.

Tabla 1. Características de los lechos de secado

CONCEPTO	VALOR
Área total	5760m ²
Número de lechos	48
Área por lecho	120m ²
Largo	20m
Ancho	6m
Altura capa de arena	0.15m
Contenido de humedad de lodo crudo	88-92%
Contenido de humedad de lodo seco	10-12%

- **Disposición final de los lodos.** Varias investigaciones se han realizado para la utilización de los lodos producidos en la PTAR como mejoradores del suelo, y como fertilizante, el resultado de estos estudios permiten en estos momentos utilizar los lodos que actualmente se evacuan de la PTAR en programas de reforestación.
- **Disposición del biogás.** El biogás producido en los reactores UASB por la acción de las bacterias metanogénicas, es captado en una campana especial que sobresale de la superficie del líquido. Posteriormente es enviado a los quemadores, para su disposición final, mediante un sistema de

tuberías. El caudal de gas producido es leído en un medidor de caudal tipo turbina que se encuentra ubicado en cada uno de los reactores.

1.2 GENERACIÓN DE LODOS

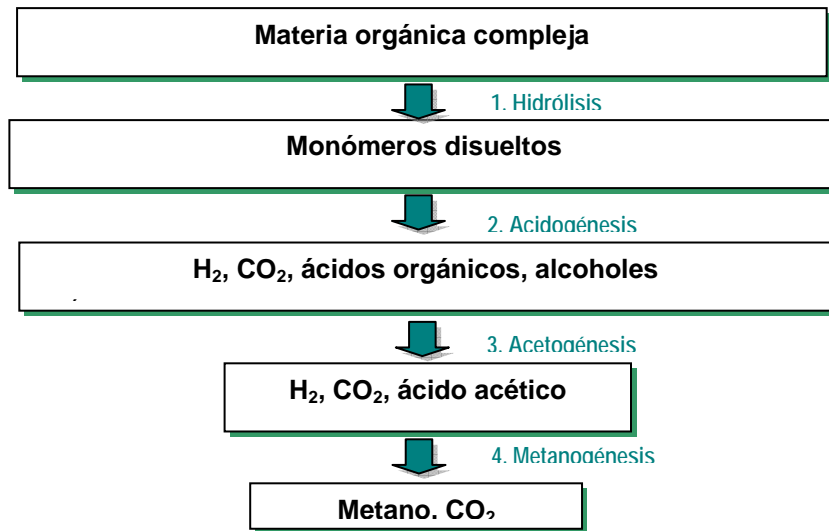
1.2.1 Origen de los lodos. El tratamiento de las aguas residuales implica la separación de las sustancias contaminantes, obteniéndose un efluente líquido y una fracción de sólidos. Esta separación no es completa, por una parte la fracción de agua mantiene ciertos niveles de sólidos suspendidos y sustancias disueltas, mientras que los lodos se caracterizan por un contenido elevado de agua.

Los lodos se originan como un subproducto residual del tratamiento biológico de aguas, y corresponden a aproximadamente 35 g/hab-día en base seca (entre 0,7 y 0,8 kg/kg de DBO₅ eliminado).⁵

En la PTAR Río Frío, el tratamiento utilizado es tratamiento biológico anaerobio. En este tipo de tratamiento de aguas residuales domésticas interviene la participación de microorganismos en un ambiente con ausencia de oxígeno. Los sistemas de tratamiento anaerobio son procesos microbiológicos que involucran varios grupos de bacterias que conviven en un equilibrio biológico complejo. La clave del éxito de la operación de los sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas residuales radica en ajustar las condiciones para que este equilibrio no se rompa y las bacterias puedan fomentar un proceso de degradación paulatino de la materia orgánica mediante reacciones biológicas, como se muestra en la figura 3.

⁵ IMHOFF et al., "Taschenbuch der Stadtentwässerung" Oldenbourg Verlag, München (1993).

Figura 3. Diagrama elemental del proceso anaerobio



Tomado de Romero ⁶

Durante el proceso se produce un gas compuesto principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), conocido como biogás, y lodos biológicos (también llamados biosólidos) en los que se encuentran los componentes más difíciles de degradar, como son la mayor parte del nitrógeno, fósforo y la totalidad de elementos minerales (como por ejemplo K, Ca, Mg, etc.).⁷

Es importante considerar que en los procesos de tratamiento biológico existen diversos microorganismos y que para cada uno de ellos existe su propia curva de crecimiento. La forma de esta curva dependerá en gran medida de los nutrientes disponibles y de las condiciones del sistema de tratamiento. Para asegurar el crecimiento de los microorganismos se debe considerar su tiempo de residencia, el cual depende de la tasa de crecimiento, la cual está directamente relacionada con la velocidad con la cual metabolizan el residuo que les sirve de sustrato o nutriente.

⁶ ROMERO, Op. cit., p. 233 – 246

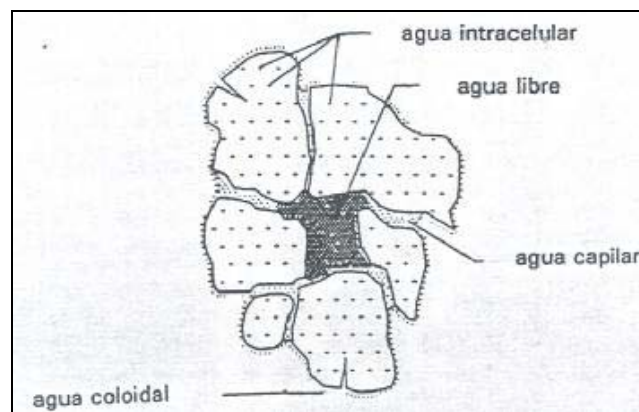
⁷ Sitio Web: [www.scientecmatrix](http://www.scientecmatrix.com), Op. cit.,

1.2.2. Características de los lodos. Para definir los procesos a emplear en el tratamiento de lodos biológicos es importante conocer las características físico-químicas y microbiológicas que presentan. Éstas pueden variar en función de su origen, su edad y el tipo de proceso de donde se han generado.

Los lodos se caracterizan por su alto contenido de agua, la que les otorga un volumen importante y favorece sus pobres características mecánicas, dificultando su manejo y disposición final. En la figura 4 se muestra una representación esquemática de la distribución del agua en un lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Físicamente, los lodos generados en un proceso de tratamiento biológico por digestión anaerobia, como es el caso de la Planta de Río Frío, presentan un color carmelita oscuro a negro, con alto contenido de gas. Su olor no es ofensivo, huele a alquitrán, caucho quemado o cera sellante. Contiene una concentración de sólidos que varía entre 5% y 10%.⁸

Figura 4. Representación esquemática del contenido agua en el lodo



Tomado de la revista Residuos, Mes de Julio de 1995

⁸ ROMERO, Op. cit., p. 758 – 759.

La fluidez y la plasticidad de los lodos varían con el contenido de agua y la naturaleza de los sólidos: ⁹

- Al reducir el contenido de agua del lodo a aproximadamente un 15%, se puede observar un espesamiento bien definido.
- Con un 70% a un 80% de agua, el lodo ya no escurre, y se conoce con el nombre de torta de lodo, y puede palearse.
- Los lodos con un contenido de humedad de hasta un 65%, pueden ser depositados sin restricciones, para ellos es necesario aplicar secado térmico o acondicionamiento con cal.

Las características químicas de los lodos están relacionadas a sus cinco constituyentes principales:

- Contenido Orgánico;
- Nutrientes;
- Concentración de Patógenos;
- Concentración de metales;
- Químicos orgánicos tóxicos.

El anexo B presenta las características químicas del lodo. La composición típica de los lodos crudos, y los lodos biológicos se indica en la tabla 2.

⁹ KNIGHT PIESOLD S. A. Caracterización, reutilización, tratamiento y disposición final de lodos provenientes de plantas de tratamientos, para la elaboración de una propuesta de norma técnica de manejo, elaborado para CONAMA, Agosto 1998.

Tabla 2. Composición típica de los lodos crudos y los biosólidos

PARÁMETROS	LODO PRIMARIO CRUDO	LODOS BIOLÓGICOS
Sólidos Secos Totales (ST), %	2.0 - 8.0	0,83 – 1.16
Sólidos Volátiles, (% de ST)	60 – 80	59 – 88
Aceites y Grasas (% de ST)	7 – 35	5 – 12
Proteínas (% de ST)	20 – 30	32 – 41
Nitrógeno (N, % de ST)	1.5 – 4.0	2.4 – 5.0
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de ST)	0.8 – 2.8	2.8 – 11.0
Potasio (K ₂ O, % de ST)	0 – 1	0.5 – 0.7
Celulosa (% de ST)	8.0 – 15	—
Hierro (no como sulfuro, % de ST)	2.0 – 4.0	—
Sílice (SiO ₂ , % de ST)	15.0 – 20.0	—
pH	5.0 – 8.0	6.5 – 8.0
Alcalinidad (mg/L como CaCO ₃)	500 – 1500	580 – 1100
Ácidos orgánicos (mg/L como HAc)	200 – 2000	1100 - 1700
Poder calorífico (kJ/Kg)	23000 – 29000	18500 - 23000

Tomado de Metcalf & Eddy¹⁰

1.2.3 Generación actual de lodos. La cantidad de lodo generado por un proceso de tratamiento de aguas determinado es variable y depende de las características del diseño de la planta de tratamiento. Los lodos procedentes de tratamientos biológicos como lodos activados, tratamientos anaerobios, filtros percoladores y discos rotatorios son de difícil deshidratación. Generalmente se producen entre 15 y 20 m³ de lodo por cada 1000 m³ de agua tratada.¹¹

¹⁰ METCALF & EDDY, Op. cit., p. 871.

¹¹ E.P.A 40 CFR Part 257 y 503

En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío, el volumen real diario de lodo húmedo descargado desde el interior de los reactores UASB a los lechos de secado, no sigue un patrón definido y solamente obedece a la necesidad de mantener una altura de manto de lodos inferior a 1.8 mts en los reactores; dando como resultado una producción mensual de lodo húmedo de 1980 m³/mes (92% de humedad en promedio), que puede alcanzar a mediados del año 2005 alrededor de los 2400 m³/mes (80 m³/día en promedio), debido a la entrada de operación del cuarto reactor UASB.¹²

1.3 MANEJO Y UTILIZACIÓN DE LOS LODOS

La aplicación de los lodos al suelo es el método más antiguo y común de uso de los lodos. Inicialmente éste manejo consistía principalmente en su aplicación como relleno en el suelo, sin embargo, la tendencia es fomentar la aplicación de técnicas de compostaje para reutilizar el producto como un mejorador de suelo, ya que en algunos casos, los lodos pueden llegar a constituir un suplemento de algunos fertilizantes químicos.

En Colombia con el desarrollo de los nuevos proyectos de saneamiento ambiental, y la aprobación de normas que regulan los niveles de contaminación de las descargas a cursos superficiales, el tema del manejo y utilización de los lodos esta adquiriendo día a día una mayor importancia. Y es en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, donde está contenida la normatividad específica para el manejo y tratamiento de lodos.

¹² Información suministrada por la CDMB (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga), entidad de carácter público que administra la PTAR Río Frío.

2. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA EL MANEJO INTEGRADO DE LOS LODOS

Durante el tratamiento de un caudal de agua residual, se generan diversos residuos entre los cuales se encuentran los lodos. Tal como vimos en el capítulo anterior, los tipos de lodos y su composición dependen directamente de los procesos involucrados en el sistema de tratamiento de las aguas residuales. Es así que, en los tratamientos que consideran un proceso biológico se generan los lodos biológicos ó biosólidos.¹³

En general el manejo de los lodos es complejo debido a diversas razones, entre ellas su alto contenido de humedad. En particular los lodos biológicos presentan además, la dificultad de estar constituidos principalmente de materia orgánica la cual se descompone fácilmente generando malos olores si es que no es sometido a tratamiento. Así como organismos patógenos que limitan su uso en la agricultura.

En la práctica, en la mayoría de las plantas de tratamiento que generan lodos se procede a un tratamiento de deshidratación mecánica, después del cual éstos son llevados a un lugar determinado para su disposición final.

En este capítulo se realizó una revisión general de las alternativas de tratamiento aplicables a los lodos, que en particular permiten el tratamiento de los lodos. Posteriormente, se propuso una alternativa de tratamiento.

¹³ Es conveniente tener presente que el término “biosólido” es una definición establecida por la EPA para potencializar el aspecto de residuo biológico con posibilidades de reutilización que presentan los lodos secundarios.

2.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE LODOS

Los lodos son sometidos a tratamiento por diversas razones, entre ellas la necesidad de reducir su volumen para optimizar el espacio disponible para su disposición, mejorar las características mecánicas o mejorar sus características fisicoquímicas y microbiológicas para su aprovechamiento posterior.

Los lodos biológicos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales se caracterizan por su alto contenido de agua, que les otorga a su vez un volumen importante favoreciendo a sus pobres características mecánicas (las que dificultan su manejo y disposición final). Por esta razón su tratamiento consiste básicamente en la reducción de su volumen mediante la eliminación de su contenido de agua.

Los tipos de procesos en el tratamiento de lodos pueden agruparse en cuatro categorías, las cuales se detallan en la tabla 3.

1. Procesos físicos: destinados a la separación, reducción de volumen y peso de los lodos;
2. Procesos químicos: adición de químicos para modificar las características de los lodos
3. Procesos biológicos: aplicación de biomasa para la estabilización de lodos;
4. Procesos térmicos: destinados a la destrucción y detoxificación de lodos.

El agua contenida en los lodos puede clasificarse en libre, capilar, coloidal e intracelular (ver figura 4, sección 1.2.2, capítulo 1). El agua libre se puede eliminar fácilmente mediante procesos físicos como el espesamiento por gravedad, mientras que la humedad capilar y coloidal puede eliminarse aplicando fuerzas mecánicas. El resto del agua puede eliminarse después de

romper la estructura celular, ya sea por métodos biológicos (compostaje), químicos (oxidación húmeda) o térmicos (secado térmico, incineración).

Tabla 3. Operaciones de tratamiento de lodos

PROCESOS				
FÍSICOS		QUÍMICOS	BIOLÓGICOS	TÉRMICOS
Espesamiento	Desaguado			
<ul style="list-style-type: none"> • Decantación • Flotación • Centrifugación 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtración • Centrifugación • Secado • Evaporación • Prensado 	<ul style="list-style-type: none"> • Acondicionamiento • Neutralización • Extracción • Óxido-Reducción • Estabilización • Solidificación 	<ul style="list-style-type: none"> • Digestión Anaeróbica • Digestión Aeróbica • Compostaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Incineración • Vitrificación • Congelamiento • Cristalización • Oxidación por aire húmedo • Ceramización

Tomado de Van Nostrand Reynold¹⁴

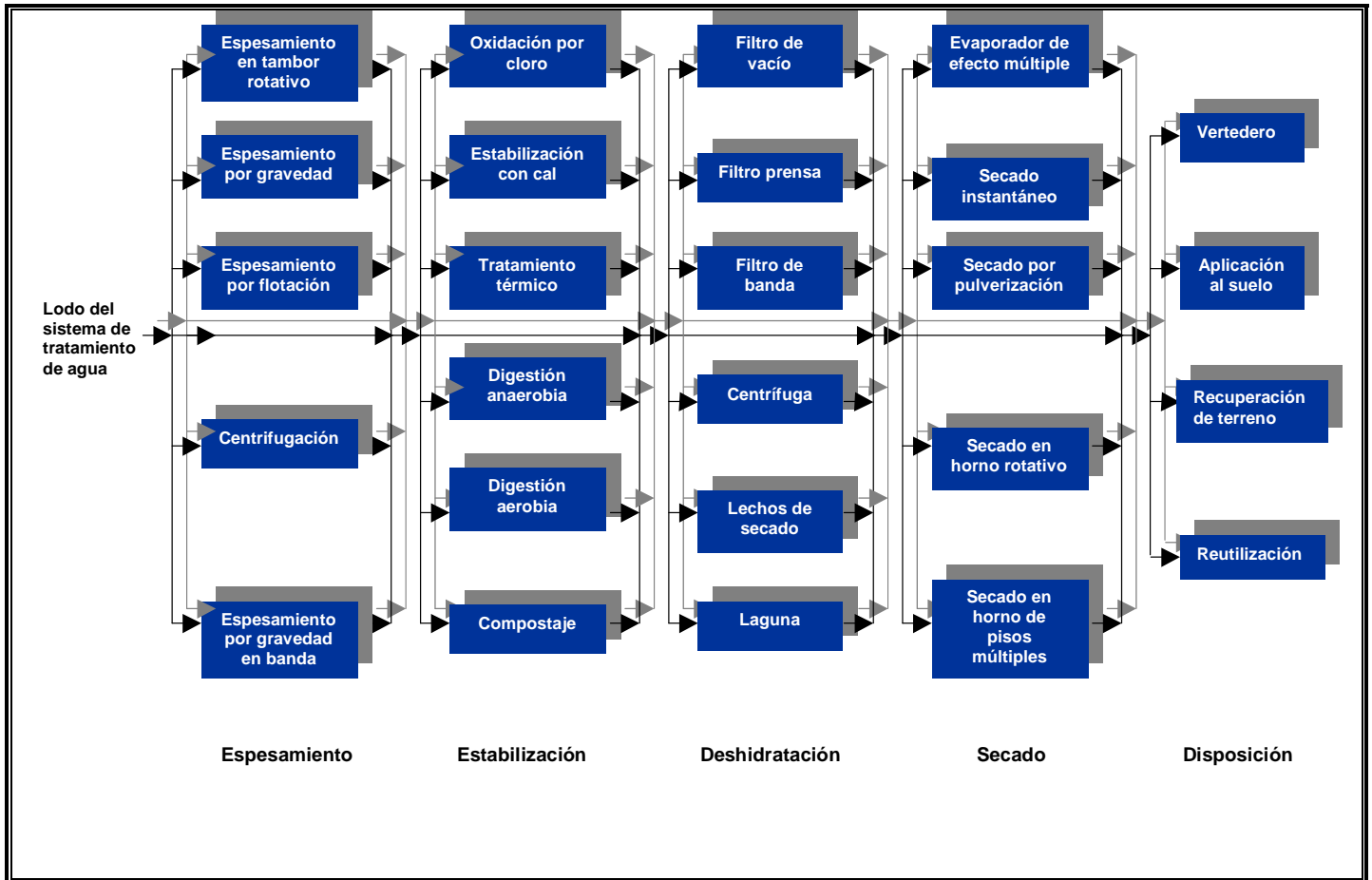
2.1.1 Diagrama general de procesos de tratamiento de lodos. El tratamiento y disposición eficiente de los lodos de una planta de tratamiento de aguas requiere conocer las características de los sólidos y del lodo a procesar, así como la aptitud de los diferentes sistemas de procesamiento y la facilidad de acceso a las diferentes opciones de disposición final.¹⁵

En la figura 5 se presenta un diagrama general de los distintos procesos y operaciones unitarias que se describirán posteriormente en este capítulo. Como puede verse, las combinaciones posibles son muy numerosas. Depende de la procedencia del lodo, de los aspectos económicos y de las condiciones locales, la elección de uno u otro método

¹⁴ Van Nostrand, Reynold. Toxicity Reduction in Industrial Effluents, Ed. P.W. Lankford and w.w. Eckenfelder Jr, 1990

¹⁵ ROMERO, Op. cit., p. 775 – 778.

Figura 5. Diagrama de flujo general para el tratamiento y disposición del lodo



Modificado de Metcalf & Eddy¹⁶

2.1.2 Procesos Físicos. Los procesos físicos de tratamiento de lodos se dividen en aquellos que logran el espesamiento y desaguado del lodo.

- **Espesamiento.** El espesamiento se emplea para concentrar el contenido de sólidos del lodo mediante la eliminación en parte de su fracción líquida, consiguiendo una disminución importante en su volumen, lo que permitirá posteriormente, emplear equipos de menores dimensiones. El espesamiento resulta ser bastante beneficioso para procesos de tratamiento como digestión, deshidratación, secado y combustión en que es importante el

¹⁶ METCALF & EDDY, Op. cit., p. 881 – 882.

volumen a tratar y por los requerimientos de agentes externos como reactivos químicos y energía.

Esta operación suele llevarse a cabo mediante procedimientos físicos, que incluyen el espesamiento por gravedad, flotación, centrifugación y filtros de banda por gravedad. Usualmente se utiliza el espesamiento por gravedad donde pueden concentrarse los sedimentos primarios hasta un 6% u 8%, y lo secundarios hasta un 2%.

Algunas características de los métodos se indican en la tabla 4.

Tabla 4. Características de algunos métodos físicos de espesamiento de lodos

METODO	APLICABLE A	USO
Espesamiento gravedad	Lodo primario	Muy utilizado
	Mezcla de lodo primario y exceso de biosólido	De mayor aplicación en plantas de tratamiento pequeñas
	Lodos biológicos	Poco utilizado por la pobre concentración de sólidos
Flotación con aire disuelto	Mezcla de lodo primario y exceso de lodos biológicos	Poco utilizado pues otorga resultados similares a un espesador por gravedad
	Lodos biológicos	Uso frecuente pues entrega excelentes resultados
Centrifugación	Lodos biológicos	De uso limitado por el costo de mantenimiento del equipo, pero entrega buenos resultados
Filtro banda	Lodos biológicos	De creciente uso, por sus buenos resultados
Espesador rotatorio de tambor	Lodos biológicos	De uso limitado pero entrega buenos resultados

Tomado de Metcalf & Eddy¹⁷

¹⁷ Ibid., p. 906.

- **Desaguado.** El desaguado consiste en la remoción de agua del lodo tanto como sea posible, reduciendo el volumen a tratar en operaciones subsecuentes. La aplicación de esta operación puede responder a diversas razones entre ellas: disminuir sus costos de transporte, facilitar su manipulación, dejarlo en condiciones para su incineración y/o reducir las posibilidades de generar olores.

Las técnicas de desaguado se basan en operaciones como la evaporación y percolación natural, o en la aplicación de medios mecánicos como filtros, centrífugas, canchas de secado y lagunaje. La elección del método a aplicar dependerá de las características del lodo y del espacio disponible para realizar la operación.

La tecnología más aplicada para el desaguado mecánico de lodo es el Filtro al Vacío, el que presenta buenos resultados cuando se trata de lodo de tipo primario o mezclas de primario y secundario. Otras tecnologías son los Filtros Banda, Filtro a Presión, Centrífugas y Lechos y Lagunas de Secado. A continuación se indican algunos métodos de desaguado:

- La **filtración al vacío** es una operación bastante antigua, sin embargo, su uso ha descendido en los últimos diez años debido a la complejidad del sistema, la necesidad de reactivos para el acondicionamiento y los altos costos de explotación y mantenimiento. Los resultados de la filtración dependen del contenido de sólidos en el lodo que debe estar entre el 6 y 8%.
- Los **filtros banda** requieren alimentación continua que incluye el acondicionamiento químico, drenaje por gravedad (muchas veces asistida por un sistema de vacío), y aplicación mecánica de presión (rodillo) para deshidratar el lodo.

Este tipo de filtros son muy efectivos para el tratamiento de los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales.

Las variables que afectan el rendimiento de este tipo de filtros son varias, entre ellas las características del lodo, el método y tipo de acondicionamiento químico, las presiones aplicadas, la estructura de la máquina, la porosidad de la banda, etc...

- El **filtro prensa** produce el desaguado del lodo mediante la aplicación de una presión elevada.

Los filtros prensa más utilizados son: de placas de volumen fijo y placas de volumen variable. El filtro prensa de placas de volumen fijo consiste en una serie de placas rectangulares que se colocan enfrentadas entre sí en posición vertical sobre un bastidor con un extremo fijo y otro móvil.

- **Los Lechos de secado** son el método de deshidratación de lodos más utilizado, especialmente para la deshidratación de lodos digeridos. Una vez seco, el lodo se retira y se evacua a vertederos controlados o se usa como acondicionador de suelos.

Las principales ventajas de la aplicación de éste método, son su bajo costo, escaso mantenimiento y la alta concentración de sólidos generada en el producto final. Pero, la utilización de amplios terrenos y los tiempos de secado largos, han hecho de esta técnica no muy atractiva hoy en día.

Actualmente, este método es aplicado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío, pero se ha contemplado la eliminación de esta técnica precisamente por que los tiempos de secado de los lodos

provenientes de los reactores UASB no son óptimos, por su dependencia de las condiciones climáticas de la región.

2.1.3 Procesos Químicos. Los procesos químicos se caracterizan por la adición de elementos químicos al lodo para generar su estabilización. Al igual que en el caso de los procesos físicos, la aplicación de tratamientos químicos al lodo favorece a su manipulación posterior.

Entre las alternativas de procesos existentes se encuentra el acondicionamiento químico y la estabilización con cal.

2.1.4 Procesos Biológicos. Los procesos biológicos implican la acción de microorganismos, a los cuales se les otorgan las condiciones óptimas para llevar a cabo el proceso de estabilización. Entre los procesos biológicos se encuentran la digestión anaeróbica y aeróbica, y el compostaje.

- La **digestión anaeróbica** es uno de los procesos mas utilizados, en el que la degradación de la materia orgánica e inorgánica ocurre en ausencia de oxígeno y genera biogás. Existen diversos métodos de digestión anaerobia: la digestión convencional, que se realiza en el intervalo mesófilo de temperaturas, es decir, entre los 30 y 38°C; y la digestión anaeróbica termófila, la cual se produce a temperaturas situadas entre los 49 y 57°C, proporcionando condiciones adecuadas para la actividad de bacterias termofílicas.

- La **digestión aeróbica** corresponde a la estabilización de la materia orgánica mediante el suministro de aire (u oxígeno), obteniéndose como producto anhídrido carbónico (CO₂), amoníaco (NH₃) y agua (no genera biogás). Es aplicable a lodos biológicos, mezclas de lodos biológicos con lodos primarios y lodos no desarenados.

- El **compostaje** es un proceso en que la materia orgánica sufre una degradación biológica hasta alcanzar su estabilidad, llevándose a cabo principalmente en condiciones aerobias. El lodo compostado de forma técnicamente correcta, genera un humus higiénico, libre de olores y de sustancias patógenas, por lo cual se puede utilizar como mejorador de suelos.

2.1.5 Procesos Térmicos. Los procesos térmicos consisten en someter al lodo a temperaturas extremas que inhiban o eliminen la acción de microorganismos, además de destruir elementos dañinos, como ciertos contaminantes. También se habla de secado térmico.

- El **secado térmico** de los lodos permite eliminar el agua mediante la aplicación de calor externo. El producto resultante contiene prácticamente todo el material sólido y su contenido de humedad es del orden del 5% al 10%. Existen dos vías de secado térmico: el directo y el indirecto. En los sistemas de secado directo existe un contacto directo entre el medio de transporte de calor (aire, vapor, gases de combustión) y el lodo. En los sistemas indirectos existe una barrera física entre el medio de transporte de calor (vapor, aceite) y los lodos.

En cuanto a tecnología, los secadores indirectos son más complejos que los directos, porque requieren un circuito de calor y un mecanismo de limpieza que remueve el lodo de la superficie caliente. Sin embargo presenta la ventaja de que genera mucho menos aire contaminado, ya que el aire de secado está constituido principalmente de vapor. Además, el lodo secado de forma indirecta no se calienta tanto como el lodo secado de forma directa, por lo que se liberan menos sustancias volátiles. En resumen la emisión de olores es considerablemente menor.

Un aspecto fundamental del secado térmico es el tipo de suministro de energía que requiere. El proceso requiere una temperatura mínima de 130°C para conseguir deshidratar el lodo adecuadamente. Un rango de temperatura normal es de 150°C a 210 °C.

En el secado de los lodos generalmente se realiza un aprovechamiento del calor residual, mediante su conducción a una central térmica o una planta incineradora o bien mediante la instalación de una planta de cogeneración.

El problema que puede generar la aplicación de sistema de secado son el control de olores y la eliminación de las cenizas (partículas finas). La solución para reducir los olores puede ser el calentar los gases liberados del sistema a temperaturas por sobre los 730°C ó emplear equipos de lavado de gases (scrubbers) seguidos de filtros biológicos, y la cenizas o el polvo fino contenido en los gases se puede eliminar empleando un ciclón separador de finos.

Las opciones de secado más conocidas son: secadores rotatorios (directo e indirecto), sistemas de secado instantáneo por pulverización, incineración, vitrificación y oxidación por vía húmeda.

En la tabla 5 se resumen las ventajas y desventajas de aplicación de los diferentes procesos de tratamiento de lodos, descritos anteriormente.

Tabla 5. Análisis de las alternativas de tratamiento de lodos

PROCESOS		OPERACIÓN	APLICACIÓN	FUNCIÓN	VENTAJAS (1)	DESVENTAJAS (1)
FÍSICOS	Espesamiento	Espesamiento por gravedad	Lodo crudo	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Operación sencilla - Bajo costo de operación y mantenimiento - Bajo utilización de energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Su aplicación es más efectiva para tratar todos primarios - Admite cargas de sólidos hasta 122 kg/m²*d - Requiere la adición de un polímero que fluctúa entre 3 y 7 kg (en peso seco) por tonelada de sólidos secos - Para mantener las condiciones aerobias requiere una adición del efluente final de la planta de 24 a 30 m³/m² *d
			Lodo mezclado	Reducción de volumen		
			Lodo activado	Reducción de volumen		
		Flotación	Lodo mezclado	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Permite una concentración mas alta del lodo secundario - Mayor control operacional - Reducido potencial de olores - Es mas efectiva con lodos activados o en proceso de nitrificación de cultivo en suspensión - Puede emplearse para tratar lodos con sales metálicas originadas en los tratamientos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizado primordialmente para lodos secundarios - Mecánicamente más complejo - Poca capacidad de almacenamiento - Requisitos más altos de operación y mantenimiento - Requiere inyección de aire a presión a razón de entre 2 y 4 %. - Requiere la adición de polímeros entre 2 y 5 kg (en peso seco) por tonelada de sólidos secos - A cargas de sólidos elevadas disminuye el rendimiento de la operación
			Lodo activado	Reducción de volumen		
		Centrifugación	Lodo activado	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Es sólo para lodos activados - Puede ser empleada con flujo constante (tipo tornillo) o discontinuo (tipo canasto) - En condiciones adecuadas la centrifugación puede efectuarse sin la adición de polímeros - Es muy útil para tratar lodos difíciles de tratar por otros métodos - Gran capacidad de procesamiento en un área pequeña - Menor potencial de olores - Flexibilidad en operación 	<ul style="list-style-type: none"> - Es de alto costo, para flujos inferiores a 20.000 m³/d - Requiere de mano de obra calificada - Alto costo inicial - Requiere operación experta - Alta utilización de energía - Alto mantenimiento
	Desaguado	Filtrado por gravedad	Lodo activado	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Es muy útil para tratar lodos con un contenido de sólidos inferiores al 2% - Presenta mayor aplicación en lodos crudos y digeridos 	<ul style="list-style-type: none"> - Deben adicionarse polímeros
		En tambores rotatorios	Lodo activado	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Se logran concentraciones de sólidos entre el 3 y 4 % - Es de bajo mantenimiento - Bajo consumo energético - Requiere poco espacio físico 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere la adición de polímeros
		Filtro al vacío	Todo tipo	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere de personal calificado - Costo de mantenimiento bajos 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto consumo de energía por unidad de lodo deshidratado - El líquido filtrado puede tener un elevado contenido de sólidos, dependiendo del medio filtrante
	Filtro prensa	Todo tipo	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo concentración de sólidos en el líquido filtrado 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado costo de los equipos - Los equipos requieren de una gran superficie física - Requiere de una estructura de soporte especial 	

Tabla 5. Análisis de las alternativas de tratamiento de lodos

PROCESOS		OPERACIÓN	APLICACIÓN	FUNCIÓN	VENTAJAS (1)	DESVENTAJAS (1)
FÍSICOS	Desaguado	Filtro de banda	Todo tipo	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costos energéticos - Costos de inversión relativamente bajos - Fácil mantenimiento - Genera una torta de sólido bastante seca - Baja demanda de energía - Flexibilidad operativa 	<ul style="list-style-type: none"> - Muy sensible a las características del lodo - Requiere adición de polímeros
		Lechos secado de	Lodos estabilizados	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere energía adicional - Lodo con alta concentración de sólidos - Bajo o nulo requerimiento de aditivos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Precisa de amplios terrenos - Requiere una gran cantidad de mano de obra para ser retirado - Es muy sensible a las condiciones climáticas - Se aplica solo a lodos estabilizados
QUÍMICOS	Estabilización con cal	Acondicionamiento químico	Todo tipo	Reducir la presencia de patógenos, eliminar olores, inhibir, reducir o eliminar la posibilidad de putrefacción	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere controlar que el pH se encuentre en 12, para lograr la estabilización - Reduce concentración de patógenos, olores desagradables y la putrefacción del lodo - Genera una reacción exotérmica que permite elevar la temperatura sobre los 50°C, inactivando la mayoría de los microorganismos 	<ul style="list-style-type: none"> - Genera una mayor cantidad de sólidos por la aplicación de cal
					<ul style="list-style-type: none"> - Favorece la deshidratación del lodo 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere aditivos (polímeros, cal, cloruro férrico, etc.) en forma líquida - Requiere ensayos de laboratorio para escoger el aditivo, dado que depende de las características del lodo
BIOLÓGICOS	Digestión Anaerobia	Digestión Aerobia	Todo tipo	Estabilización, reducción de masa	<ul style="list-style-type: none"> - Ocurre sin la incorporación de oxígeno o aire - Se genera metano el que puede aprovecharse como combustible - Reduce la cantidad de lodos - Favorece la desinfección (eliminación de patógenos) - El producto generado se encuentra bastante estabilizado 	<ul style="list-style-type: none"> - Lento crecimiento de las bacterias formadoras de metano - Genera una escasa cantidad de biomasa, inferior a 0.1 kg/kg de la DBO metabolizada - Alto costo inicial - Susceptible a trastornos - Caudales residuales de baja calidad
					<ul style="list-style-type: none"> - Se reducen los sólidos volátiles de la misma forma que la digestión anaerobia, pero reduce la DBO en el líquido sobrenadante - Produce lodos biológicamente estables del tipo humus, exento de olores 	<ul style="list-style-type: none"> - Se realiza en presencia de oxígeno o aire - No genera biogás - Es un proceso sensible a la temperatura y clima - Genera una escasa cantidad de biomasa, inferior a 1,1kg/kg de la DBO

Tabla 5. Análisis de las alternativas de tratamiento de lodos

PROCESOS		OPERACIÓN	APLICACIÓN	FUNCIÓN	VENTAJAS (1)	DESVENTAJAS (1)
BIOLÓGICOS	Compostaje		Todo tipo	Estabilización y recuperación de productos	<ul style="list-style-type: none"> - Genera un material tipo humus, higiénico y libre de olores - Destruye los microorganismos patógenos - Puede realizarse en condiciones aerobias y anaerobias 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere control de pH, humedad y temperatura - El método a aplicar depende de las características del lodo - Existen limitaciones de espacio y dependencia de las variaciones climáticas
	Secado		Todo tipo	Reducción de volumen, peso y se reduce la presencia de patógenos	<ul style="list-style-type: none"> - Logra concentrar entre un 90 al 95% de contenido de sólidos en el lodo deshidratado, dependiendo de la tecnología aplicada - No requiere de aditivos químicos - Permite estabilizar el lodo destruyendo la mayor parte de los organismos patógenos - Es insensible a las variaciones de la composición del lodo a tratar. - El lodo obtenido presenta características necesarias para su aplicación en la agricultura 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevados costos de inversión, dependiendo de la tecnología empleada - Requiere calor auxiliar - Dependiendo de la tecnología de secado térmico aplicada se requiere de un manejo de los olores y cenizas generadas
	Oxidación vía humedad		Todo tipo			<ul style="list-style-type: none"> - Altos requerimientos de energía - Depende de presión y temperatura - El líquido generado presenta una alta concentración de carga orgánica - Posible problemas de corrosión
TERMÍCOS	Incineración		Todo tipo	Reducción de volumen	<ul style="list-style-type: none"> - Máxima reducción de volumen - Destrucción de patógenos y compuestos tóxicos - Posible recuperación de energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevados costos de inversión - Potencial generación de contaminación del aire y residuos sólidos peligrosos - Requiere mano de obra calificada - Elevado costos de manejo - Presenta limitaciones en cuanto a la concentración de sólidos

NOTA: (1) La información indicada es una recopilación de antecedentes indicados en las fuentes citadas en las referencias bibliográficas detalladas al final del documento.

2.2 SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO A EMPLEAR

2.2.1 Criterios utilizados en la selección del proceso. Tal como se indicó en la sección anterior, existen varias alternativas de proceso para tratar un lodo, particularmente los lodos biológicos, y detrás de ellos numerosas tecnologías aplicables al tratamiento de estos residuos. La selección de los procesos u operaciones depende de los criterios aplicados según el objetivo planteado.

Por consiguiente, para este estudio se consideraron los siguientes criterios:

- Favorecer aquellas operaciones que apoyen a la concentración del material sólido tratado, de modo de disminuir progresivamente los volúmenes involucrados; mejorando la eficiencia del sistema completo y el empleo de los recursos disponibles.
- Potenciar la utilización del biogás generado en los reactores UASB, como una fuente de energía proveniente de un recurso energético renovable, que permita la implementación de una tecnología de secado de lodos ambientalmente aceptable.
- Obtener un producto final que pueda conducir seguramente a un lodo biológicamente más estable, con menor contenido de patógenos y con mayores posibilidades para su aplicación como abono orgánico, por el momento restringida a su uso en programas de reforestación y recuperación de suelos erosionados.

Considerando las ventajas y desventajas expuestas en la tabla 5 de cada operación o método de tratamiento de lodos y, teniendo en cuenta que para

el manejo integral de lodos biológicos con fines aplicativos en la agricultura, se deben contemplar las etapas de espesamiento, deshidratación y secado, por lo que se conformó la siguiente alternativa de sistema de tratamiento.

Alternativa seleccionada: El sistema de tratamiento considerará las siguientes operaciones unitarias o métodos de tratamiento:

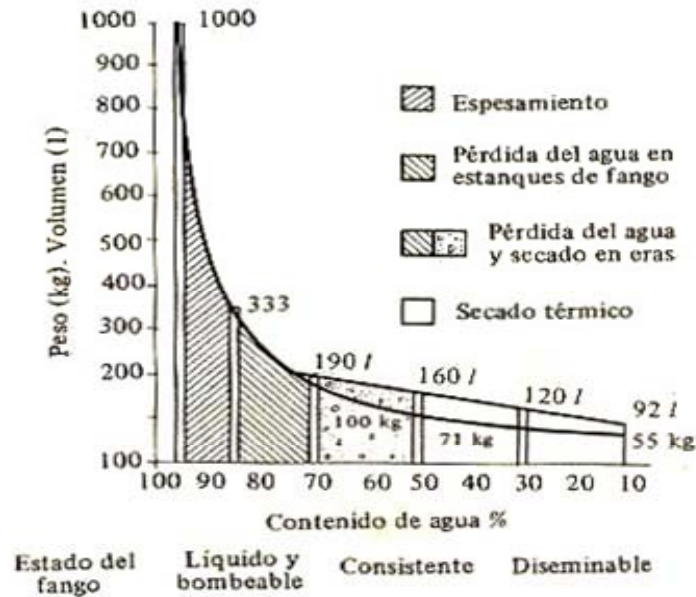
- Espesamiento por gravedad
- Desaguado del lodo biológico en un filtro de banda
- Secado térmico

La estabilización no es considerada debido a que los lodos biológicos provenientes de la purga de los reactores UASB, son lodos de un alto grado de estabilización como consecuencia del proceso anaerobio que se lleva a cabo en estos sistemas.

La figura 6 nos muestra que para que un lodo alcance una concentración de sólido deseada ($\leq 10\%$ humedad) para facilitar su disposición y evacuación, se debe contemplar las operaciones unitarias mencionadas anteriormente.

2.2.2 Alcances de la alternativa seleccionada. La etapa de espesamiento del lodo es importante porque reduce la cantidad de lodo a tratar en las unidades posteriores y por tanto se requieren equipos mas pequeños. El lodo de la PTAR-Río Frío es un lodo que tiene una velocidad de sedimentación alta, lo que constituye en una ventaja para que se pueda pensar en un espesamiento por gravedad. Un espesamiento por flotación incluye mayores aditamentos para la aplicación del aire necesario, y además es recomendado para partículas que tenga problemas de sedimentación, por ello no se considera el espesamiento por flotación como una alternativa de espesamiento.

Figura 6. Variación del contenido de humedad de un lodo en función de las operaciones unitarias aplicadas



Tomado de De Lora y Miro¹⁸

Por otra parte, antes de proceder al tratamiento, es recomendable que el sistema cuente con estanques de amortiguación de caudal donde llegaran los lodos a tratar, por este motivo se ha incorporado un estanque de acumulación.

En la etapa de deshidratación del lodo biológico se ha seleccionado un filtro de banda con lo que se puede alcanzar una densidad de 30 % de sólidos secos, en condiciones económicas de operación. Aunque en esta etapa también es posible emplear una centrifuga, filtro al vacío o un filtro prensa, no fueron considerados debido a los altos costos de operación y mantenimiento de estos equipos. Por otra parte, los lechos de secados, que actualmente existen en la Planta Río Frío no tendrán la suficiente disponibilidad de área para purgar los cuatro reactores UASB que operarán a mediados del año 2005.

¹⁸ DE LORA, Federico y MIRO, Juan. Técnicas para la Defensa del Medio Ambiente. Volumen 2, Editorial Labor, Barcelona, 1978.

En el caso del secado térmico se consideró este proceso por cuanto el interés de la CDMB es obtener un producto final que pueda ser aplicado como abono orgánico. Hay que tener en cuenta, que a nivel local y nacional la mayoría de las líneas de lodos instalados tienen como última etapa el secado mecánico, que consigue unas sequedades no superiores al 40%, por lo que más de la mitad del producto residual es agua.

La solución del secado térmico de los lodos, como última etapa tras secado mecánico, era considerada una opción eficaz; sin embargo, en muchos casos, se clasificaba como una solución inviable económicamente, y no suficientemente desarrollada a nivel tecnológico, para su incorporación a la línea de lodos de las PTAR's.¹⁹

Con un nuevo panorama de aprovechamiento energético del biogás generado en los reactores UASB de la Planta Río Frío, se viabiliza la aplicación de una tecnología madura para el secado térmico de los lodos.

Otro gran alcance que viabiliza la aplicación del secado térmico de lodos es la desinfección del lodo, por motivo de la destrucción de los organismos patógenos indicadores (bacterias, hongos, protozoarios, parásitos, virus, etc.), como consecuencia de las altas temperaturas a que son sometidos los lodos biológicos; con lo que se minimizan los riesgos de infección de los operadores de los equipos de procesos y de la comunidad en general, y se cumple con la normatividad ambiental local, nacional e internacional para la aplicación de lodos en el suelo.

En el siguiente capítulo, se seleccionará el sistema de secado térmico.

¹⁹ PERMUY, Diana. El Sistema STC de Secado Térmico de Lodos a baja Temperatura: Un Nuevo Enfoque. En: QUÍMICA E INDUSTRIA, Enero de 1999; p. 23-27.

3. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE SECADO TÉRMICO Y CARACTERIZACIÓN DEL LODO DE LA PTAR RÍO FRÍO

3.1 TECNOLOGÍAS COMERCIALES PARA EL SECADO TÉRMICO DE LADOS

En el mercado existen sistemas tecnológicos industriales de tratamiento integral encaminados al mejoramiento en el manejo y utilización de los lodos, que permiten cumplir con la normatividad que implica la EPA y la comunidad Europea. En el anexo C se presenta la descripción y los diagramas de flujo de las tecnologías comerciales más aplicadas a nivel mundial, las cuales se mencionan a continuación.

- Secador de pisos múltiples.
- Secador instantáneo..
- El sistema Bojner System..
- Deshidratación Térmica de los biosólidos -ACS-.
- El Proceso de secado térmico de Swiss Combi.
- El Sistema de secado térmico a baja temperatura STC.
- Secador rotatorio.
- Secado de lodos por Cogeneración Sistema Cis Engineering.

3.2 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE SECADO TÉRMICO

Para la selección de la tecnología de secado térmico, se recomienda tener en cuenta los siguientes criterios:²⁰

²⁰ KNEULE, Friedrich. El secado. Enciclopedia de la tecnología de procesos en las industrias químicas y derivados. Tomo I. Urmo S.A. de ediciones. España, 1976. p. 40 -50.

- La primera consideración en la selección de un secador es su facilidad de operación; por encima de cualquier otra consideración, el equipo ha de ser capaz de obtener el producto deseado en la forma y velocidad especificadas.
- Selección inicial de los secadores de acuerdo con las características de secado del material, la circulación del material que entra y que sale del secador, las cualidades del producto e instalaciones disponibles en el sitio de ubicación propuesto.
- Comparación inicial de las tecnologías de secado térmico basado en sus costos de operación y mantenimiento.
- Se prefieren secadores que operen con seguridad y economía, y que la contaminación pueda controlarse.
- Pruebas de secado. Ellas determinan las condiciones óptimas de operación y las características del producto.
- Selección final de la tecnología de secado. Basado en los resultados de las pruebas de secado y los costos de inversión de los equipos.

3.2.1 Metodología para la determinación de la tecnología. Establecidas las operaciones a realizar para el manejo del lodo generado en la PTAR, se debe determinar los equipos a utilizar en el sistema de deshidratación, para ello se establecen unos criterios de selección de cada uno de ellos con el objetivo de que el lodo pueda ser utilizado en otra actividad.

La tabla 6 presenta la clasificación y puntaje para cada uno de los criterios de selección de equipos.

Tabla 6. Criterios de selección de los equipos

CRITERIO DE SELECCIÓN	CLASIFICACIÓN	PUNTAJE
Tecnología (Tec.)	Sencilla	1
	Media	2
	Compleja	3
Estado de la Tecnología (Est.)	Nueva (Planta Piloto)	3
	Nueva (Aplicación Industrial)	2
	Consolidada	1
Inversión (Inv.)	Bajo	1
	Medio	2
	Alto	3
Costo Operación (Cost. Oper.)	Bajo	1
	Medio	2
	Alto	3
Operación (Op)	Continuo	1
	Semi continuo	2
	Bach	3
Área utilizada (A)	Bajo	1
	Medio	2
	Extenso	3
Impacto (Im)	Bajo	1
	Mediano	2
	Alto	3

El equipo de secado térmico seleccionado será el que tenga el menor valor de puntaje, luego de sumar todos los criterios.

La tabla 7 presenta las ventajas y desventajas de los secadores térmicos, en los cuales se tienen consideraciones para el planteamiento del manejo integral de lodos, así como los diferentes tipos de secadores que pueden ser aplicados en la PTAR, pero se enfatizará en aquel que permita tener lodos biológicos de clase A (ver anexo B).

Tabla 7. Análisis de los sistemas tecnológicos para el secado térmico de lodos

TECNOLOGÍA	VENTAJAS (1)	DESVENTAJAS (1)	CONSIDERACIÓN
Secador de pisos múltiples	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce completamente el lodo - Ocupa poco espacio ,es utilizado en planta con poca área de disposición 	<ul style="list-style-type: none"> - No permite utilizar el lodo como abono, por la eliminación total - Altos consumos de energía - Para su utilización como secador se requiere de aditamentos adicionales 	No son tenidos en cuenta dentro de las alternativas por ser mas enfocados para incineración que al secado térmico, prácticamente el lodo es convertido a cenizas, implica que pierde su capacidad como fertilizante y acondicionador de suelos.
Secador instantáneo	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso Continuo. - Permite utilizar el lodo como un producto 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren de un molino adicional para ingresar las partículas muy finas y son procesos de fluidización que requieren sistemas adicionales como ciclones para recuperación de los sólidos. 	En el secador instantáneo el fango se alimenta líquido. El producto final se puede quemar o usar como fertilizante
Secador STC	<ul style="list-style-type: none"> - El sistema de secado térmico de a baja temperatura STC, tiene ventajas como no generación de olores y polvo, porque el aire empleado trabaja en circuito cerrado. - El sistema de secado térmico es modular y consume poco energía por ser un secado a baja temperatura. - Según el distribuidor, el sistema STC presenta un arranque fácil 	<ul style="list-style-type: none"> - El sistema STC, no puede utilizar directamente el biogás generado para calentar aire, es necesario una unidad adicional para calentar el agua quien es la suministra el calor necesario al aire dentro del túnel de secado 	<p>Es un sistema que garantiza la no emisión de olores ofensivos por su sistema de recirculación de aire, consume poco energía, el sistema es automático y puede ser operado con poco personal.</p> <p>Lo cual resulta atractivo para la escogencia de la tecnología. Este sistema es una buena alternativa de tratamiento</p>
Sistema indirectos secadores Boyner System	<ul style="list-style-type: none"> - Son sistemas continuos - No requieren de energía exterior para el calentamiento. - No generan polvo 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto consumo de energía - Tienen grandes dimensiones - Requieren de suministros de calor adicional 	Aunque presenta la ventaja de que genera no genera mucho aire contaminado, tecnológicamente son más complejos que los secadores directo, porque requieren de un circuito de calor y un mecanismo de limpieza que remueve el lodo de la superficie caliente
Sistema rotatorio secador	<ul style="list-style-type: none"> - Los gases de combustión generados en el sistema de cogeneración eléctrica, que se implementará en la PTAR, pueden ser empleados en este tipo de sistema - Permite la utilización del lodo como abono orgánico - Se obtiene un producto final con una concentración de sólidos mayor al 95% en peso 	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de olores y polvo en el secador rotatorio, para lo cual es necesario considerar un sistema de mitigación de estos dos problemas. 	<p>El secador rotatorio es buena opción para utilizar biogás ó gases de combustión de un sistema de cogeneración eléctrica. Existen secadores rotatorios que son automatizados como otros no.</p> <p>Igualmente existen algunos secadores que utilizan el aire para secar el lodo, y otros que realizan el secado por medio de radiación, lo cual debería evaluarse para ver la disminución de las propiedades fertilizante del lodo con este tipo de secado</p>

Tabla 7. Análisis de los sistemas tecnológico para el secado térmico de lodos

TECNOLOGÍA	VENTAJAS (1)	DESVENTAJAS (1)	CONSIDERACIÓN
Rotofluidizador	<ul style="list-style-type: none"> - Es un sistema que está patentado - Utilizado en áreas plantas - Manejo en continuo 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema que requiere de personal altamente capacitado - El producto final no puede ser utilizable - Consumos altos de energía con grandes volúmenes de lodo 	Es un proceso patentado, con sistemas que no son aplicados a tratamiento de los lodos, por lo tanto permiten determinar si las propiedades del lodo como abono son pérdidas.
Secador por cogeneración	<ul style="list-style-type: none"> - Es versátil para la utilización de biogás y todas las fuentes térmicas para el secado - El proceso es automático - tiene control de olores 	<ul style="list-style-type: none"> - Personal calificado para su operación - El residuo no se ha evaluado como potencial abono 	<p>Es un sistema que permite utilizar el biogás para el sistema, pero se debe evaluar el costo de los motores eléctricos adicionales.</p> <p>Como es un secado por fluidización, las características del lodo seco no son utilizables para abono.</p>
Sistema de Swiss Combi	<ul style="list-style-type: none"> - Es un sistema continuo - Utiliza biogás para su proceso - Permite utilizar el lodo como fertilizante - Tiene una cámara de postcombustión para control de olores y posee sistemas para el manejo del material particulado 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplica a grandes cantidades de lodo - Requiere personal calificado - Sistema con bastantes aditamentos 	Es un sistema modular pero contiene varios aditamentos para su funcionamiento, requiere personal calificado y se debe evaluar los requerimientos eléctricos. Sin embargo puede utilizarse el biogás para la su combustión.
Sistema ACS Continuo	<ul style="list-style-type: none"> - El proceso es continuo - Permite utilizar el biogás para el funcionamiento del secado indirecto - Proceso automatizado - Diseño compacto 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere de sistema para control de olores - Costos de inversión alto - No se conocen el consumo de los equipos eléctricos del mismo - Necesidad de limpiar el biogás para su uso 	Es un sistema automatizado con aditamentos para descarga y carga de los lodos y permite además utilizar la disponibilidad energética que la PTAR tiene.
Sistema ACS por Lotes	<ul style="list-style-type: none"> - Se ubica a la salida de un sistema de deshidratación. - Sistema cerrado, no hay exposición del lodo porque tiene sistemas de carga y descarga - Fácil operación 	<ul style="list-style-type: none"> - No es un proceso continuo - No tiene en cuenta el biogás para la generación de energía - No tiene sistema de control de olores 	Es un sistema que no es continuo, es un sistema compacto que ocupa poco espacio pero es ideal cuando se tiene un filtro prensa como equipo de deshidratación

NOTA: (1) La información indicada es una recopilación de antecedentes indicados en las fuentes citadas en las referencias bibliográficas detalladas al final del documento.

La tabla 8 presenta los criterios de selección y la calificación de cada uno de los equipos y tecnologías. Estos puntajes son proporcionados de acuerdo a la descripción de los procesos mencionados anteriormente y a las ventajas, desventajas y consideraciones para cada sistema de secado, indicadas en la tabla 7.

Tabla 8. Selección de equipo de secado

Equipo	Tec.	Est.	Inv.	Cost. Oper.	Op	A	Imp	Puntaje
Secador Rotatorio	2	1	2	1	2	1	2	11
Secador STC	2	1	3	2	2	1	1	12
Secador Indirecto	2	1	3	2	2	1	3	15
Secador de Pisos Múltiples	3	1	3	3	2	1	3	16
Rotofluidizador	3	2	3	2	2	1	1	14
Secador por Cogeneración	3	1	3	2	2	2	1	14
Secador instantáneo	3	3	3	3	2	1	3	18
Sistema Swiss Combi	2	1	3	2	1	2	1	13
Sistema ACS - Continuo	2	1	2	2	1	1	2	11
Sistema ACS - Por lotes	2	1	2	2	2	1	2	12

El puntaje obtenido por los secadores rotatorio (puntaje 11) y el secador continuo indirecto ACS (puntaje 11) obtienen los menores puntajes, seguido por el sistema STC a baja temperatura (puntaje 12).

Se decidió por la selección de un secador rotatorio, por lo que es un equipo que se encuentra más consolidado y conocido en el mercado colombiano.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL LODO HÚMEDO DE LA PTAR RÍO FRÍO

A fin de que el tratamiento y evacuación final del lodo generado en los reactores UASB de la PTAR Río Frío pueda llevarse a cabo en la forma más efectiva, es importante conocer las características físicas, químicas y microbiológicas del lodo a procesar. Las muestras de lodos se tomaron a alturas de 0.5 m, 1.0 m y 1.5 m, donde se encuentran localizadas las purgas de los reactores UASB. (Ver anexo D).

3.4 ANÁLISIS DEL PERFIL DE LODOS

La PTAR Río Frío dentro de su procedimiento de operación realiza determinaciones encaminadas a establecer el comportamiento del manto microbiológico de los reactores, permitiendo determinar el funcionamiento del mismo y la necesidad de proceder a realizar la purga. Dentro de este procedimiento se determina la concentración de sólidos totales, suspendidos y sedimentables, además de calcular el índice de sedimentación y la velocidad de sedimentación. Los resultados promedio de estos parámetros, se muestran en la tabla 9 para una altura de 1.5 m.

Tabla 9. Resultados de los análisis del perfil del lodo de los reactores UASB

PARAMETRO	REACTOR UASB 1	REACTOR UASB 2	REACTOR UASB 3
Sólidos Totales, (mg/l)	26008	26481	28103
Sólidos Totales Volátiles, (mg/l)	15212	15316	16017
Sólidos Suspendidos, (mg/l)	24600	25117	25875
Sólidos Sus. Volátiles, (mg/l)	14800	14067	15050
Sólidos Sedimentables, (ml/l-30 min)	480	557	484
IVL	19.5	22.1	19.7
Velocidad Sedimentación, (m/h)	2.52	2.95	3.28

Tomado de Informe de Operación y Mantenimiento de la PTAR Río Frío²¹

²¹ Planta de tratamiento de aguas residuales Río Frío. Informe de operación y mantenimiento. Bucaramanga, 2003.

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL LODO DESPUÉS DE PRUEBAS SIMULADAS DE SECADO TÉRMICO

Era necesario conocer la calidad del lodo una vez se ha sometido a altas temperaturas dentro de un proceso de secado térmico, con el objeto de verificar el cumplimiento de los estándares internacionales en cuanto a los contenidos de metales pesados y de organismos microbiológicos en este, así como el carácter agrológico. Debido a que uno de los objetivos principales por parte de la CDMB es la aplicación de los lodos tratados bajo un esquema integral, para el aprovechamiento como abono orgánico y acondicionador de suelos.

Se realizaron diferentes pruebas simuladas de secado térmico en el secador de Bandejas ubicado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química.

3.5.1 Pruebas de secado del lodo en un secador de bandejas. Para estas pruebas se tomaron muestras de lodo biológico del reactor UASB 3 a una altura de 1.5 m, altura a la cual se realiza la purga. El lodo obtenido fue deshidratado en un filtro de arena piloto con una tela filtrante y luego fue sometido a un secado con aire a temperaturas promedios de 70 °C, 80°C y 100 °C en el equipo de secado empleado.

Para determinar las características fisico-químicas del lodo, se realizaron dos corridas en el secador de bandejas del laboratorio de Operaciones Unitarias de la UIS, a una temperatura promedio de 80 °C. La primera corrida, se realizó con una muestra de lodo con una humedad inicial del 40% y la segunda corrida con un lodo de humedad inicial del 66%, además se empleó un tiempo de secado aproximado de 4 horas. Para cada corrida se

determinaron las características físico-químicas y agrológicas, antes y después del secado térmico.

- **Características físico-químicas.** La caracterización físico-química de las muestras, se basó en los parámetros definidos por la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) para el aprovechamiento agrícola y no agrícola (recuperación de suelos, aprovechamiento forestal) de los mismos. Estos análisis de laboratorio fueron realizados según las técnicas utilizadas por el Laboratorio de Aguas y Suelos de la CDMB. La tabla 10 presenta los valores obtenidos de la caracterización realizada.

Tabla 10. Análisis físico-químico de los lodos sometidos a pruebas de secado en el secador de Bandejas

Parámetro	Lodo a 40% de humedad		Lodo a 66% de humedad		Límites máximos permisibles según norma EPA 503-13	Lodo biológico de excelente calidad según norma EPA 503-13
	antes	después	antes	después		
Metales pesados						
Cadmio, ppm	4	4	4	4	85	39
Cobre, ppm	320	320	380	380	4300	1500
Cromo, ppm	120	240	160	100	3000	1200
Plata, ppm	26	28	28	24	-	-
Plomo, ppm	100	120	120	120	840	300
Zinc, ppm	1560	2400	1620	1700	7500	2800
Macrocomponentes						
Aluminio, ppm	3600	3300	37000	34000	-	-
Calcio, ppm	12800	13400	15200	12800	-	-
Hierro, ppm	17400	18800	18600	18600	-	-

Parámetro	Lodo a 40% de humedad		Lodo a 66% de humedad		Límites máximos permisibles según norma EPA 503-13	Lodo biológico de excelente calidad según norma EPA 503-13
	antes	después	antes	después		
Metales pesados						
Magnesio, ppm	3180	3280	3440	3060	-	-
Potasio, ppm	1720	1660	1800	2160	-	-
Sodio, ppm	960	820	1000	940	-	-

- **Análisis de resultados.** Como puede verse en la tabla anterior, el contenido de metales pesados en los lodos biológicos de la PTAR Río Frío se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles y por debajo de los valores para un lodo biológico de buena calidad química establecidos por la legislación de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) en su norma 40 CFR Parte 503, para su aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas.

• **Características Agrológicas.** Teniendo en cuenta su aptitud para propósitos agrológicos, se caracterizaron diferentes parámetros en las muestras, lo que permite establecer su valor como sustrato para crecimiento de biomasa vegetal. La tabla 11 reporta los valores obtenidos de la caracterización realizada.

Tabla 11. Análisis de fertilidad y humedad de los lodos sometidos a pruebas de secado en el secador de Bandejas

Parámetro	Lodo a 40% de humedad		Lodo a 66 % de humedad	
	antes	después	antes	después
Humedad, (%)	40.1	2.85	66	7.58
pH, (unidades)	6.34	6.45	6.33	6.42

Parámetro	Lodo a 40% de humedad		Lodo a 66 % de humedad	
	antes	después	antes	después
Matéria Org. (%)	54.5	50.44	53.2	40.11
N, (%)	2.0	1.7	2.2	1.37
P, (ppm)	380	380	430	380
Ca, (meq/100 g)	27.9	25.3	28.5	29.8
Mg, (meq/100 g)	5.0	4.65	4.36	4.3
K, (meq/100 g)	2.6	2.55	2.55	2.15
Al, (meq/100 g)	0	0	0	0
Cu, (ppm)	1.2	0.8	1.2	2.8
Zn, (ppm)	89	66	147	83
Fe, (ppm)	100	80	70	50
Mn, (ppm)	23	21	23	18
B, (ppm)	2.7	2.6	2.8	2.6

- **Análisis de resultados.** Con respecto al pH del lodo, la muestra presenta un valor similar y cercano a la neutralidad que favorece el desarrollo de las plantas y al no ser una valor extremo presenta condiciones ideales para las propiedades físicas de los suelos, por el contrario a pH muy ácidos hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable y con pH muy alcalinos, la arcilla se dispersa, se destruye la estructura y existen malas condiciones desde el punto de vista físico.

En cuanto a la estabilización de los lodos, los análisis efectuados permiten establecer una adecuada estabilidad como lo demuestran los contenidos de materia orgánica después del secado (50.44% y 40.11%), viéndose reflejada

esta estabilidad en la baja generación de olor, una vez los lodos de encuentran secos. Estos valores son positivo si se tiene en cuenta que a nivel físico, la materia orgánica disminuye la densidad aparente del suelo (por tener una menor densidad que la materia mineral), contribuye a la estabilidad de los agregados, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua; a nivel químico, la materia orgánica tiene un papel importante en la mejora de la disponibilidad de micronutrientes para las plantas, así como en la reducción de los efectos tóxicos de los cationes libres; a nivel biológico, la materia orgánica sirve de fuente de energía para los microorganismos del suelo.

Por último, con respecto al contenido de nutrientes, al comparar los lodos analizados con un fertilizante comercial (véase tabla 28, anexo B), los lodos de la PTAR Río Frío presentan concentraciones bajas de los dos nutrientes más importantes para las plantas (nitrógeno y fósforo); no obstante, los lodos contienen concentraciones de otros microelementos, materia orgánica y nutrientes que garantizan un correcto desarrollo de los cultivos a lo largo del tiempo.

- **Características microbiológicas.** Para determinar el análisis microbiológico del lodo, cada muestra tomada se sometió a una deshidratación en un embudo bucher al vacío, por medio de una tela filtrante, para realizar mas rápidamente la filtración, ya deshidratadas fueron secadas en el secador de bandejas, a temperaturas de 70 °C y 100 °C, teniendo en cuenta que a estas temperaturas se puede alcanzar altos porcentajes de eliminación de organismo patógenos. Para cada temperatura se sometieron a secado dos muestras.

Los análisis microbiológicos fueron realizados por el Centro de Innovación en Biotecnología Industrial CINBIN y los resultados se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Análisis microbiológicos de los lodos a diferentes temperaturas de secado

Parámetro	Lodo secado a 70 °C		Lodo secado a 100 °C		Lodo biológico de excelente calidad según norma EPA 503-13 ²²
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	
Coliformes totales, NMP/g	25	32	12	10	Clase A < 1000
Coliformes fecales, NMP/g	14	20	6	4	Clase A < 3
Salmonella spp/25g	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	< 3 NMP / 4 g. sólidos secos totales
Virus Entérico	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	< 1 NMP / 4 g. sólidos secos totales
Huevos Helminetos	Huevos de Uncinaria-Larva Strongyloides inmóvil	Huevos de Ascaris	No se observan	No se observan	< 1 huevo viable / 4 g. sólidos secos totales
Pseudomonas Aeruginosa	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	-
Streptococcus Faecalis	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo	-

-Análisis de resultados. En cuanto a la composición microbiológica de los lodos biológicos, la norma EPA 503 recomienda caracterizar por lo menos 7 muestras. Por tanto, dos caracterizaciones no son representativas.

Se registró un rango de concentración baja de coliformes totales (10 - 32) que no sobrepasa el valor límite para lodo biológico de excelente calidad (clase A < 1000); sin embargo con respecto a los coliformes fecales las concentraciones obtenidas (4 – 20) excedieron el valor límite del lodo de excelente calidad (clase A < 3). Era de esperarse una concentración más baja, por tanto, se recomienda secar los lodos a temperaturas mayores de 100 °C.

²² Estos lodos tienen concentraciones bajas de químicos contaminantes, especificaciones microbiológicas Clase A y bajo potencial de atraer organismos vectores. No tienen restricciones de ninguna clase

En cuanto a las Streptococcus Faecalis en tres muestras arrojaron un resultado positivo y en una negativo, la presencia de este tipo de bacteria no tiene restricción en cuanto las normas de la EPA.

Igualmente, dos muestras presentaron Huevos Uncinaria-Larva, Strongyloides y Huevos de ascaris para el análisis de Huevos Helmintos pero a las temperaturas expuestas no son considerados viables, y las larvas encontradas se reportaron inmóviles lo que indica que igualmente cumplen con los estándares de la norma.

3.6 DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA A PARTIR DEL BIOGÁS

Actualmente, la CDMB está formulando un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), denominado “Proyecto de transferencia de tecnología para la valorización del biogás y control de las emisiones atmosféricas asociadas a la operación de la PTAR de Río Frío”. En el cual se busca optimizar y aprovechar la captura de aproximadamente 1.16 kton CH₄ /año aportadas por el biogás producido en los reactores anaerobios tipo UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket).

Con el propósito de explotar los diferentes potenciales del biogás para el proceso de tratamiento, con el proyecto MDL se propone la optimización de los sistemas de captura y conducción y la instalación de una unidad de cogeneración eléctrica (motores de combustión interna), para producir la energía eléctrica de 4.93 Gwh/año en el período 2006 -2012 y 6.17 Gwh/año en el período 2012 – 2019, como consecuencia de la entrada en operación de un quinto reactor UASB. Esta producción de energía es requerida por las necesidades actuales y futuras de la PTAR s.²³

²³ MENESES, Alexander. Propuesta Técnica: Proyecto de Transferencia de Tecnología para la Valorización del Biogás y Control de Emisiones en la PTAR “Río Frío”.

Como los motores combustión interna utilizan apenas 30 a 35% del total de la energía que consumen transformando los 65 a 70% restantes en calor, es posible combinar generación de energía motriz con generación de energía térmica, integrando y atendiendo la demanda de los dos tipos de energía.

Bajo este escenario, habría que pensar en la utilización de la energía calorífica procedente de los motores, para utilizarla en el calentamiento de aire que se empleará para secar los lodos biológicos de la PTAR, mediante un proceso de secado directo, obteniendo de esta manera el máximo aprovechamiento de la planta de cogeneración. Reduciendo de esta forma el costo operacional del equipo de secado térmico.

Una caracterización del biogás generado en los reactores UASB de la PTAR Río Frío, se reporta en la tabla 13.

Tabla 13. Características del biogás en la PTAR “Río Frío”

Zona de producción	Valor
Producción actual recuperada en las campanas (con 3 reactores en servicio)	5000 m ³ /día
Producción proyectada recuperada en las campanas (con 4 reactores en servicio)	6500-7000 m ³ /día
Composición y propiedades fisicoquímicas *	% molar
CH ₄	81.63
CO ₂	8.69
H ₂ S	0.11
N ₂	9.22
O ₂	0.34
Factor de compresibilidad, Z	0.997
Poder calorífico neto, Btu/ft ³	745.0

Tomado de Meneses²⁴

* Los resultados obtenidos corresponden al muestreo efectuado por el Instituto Colombiano del Petróleo, por medio de la técnica analítica Cromatografía en fase gaseosa.

²⁴ Ibid., p. 20-21.

4. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS BIOLÓGICOS

Según los criterios de selección para el sistema de manejo de lodos aplicados en los capítulos precedentes, se obtuvo la alternativa de tratamiento integral de lodos biológicos más adecuada con miras de alcanzar un producto seco y estable para su aprovechamiento. En este capítulo se presenta los parámetros de diseño de los equipos principales que componen dicha alternativa de tratamiento, esto es Espesador por Gravedad, Filtro Banda y Secador Rotatorio; los resultados obtenidos utilizando la herramienta de cálculo en Matlab, posteriormente se encuentra el diagrama general de flujo; y finalmente, un breve análisis económico del monto total de capital de inversión para toda la planta; con este análisis de inversión económica se logro determinar el costo por tonelada de lodo biológico tratado.

4.1 ESTANQUE DE ACUMULACIÓN

Esta unidad, acumula el lodo recepcionado en la corriente de entrada, provenientes de los reactores UASB, los cuales llegan a este por gravedad a través de las tuberías de purgas. Para efectos del proceso es una unidad que permitirá mantener los flujos constantes a las demás operaciones. Su capacidad está dada por el ciclo operativo de la planta de tratamiento de lodos, que será de un período operación de 5 d/semana de 8 ó 12 h/día, con lo que se espera disminuir los costos de mano de obra en la Planta.

Para el presente proyecto, se trabajó con una producción diario de lodos de $80 \text{ m}^3/\text{d}$, con una humedad del 92%. Por lo tanto, para el dimensionamiento del estanque de acumulación, se tendrá en cuenta un volumen de 160 m^3 , lo

que equivale a la acumulación de lodos de un fin de semana. Para la construcción del tanque se puede emplear un material de construcción como hormigón, que pueda resistir presiones hasta de 3000 psi. En la tabla 14 se reportan las dimensiones de dicho tanque.

Tabla 14. Dimensiones del estanque de acumulación

CONCEPTO	VALOR
Volumen	160m ³
Largo	10m
Ancho	8 m
Profundidad	2 m
Espesor	20 cm

4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD

Un espesador por gravedad es un sedimentador dotado con barredoras de lodos para producir un lodo más concentrado que el lodo aplicado. La función principal es concentrar los sólidos en suspensión mediante asentamiento por gravedad, para lograr un balance de materia en régimen estacionario con extracción continua de sólidos, especialmente en el efluente inferior a la velocidad con que entran con la alimentación.²⁵

El anexo E presenta una descripción más detallada de la operación y funcionamiento de este sistema y las ecuaciones de diseño.

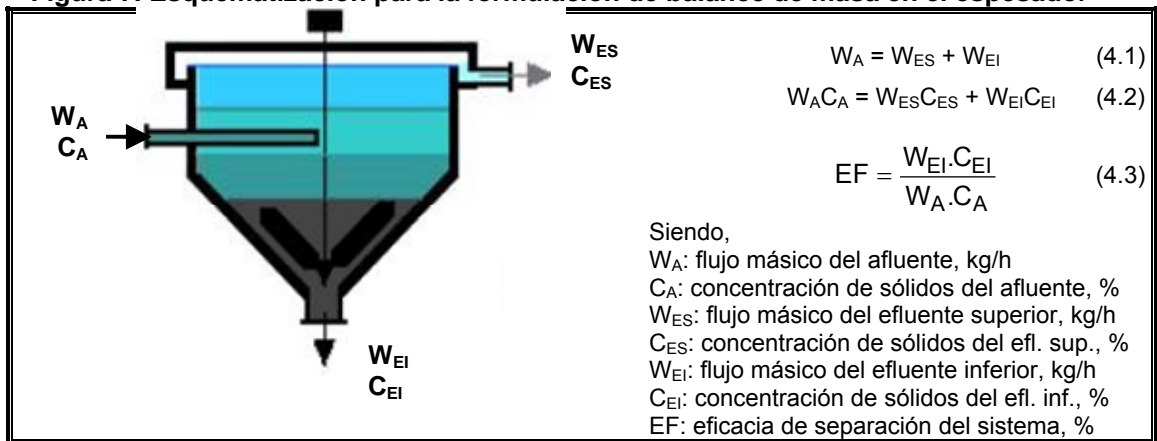
4.2.1 Ecuaciones de balance de sólidos y caudales. Para determinar los caudales y composición de las corrientes de salida del espesador (líquido de rebose y el espesado), es necesario realizar un balance de masa alrededor de este (figura 7). Para la preparación del balance de masa, es necesario

²⁵ PERRY, Robert H y GREEN, D. Manual del Ingeniero químico. Séptima edición. Volumen III, section 18. España: McGraw-Hill, 2001. p. 18-80.

disponer de información sobre el rendimiento y eficiencia del espesador empleado.

Además del dato relativo a la concentración de sólidos esperada en el espesado, la elaboración del balance de masa también requiere disponer del dato acerca de las concentración esperada de sólidos en el líquido de rebose. Este puede obtenerse, teniendo en cuenta que de un espesador bien diseñado y operando adecuadamente, puede esperarse una concentración de sólidos suspendidos en un intervalo de 80 a 300 mg/l en el líquido de rebose, para lodos digeridos, con un valor típico de 200 mg/l.²⁶

Figura 7. Esquemización para la formulación de balance de masa en el espesador



4.3 DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO BANDA

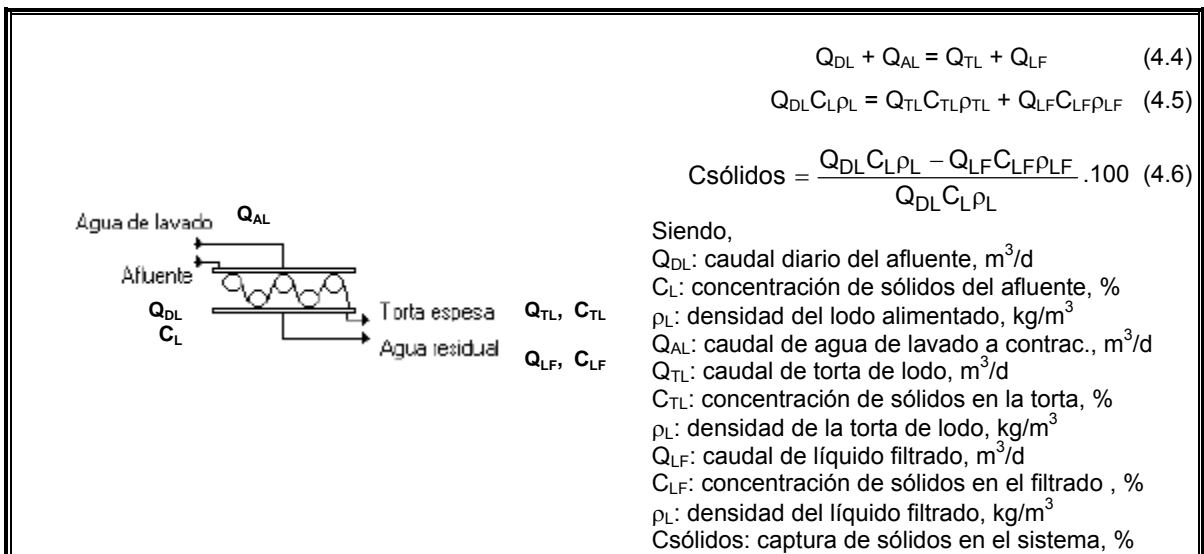
Este equipo es efectivo para el tratamiento de lodos biológicos anaerobios, debido a que este tipo de lodos contienen partículas sólidas muy gruesas que sedimentan rápidamente. En el mercado se dispone de filtros banda de diferentes dimensiones, con anchuras de banda variables entre 0.5 y 3.5 m. Las bandas de 2 m de ancho son las más comúnmente empleadas para el tratamiento de lodos de aguas residuales municipales.

²⁶ METCALF & EDDY, Op. cit., p. 1012.

En el anexo E se describe la operación, funcionamiento y ecuaciones de dimensionamiento de este equipo.

4.3.1 Ecuaciones de balance de sólidos y caudales. Los caudales de salida del filtro banda (volumen de la torta de fango y líquido filtrado), se pueden determinar mediante un balance de sólidos como el que se esquematiza en la figura 8. En este balance, se debe estimar el caudal de agua de lavado a contracorriente; En Metcalf & Eddy²⁷, se recomienda un valor que debe estar comprendido entre 1.6 y 6.3 l/s.m de ancho de banda.

Figura 8. Esquemización para la formulación de balance de masa en el filtro banda



Igualmente, es necesario conocer la concentración esperada de sólidos en la torta de lodos y la concentración de sólidos suspendidos en el líquido filtrado, para resolver el sistema de ecuaciones lineales obtenidas en el balance. Para lodos digeridos anaerobiamente, la concentración de sólidos en la torta de lodo varía entre 24 – 30%, reportándose un valor típico de 28%. Asimismo, se reportan concentraciones típicas de sólidos suspendidos en el

²⁷ METCALF & EDDY, Op. cit., p. 980.

líquido filtrado de un filtro banda, las cuales se encuentran en un intervalo de 200 a 2000 mg/l para lodos digeridos, con un valor típico de 1000 mg/l.^{28, 29}

4.4 DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR ROTATORIO

En este proyecto se diseñó un secador rotatorio de calor directo con flujo a contracorriente de gas y sólidos, para generar mayor eficacia de transferencia de calor, además, se supuso que las pérdidas de calor hacia el medio exterior son despreciables (proceso adiabático). El anexo E presenta la descripción y ecuaciones de diseño.

Se utilizó aire caliente como medio de calentamiento de los lodos biológicos, aprovechando las ventajas de que el sistema aire-agua, ha sido estudiado por diferentes investigadores desde hace mucho tiempo, lo cual nos permite determinar con mayor facilidad las relaciones psicrométricas para este sistema a las condiciones climáticas de área metropolitana de Bucaramanga. Estas relaciones se pueden determinar por computadora, empleando las ecuaciones y procedimientos básicos, que Johannsen³⁰ presentó para escribir un programa general de computadora capaz de graficar cartas psicrométricas en Sistema Internacional (SI), para cualquier presión barométrica y rango de temperatura.

4.4.1 Balance de materia y energía sin recirculación. La figura 9, esquematiza el diagrama de flujo para el secado de lodos empleando aire caliente a contracorriente, en un proceso adiabático. El lodo con una

²⁸ Ibid., p. 1011 – 1012.

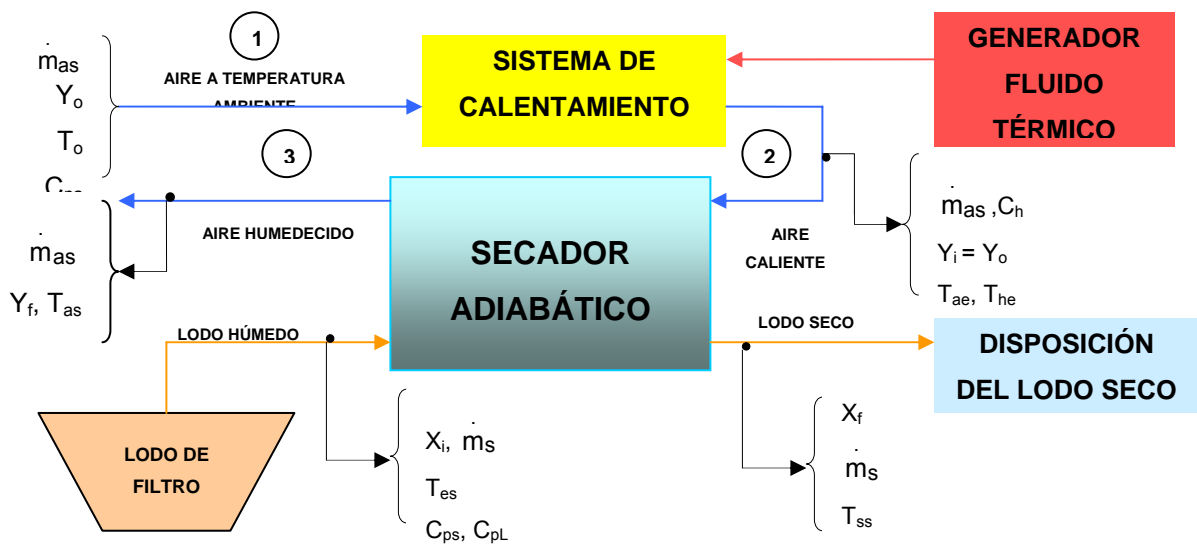
²⁹ ROMERO, Op. cit., p. 827.

³⁰ JOHANNSEN, A. Plotting Psychrometric Charts by Computer. En: The South African Mechanical Engineer, vol 32, Julio de 1982.

humedad promedio del 72%, proveniente del filtro banda, donde fue sometido a un proceso de desaguado a presión, es tratado térmicamente en el secador rotatorio.

Cabe anotar, que al aire atmosférico debe ser calentado con un sistema de calentamiento con tubos extendidos, empleando como medio de calentamiento los gases de cola generados en la planta de cogeneración eléctrica, como se describió en el capítulo precedente. En la figura podemos ver que entre los puntos 1 y 2, el aire es calentado por medio de un intercambiador de calor a humedad absoluta constante, y entre los puntos 2 y 3 se lleva a cabo la operación de secado (transferencia de materia y energía); en este proceso el aire es enfriado y humedecido, debido a la transmisión de calor a los lodos y transmisión de materia (agua) de los lodos al aire, respectivamente.

Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de secado térmico



El sólido entra con un flujo \dot{m}_s (masa de sólido seco/ tiempo); se seca de X_i a X_f (masa de agua/ masa de sólido seco), y sufre un cambio de temperatura

de T_{es} a T_{ss} . El aire fluye con una rapidez \dot{m}_{as} (masa de aire seco/ tiempo) y sufre un cambio de humedad de Y_i a Y_f (masa de humedad/ masa de aire seco) y un cambio de temperatura T_{ae} a T_{as} . Entonces, un balance de humedad es:

$$\dot{m}_s \cdot X_i + \dot{m}_{as} \cdot Y_i = \dot{m}_s \cdot X_f + \dot{m}_{as} \cdot Y_f \quad (4.7)$$

$$\dot{m}_s (X_i - X_f) = \dot{m}_{as} (Y_f - Y_i) \quad (4.8)$$

• **Determinación del calor total transmitido.** El consumo global de calor necesario para retirar el agua contenido en los lodos desde X_i a X_f , depende básicamente de lo siguiente:

- Calor para calentar la alimentación (lodo húmedo) hasta la temperatura de vaporización;
- Calor para vaporizar el agua;
- Calor para calentar los sólidos hasta su temperatura final; y
- Calor para calentar el vapor hasta su temperatura final.

Teniendo en cuenta lo anterior, la velocidad de global de transmisión de calor por unidad de masa de sólidos secos (Q_t/\dot{m}_s), se puede determinar en la forma en que se indica a continuación:³¹

$$\frac{Q_t}{\dot{m}_s} = c_{ps}(T_{ss} - T_{es}) + X_i c_{pL}(T_v - T_{es}) + (X_i - X_f)\lambda + X_f c_{pL}(T_{ss} - T_v) + (X_i - X_f)c_{pv}(T_{sv} - T_v) \quad (4.9)$$

Donde: T_{se} : temperatura de los sólidos a la entrada del secador, °C

T_v : temperatura de vaporización, °C

³¹ McCABE y HARRIOTT, Op. cit., p. 825 – 826.

T_{ss} : temperatura de sólidos a la salida del secador, °C. Esta temperatura se aproxima a la del gas de entrada

T_{sv} : temperatura del vapor a la salida, °C

λ : calor latente de vaporización, kJ/kg

C_{ps} , C_{pL} , C_{pv} : calores específicos del sólido, líquido y vapor, respectivamente, kJ/kg.°C

En un secador adiabático T_v es la temperatura húmeda del gas T_{he} y T_{sv} es la temperatura del aire a la salida T_{as} . El calor transmitido a los sólidos, al líquido y al vapor, Q_t , tal como expresa la ecuación 4.9, procede del enfriamiento del aire caliente. Para un secador adiabático continuo el balance de calor conduce a:³²

$$Q_t = \dot{m}_{as}(1 + Y_i) \cdot c_{hi} \cdot (T_{ae} - T_{as}) \quad (4.10)$$

Siendo, \dot{m}_{as} : velocidad másica del aire seco, kg/s

Y_i : humedad absoluta del aire a la entrada, kg agua/kg aire seco

c_{hi} : calor húmedo del aire para la humedad de entrada, J/g.°C

• **Transferencia de materia en el secador.** Como en un secador rotatorio el aire circula a través de los sólidos, el agua tiene que transferirse desde la superficie del sólido hasta el aire. La velocidad media de transferencia de agua (vapor) m_v se calcula fácilmente a partir de la siguiente relación:

$$m_v = \dot{m}_s(X_i - X_f) \quad (4.11)$$

Si el aire entra con una humedad absoluta Y_i , la humedad absoluta a la salida Y_f puede despejarse de la ecuación 4.8, y viene dada por:

$$Y_f = Y_i + \frac{\dot{m}_s(X_i - X_f)}{\dot{m}_{as}} \quad (4.12)$$

³² McCABE y HARRIOTT, Op. cit., p. 826.

4.5 EQUIPOS AUXILIARES

En la Planta de Tratamiento de Lodos Biológicos que se ha propuesto, son necesarios algunos equipos auxiliares como elementos constitutivos, necesarios y fundamentales en el procesamiento integral de estos lodos. Teniendo en cuenta lo anterior, se necesitan sistemas de transporte de lodos desde una unidad a otra de la planta, extractor para forzar el paso del aire de secado por el equipo secador, un sistema de calentamiento con tubos extendidos para el aire de secado, y finalmente, hay que considerar un sistema de lavado de gases, con el fin de eliminar las partículas contaminantes que pueda acarrear los gases de salida del secador. En el Anexo F se describen estas unidades de transporte y de control de emisión.

4.6 RESULTADOS DE DISEÑO OBTENIDOS MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

Hoy en día la aplicación de herramientas computacionales de cálculo en el dimensionamiento de equipos industriales es cada vez más frecuente, ya que permiten disminuir el tiempo involucrado en la solución de ecuaciones que antiguamente se realizaba en forma manual. Estas herramientas son muy utilizadas por Ingenieros de Procesos que realizan labores de administración, control o diseño de plantas industriales.

Las dimensiones de los equipos y las condiciones de operación y funcionamiento para cada uno de las unidades principales para el tratamiento integral de los lodos de Río Frío, fueron calculadas por un programa de computador en lenguaje de programación **MatLab 6.5[®] (simulador matemático)**, como una herramienta de cálculo computacional, para facilitar las evaluaciones en de las diferentes dimensiones de los equipos, dadas ciertas condiciones de operación y funcionamiento.

La metodología empleada para desarrollar el algoritmo conformado por las ecuaciones y parámetros de diseño para cada uno de los equipos a dimensionar se describe en el Anexo G, igualmente se puede observar el código de programación del programa de computación, en el que se detallan más explícitamente el conjunto de ecuaciones utilizadas.

4.6.1 Parámetros de diseño requeridos por el programa. La información requerida por el programa es la siguiente:

- a. Especificar el volumen total producido diariamente, humedad y el peso específico del lodo.
- b. Seleccionar el ciclo de operación deseado para la planta de lodos.
- c. Definir las condiciones de operación y diseño del espesador por gravedad.
- d. Precisar las condiciones de operación y diseño del filtro banda,
- e. Especificar las condiciones de operación y diseño del secador rotatorio.
- f. Aplicar criterios de convergencia necesarios para la evaluación de las relaciones psicrométricas del sistema aire-agua.

Con el ingreso de los datos de diseño y los modelos matemáticos para cada unidad, el programa computacional determina los siguientes parámetros:

- La producción semanal media de lodo y las necesidades horarias y diarias de tratamiento de sólidos basándose en el ciclo operativo seleccionado.
- Para el **espesador por gravedad** los modelos estiman el área de sedimentación requerida, el volumen del espesador, la carga superficial de rebose, el tiempo de retención hidráulico, los flujos y composición de las corrientes de salida y la eficacia de separación del sistema.

- Con relación al **filtro banda** los modelos determinan el ancho de la banda, caudal de agua de lavado en contracorriente, los flujos y composición de las corrientes de salida y el porcentaje de captura de sólidos.
- Finalmente para el **secador rotatorio** los modelos calculan las dimensiones del equipo, esto es el diámetro, longitud y volumen, para lo cual fue necesario determinar las relaciones psicrométricas para el sistema aire-agua a la temperatura de operación, la velocidad global de transmisión de calor para secar los lodos desde la humedad de entrada hasta la humedad de salida, las necesidades de flujo másico y volumétrico de aire para el secado. Además, el programa evalúa el consumo de calor para calentar el aire desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de entrada en el equipo, la velocidad de transferencia de agua, entre otros.

En las tabla 15, se reportan los rangos y datos de operación y diseño que son base para el dimensionamiento de los equipos de la planta de lodos.

Tabla 15. Datos fundamentales de diseño requeridos por el programa computacional

ESPECIFICACIÓN	PARAMETROS DE DISEÑO DE ENTRADA	RANGO DE VARIACIÓN Ó VALOR TÍPICO
LODO PURGADO DE LOS UASB	Volumen producido por día, (m ³ /día)	80
	Humedad del lodo en base húmeda, (%)	92
	Peso específico	1.01
CICLO DE OPERACIÓN	Días de operación a la semana	5
	Horas de operación por día	8 ó 12
ESPESADOR POR GRAVEDAD	Carga superficial de sólidos, (kg/m ² d)	120
	Profundidad del espesador, (m)	2 – 5
	Concentración de sólidos en el espesado, (%)	12
	Peso específico del espesado	1.02
	Concentración de sólidos suspendidos en el líquido de rebose, mg/l	200
	Peso específico del líquido de rebose	1.01

ESPECIFICACIÓN	PARAMETROS DE DISEÑO DE ENTRADA	RANGO DE VARIACIÓN Ó VALOR TÍPICO
FILTRO BANDA	Carga de lodo aplicada por metro de ancho de banda, (kg/h.m)	360 – 550
	Caudal de agua de lavado por ancho de banda, (l/s.m)	1.6 – 6.3
	Concentración de sólidos en la torta, (%)	28
	Peso específico de la torta	1.07
	Concentración de sólidos suspendidos en el líquido filtrado, mg/l	1000
	Peso específico del líquido filtrado	1.01
SECADOR ROTATORIO	Calor específico del lodo a la entrada, (kJ/kg.°C)	4.2
	Temperatura de entrada del lodo, (°C)	27.5
	Temperatura de salida del lodo, (°C)	150 - 180
	Humedad del lodo a la salida, (%)	8
	Temperatura ambiente promedio, (°C)	27.5
	Velocidad másica máxima permitida para el aire, (kg/m ² .s)	0.27 – 13.20 (se seleccionó 4.0)
	Humedad relativa del aire, (%)	61.50
	Presión atmosférica, (Pa)	90593
	Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada, (°C)	150 - 210
	Número de unidades de transferencia	1.5 – 2.5
	Calor específico del líquido (kJ/kg.°C)	1.0
	Porcentaje del área de sección transversal libre, %	85 - 90
	Tiempo de residencia aproximado, (min)	45 - 120

4.6.2 Resultados y análisis resultados. En esta sección se muestran los resultados evaluados por la herramienta de cálculo desarrollada en Matlab (programa 20041001), para la alternativa de tratamiento integral de los lodos de la PTAR Río Frío que fue seleccionada en los capítulos precedentes.

Los valores reportados en las siguientes tablas, son los mejores resultados a los que se llegó después de numerosas corridas del programa de computación con diferentes datos de diseño y operación, para cada una de las unidades dimensionadas.

Antes de presentar los resultados para cada equipo, se mostrará en las tablas 16 y 17 el procesamiento de lodos biológicos horario, diario, semanal y

anual, así como, el tiempo de operación diaria, semanal y anual, respectivamente.

Tabla 16. Procesamiento de lodos biológicos horario - diario - semanal - anual

Procesamiento Unidades	Horario		Diario		Semanal		Anual	
	Ton/h	m ³ /h	Ton/d	m ³ /d	Ton/s	m ³ /s	Ton/a	m ³ /a
Lodo a Tratar	9.4	9.3	113.1	112.0	565.6	560	29411	29120

Tabla 17. Tiempo de operación diario - semanal - anual

Operación Unidades	Diaria	Semanal		Anual	
	horas/día	días/sem	horas/sem	días/año	horas/año
Tiempo de Operación	12	5	60	260	3120

- **Espesador por gravedad.** En la tabla 18 se presentan las dimensiones y los parámetros de operación y funcionamiento obtenidos para la unidad de espesamiento de lodos biológicos; igualmente, en la tabla 31 se reportan los flujos máxicos y volumétricos y la concentración de sólidos en todas las corrientes que entran y salen del sistema.

Tabla 18. Dimensiones y parámetros de operación y funcionamiento para el espesador

PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN	VALOR OBTENIDO
Diámetro, m	9.80
Profundidad, m	2.0
Volumen, m ³	150.83
Área superficial, m ²	61.57
Carga superficial de rebose, m/día	1.49
Tiempo de retención hidráulico, días	1.3
Eficacia de separación, %	99.92

Tabla 19. Flujos másicos y volumétricos y composición de las corrientes de entrada y salida en el espesador

CORRIENTE	FLUJO MÁSICO Kg./h	FLUJO VOLUMÉTRICO, m ³ /h	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS, %	DENSIDAD, Kg./m ³
Alimentación	9426.67	9.33	8	1010
Espesado	6279.20	6.16	12	1020
Líquido de rebose	3147.47	3.12	0.02	1000

- **Análisis de resultados.** El diámetro obtenido para el espesador es lógico, si se tiene en cuenta que los espesadores generalmente tienen diámetros de 3 a 30 m; asimismo, la carga superficial de rebose es menor que el valor de 8 m/día, como lo recomienda la literatura para lodos anaerobios. Además, es importante mencionar que con la aplicación de este proceso, la masa total de agua se redujo en aproximadamente un 36.30% de su peso (de acuerdo al análisis de la tabla 19), esto es 37.76 ton/jornada operación-día, lo que no sucedería si se obviara este proceso. Una reducción tan importante como esta, permite diseñar equipos con menores dimensiones y por consiguiente más económicos para las operaciones unitarias subsecuentes.

- **Filtro banda.** El parámetro más importante para esta unidad, es el ancho de la banda y la eficiencia de separación, estos valores se encuentran reportados en la tabla 20. En la tabla 21, se presentan las características de las corrientes de entrada y salida en el equipo.

Tabla 20. Dimensiones y parámetros de operación y funcionamiento para el espesador

PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN	VALOR OBTENIDO
Anchura de Banda, m	2.0
Captura de sólidos en el sistema, %	97.58

Tabla 21. Flujos másicos y volumétricos y composición de las corrientes de entrada y salida en el filtro banda

CORRIENTE	FLUJO MÁSICO Kg./h	FLUJO VOLUMÉTRICO, m³/h	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS, %	DENSIDAD, Kg/m³
Alimentación	6279.20	6.16	12	1020
Agua de lavado	14617.97	14.62	0	1000
Torta de lodo	2625.83	2.45	28	1070
Filtrado	18271.34	18.09	0.10	1010

- **Análisis de resultados.** Para este equipo, el ancho de banda es uno de los parámetros de diseño más importante; el valor reportado en la tabla 20 es razonable, conociendo que a nivel comercial se dispone de filtros con anchuras de banda entre 0.5 y 3.5 m, y que un ancho de banda de 2.0 m es el que se usa frecuentemente para el tratamiento de lodos de PTAR's.

Al analizar la tabla 21, se puede decir que esta operación unitaria representa una reducción de la masa de total de agua de aproximadamente un 66% entre la entrada y la salida del filtro banda, lo que significa el desaguado de unas 43.62 ton de agua/jornada operación día; esta eliminación de agua es realmente importante a la hora de dimensionar el secador rotatorio, ya que el flujo másico de lodo húmedo a tratar es mucho menor. Además, una remoción importante de agua contribuye a disminuir los costos de transporte del lodo al subsiguiente proceso, así como facilitar su manipulación.

- **Secador rotatorio.** Las tablas 22, 23 y 24 presentan todos los parámetros de diseño, operación y funcionamiento de la unidad de secado de lodos con una corriente caliente de aire.

La tabla 22, reporta las dimensiones y parámetros de diseño; la tabla 23 presenta las condiciones de entrada y salida del aire de secado; y la tabla 24 muestra las condiciones de entrada y salida de los lodos biológicos.

Tabla 22. Dimensiones y parámetros de diseño del Secador Rotatorio

PARÁMETROS DE DISEÑO	VALOR OBTENIDO
Diámetro, m	1.82
Longitud, m	7.90
Área de sección transversal, m ²	2.59
Volumen, m ³	20.45
Área superficial, m ²	45.05
Relación longitud/diámetro, m/m	4.3
Evaporación de agua, kg/h	1826.7
Capacidad KgH ₂ O evaporada/m ³ volumen secador	89.32
Eficiencia de evaporación KJ suministrado/ KgH ₂ O evap.	2795.68
Calor transmitido por el aire a los lodos, kj/s	1418.54
Calor necesario para calentar el aire, desde T1* a T2**, kj/s	1847.13

*T1 = temperatura ambiente

**T2 = temperatura a la entrada del secador

Tabla 23. Condiciones de entrada y salida del aire en el secador rotatorio

VARIABLES	UNIDAD	CONDICIONES DEL AIRE	
		ENTRADA	SALIDA
Flujo másico de AH ^x	kg/h AH	37286.27	39112.94
Flujo másico de AS ^{**}	kg/h AS	36699.54	36699.54
Flujo volumétrico AH	m ³ /h AH	56434.90	43804.20
Velocidad másica máxima permitida	kg/h.m ²	14400	14400
Presión atmosférica	Pascal	90593	90593
Temperatura de bulbo seco	°C	200	67.52
Temperatura de bulbo húmedo	°C	46.79	46.79
Humedad relativa	%	0.15	30.79
Humedad absoluta	kgH ₂ O/kg AS	0.0160	0.0658
Volumen específico	m ³ /kg AS	1.54	1.19
Densidad húmeda	kg/m ³ AH	0.66	0.89
Calor húmedo	kJ/kg.°C	1.03	1.13
Entalpía de mezcla	kJ/kg AH	246.25	240.39

AH = Aire húmedo

** AS = Aire seco

Tabla 24. Condiciones de entrada y salida de los lodos biológicos en el secador

VARIABLES	UNIDAD	CONDICIONES DEL LODO	
		ENTRADA	SALIDA
Flujo másico de lodo	kg/h lodo	2625.83	799.17
Flujo másico de SS [*]	kg/h SS	735.23	735.23
Velocidad másica de SS/AST ^{**}	kg/h.m ²	283.95	283.95
Humedad en base húmeda	%	72	8
Humedad en base seca	kgH ₂ O/kg SS	2.5714	0.0870
Temperatura	°C	27.5	170.0

* SS = Sólidos seco

** AST = Área de sección transversal

- **Análisis de resultados.** La relación L/D = 4.3 presentada en la tabla 22, es un valor acertado para un secador rotatorio, tal como lo describe la literatura. Asimismo, el secador muestra una alta capacidad y eficiencia, con valores de 89.32 kgH₂O evaporada/m³ de volumen de secador y 2795.68 KJ suministrado/ KgH₂O evaporada, respectivamente.

El calor necesario para calentar el aire desde la temperatura ambiente a la temperatura de entrada en el secador, como se observa en la tabla 22, es muy cercano a la energía térmica residual disponible en los gases de cola de los motores de combustión interna. En esta misma tabla se puede analizar que el aire caliente cedió aproximadamente el 77% de su energía térmica a los lodos.

La tabla 23 nos muestra que el flujo másico de aire húmedo aumentó aproximadamente en un 4.70% desde la entrada a la salida del proceso, debido al acrecentamiento del contenido de vapor de agua en la corriente; mientras, que el flujo volumétrico decreció en 22.40%, como consecuencia del aumento de la densidad de la mezcla aire-agua a la salida del secador. Asimismo se puede observar que la temperatura de bulbo seco disminuyó en 132.50 °C, con lo cual se debe garantizar la vaporización de una gran

cantidad de agua de los lodos. Por otro lado, la temperatura de bulbo húmedo a la entrada del secador fue de 46.79 °C, similar a la salida, ya que esto se cumple en secadores adiabáticos, donde las pérdidas de energía al medio exterior son despreciables.

La humedad relativa aumentó de 0.15% a 30.79%, aproximadamente doscientos cinco veces; mientras, que la humedad absoluta creció cuatro veces, de 0.016 a 0.0658 kgH₂O/kg AS.

Con relación a las condiciones de entrada y salida del lodo húmedo, se puede decir que en este proceso se reduce el contenido total de agua en un 96.62% de su peso (según la tabla 24), esto es 21.92 ton/jornada operación-día.

4.6.3 Diagrama general del proceso. En la figura 10 se pueden apreciar los diferentes elementos constitutivos y el balance de masa de sólidos de las principales operaciones de la Planta de Tratamiento que manejará de forma integral los lodos de la PTAR Río Frío.

En la tabla 25, se presenta la nomenclatura de los electos constitutivos del diagrama de proceso.

Tabla 25. Elementos constitutivos del proceso en general




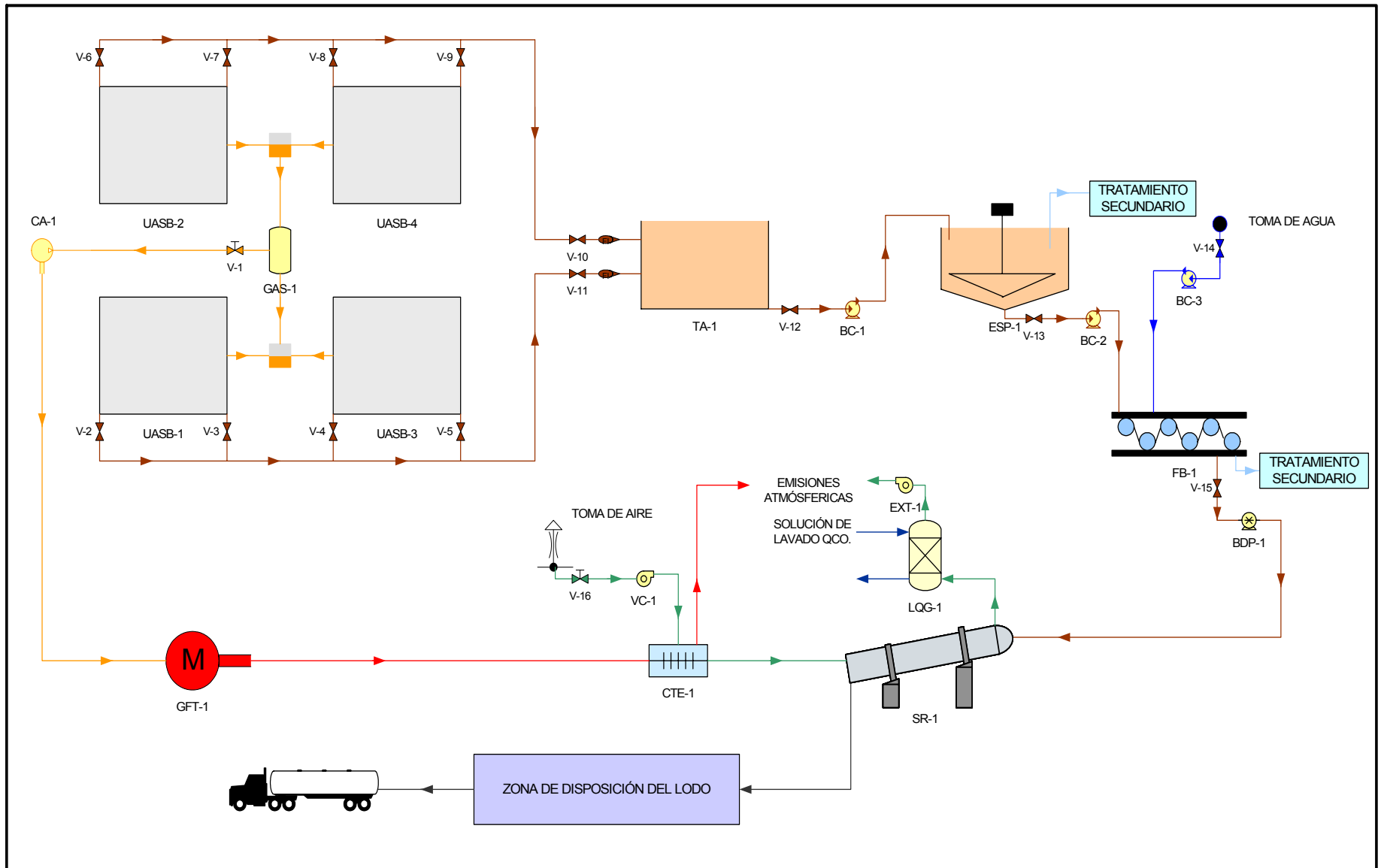
UNIDADES DE OPERACIÓN	NOMENCLATURA
Reactores UASB	UASB-1, UASB-2, UASB-3 Y UASB-4
Tanque de acumulación	TA-1
Bombas de transporte de lodos	B-1, B-2 Y B-3
Espesador por gravedad	EG-1
Filtro banda	FB-1
Secador rotatorio	SR-1
Extractor de aire	EXT-1
Sistema de cogeneración eléctrica	SCE-1
Calentador de aire con tubos extendidos	CTE-1
Lavador de gases	LG-1
Disposición final del lodo	DFL-1
LÍNEAS DE CONDUCCIÓN	NOMENCLATURA
Línea de lodo húmedo	
Línea de lodo seco	
Línea de agua	
Línea de aire	
Línea de gases de cola	

Figura 10. Diagrama general del proceso de tratamiento integral de lodos de la PTAR Río Frío



4.7 ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PLANTA PROPUESTA

En esta sección, se obtendrá una estimación del monto total de inversión, el cual incluye los costos de capital total de inversión, costos de capital de valoración de la vida útil de los equipos y los costos anuales de operación y mantenimiento. Cabe anotar y resaltar, que los costos de los equipos empleados e instalaciones, son valores reales obtenidos con información de costos encontrados en sitios Web especializados, estos costos están basado en la moneda dólar (US\$), por ser de mayor confiabilidad y menor devaluación que la moneda nacional. En el anexo H, se describe la metodología para estimación de costos de inversión y costos anuales.

Tabla 26. Estimación del capital total de inversión de la Planta de Tratamiento de Lodos (PTL)

COSTO ITEM	FACTOR	COSTO FISICO
A. COSTO DIRECTO TOTAL DE LA PLANTA	CDTP	US\$
1. Costo Total de Adquisición de los Equipos	CTAE	
Costo total de equipos y auxiliares	CTE	391000
Instrumentación	0,30	117300
Impuestos de ventas	0,03	11730
Fletes	0,05	19550
		CTAE = 539580
2. Costo Directo de Instalación	CDI	
Instalación	0,30	161874
Cimientos y soportes	0,12	64750
Tuberías de procesos y accesorios	0,30	161874
Aislamiento	0,03	16187
Accesorios eléctricos	0,10	53958
Instalaciones auxiliares	0,40	215832
		CDI = 674475
3. Preparación del lugar y edificios	0,45	242811
		CDTP (1+2+3) 1456866
B. COSTO INDIRECTO TOTAL DE LA PLANTA	CITP	
4. Ingeniería	0,25	364217
5. Construcción y gastos de campo	0,35	509903
6. Puesta en marca	0,01	14569
7. Prueba de rendimiento	0,01	14569
		CITP = 903257
C. COSTO TOTAL DE LA PLANTA (CDTP + CITP)	CTP	CTP = 2360123
8. Honorarios del contratista	0,05	118006
9. Contingencias	0,10	236012
		(8+9) = 354018
D. CAPITAL TOTAL DE INVERSIÓN DE LA PTL		CTP+8+9 = 2714141

Tabla 27. Estimación del capital total anual para la Planta de lodos

COSTO ITEM	FACTOR	COSTO FISICO
A. COSTO DIRECTO ANUAL	CDA	US\$
1. Operación y Supervisión		
Operadores de la Planta	2,30 US\$/hora	14352
Supervisores	3,70 US\$/hora	1924
Jefe de Planta	5,50 US\$/hora	1430
		<u>17706</u>
2. Mantenimiento		
Mano de Obra y Materiales	0,05 (Costo Ins.)	78887
3. Servicios Industriales		
Energía Eléctrica	0,11 US\$/KW-h	11326
Agua de Lavado	0,34 US\$/m ³	15509
		<u>26834</u>
	CDA =	<u>123427</u>
B. COSTO INDIRECTO ANUAL	CIA	
4. Gastos Generales	0,60 (Ope. + Man.)	57956
5. Gastos Administrativos	0,02 (CTI)	54283
6. Impuestos de Propiedad	0,01 (CTI)	27141
7. Seguro	0,01 (CTI)	27141
	CIA =	<u>166521</u>
B. COSTO TOTAL ANUAL (CDA + CIA)	CTA =	<u>289948</u>

- **Análisis de resultados.** Como resultado de esta evaluación, se obtuvo que la alternativa seleccionada presenta un costo total de inversión de 3'004.089 US\$, es decir, 102.1 US\$/tonelada de lodo tratado anual, aproximadamente \$236361.5/ton. de lodo tratado anual. De este costo el 90.3% lo representa el capital total de inversión, repartidos de la siguiente manera: el 48.5% como el costo directo total, el 30% como el costo indirecto total y el 11.8% honorarios del contratista y contingencias.

Por otra parte, el 9.7% restante lo representa los costos totales anuales, el cual esta repartido de la siguiente forma: 4.1% como el costo directo anual y el 5.6% como el costo indirecto anual.

5. CONCLUSIONES

1. La Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga ha planificado un proyecto para la modificación y reconversión de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío, el cual considera dentro del nuevo esquema de tratamiento, una línea de lodos. Esto implicó evaluar la viabilidad técnica-económica para la reutilización de los lodos generados por la depuración de las aguas residuales. En este trabajo, se analizó una alternativa de tratamiento aplicable a lodos biológicos digeridos anaerobiamente, que están representados en un volumen de 80 m³/día, con una humedad promedio del 92%.
2. Del análisis de las ventajas y desventajas de las diferentes operaciones unitarias para el tratamiento integral de lodos biológicos, se seleccionó una línea de proceso, que básicamente considera una primera etapa de espesamiento mediante un espesador por gravedad, una segunda etapa de deshidratación mediante un filtro banda y finalmente una etapa de secado térmico mediante un secador rotatorio. Esta alternativa de sistema de tratamiento seleccionada, resultó ser la más viable técnica y económicamente, ya que para el manejo integral de lodos biológicos con fines aplicativos en la agricultura, se deben contemplar las etapas mencionadas anteriormente.
3. Una etapa de secado térmico resulta ser muy adecuado, ya que esta proporciona una serie de propiedades al lodo que hacen que su manejo, transporte y aplicación al suelo sea mucho más fácil y eficaz. Además, con el secado térmico de lodos se logra un gran porcentaje de eliminación de microorganismos patógenos presentes en este. Esto último fue

demostrado en el análisis microbiológico realizado al lodo biológico que fue sometido a pruebas de secado térmico en el Laboratorio. Esto crea un beneficio ambiental cuando se propone la aplicación de lodos biológicos como mejorador de suelos en zonas erosionadas y, además, le proporciona al lodo las características necesarias para que sea aceptado por el agricultor y valorado como la enmienda orgánica que es.

4. Como resultado de las tres operaciones unitarias, se obtuvo que en el espesador por gravedad la masa total de lodos biológicos crudo se redujo en aproximadamente un 33.39% de su peso, esto es 37.77 ton/día, mientras que en el filtro banda la masa de lodo se reduce en un 58.18% de su peso, aproximadamente 43.84 ton/día, y finalmente, en el secador rotatorio la masa total de lodo se redujo en un 69.56% de su peso, es decir, 21.92 ton/día.
5. Respecto a los resultados de estimación del monto total de inversión, se obtuvo que el costo total de inversión requerido para la alternativa seleccionada, es de 3'004.089 US\$. En otro sentido, el costo de tratamiento por tonelada de lodo tratado anual es de 102.1 US\$ (\$236361.5/ton año).

RECOMENDACIONES

1. Es necesario realizar pruebas piloto con cantidades más grandes de los lodos procedentes de los reactores, con el fin de evaluar los impactos del sistema en términos de efectos al aire, en la generación de emisiones de olores ofensivos y generación de polvo del mismo cuando este seco.
2. Igualmente, se hace necesario evaluar las propiedades fertilizantes de los lodos, y contenidos microbiológicos en grandes cantidades para verificar el cumplimiento clase A del lodo obtenido con pequeñas cantidades.
3. Evaluar también las tasas de aplicación de los contenidos como nitrógenos de requerimientos de arrea y evaluar, y realizar un registro de las áreas donde han sido aplicados para tener un control específico de la tasa de aplicación de cada uno de ellos.
4. Es importante dar un manejo adecuado a la corriente de aire que sale del secador rotatorio, pues esta arrastrará parte de los componentes odoríferos presentes en los lodos biológicos. En este mismo sentido, se debe realizar una evaluación más detallada de alternativas que conlleven a la minimización de estos componentes (Ej. Depuradores químicos húmedos, biofiltros, tanques de lodos activados, etc.).

BIBLIOGRAFIA

1. Anaerobic digestion in wastewater treatment, web site <http://www.scientecmatrix>.
2. CORTES, L. y GARCÍA, N. Desarrollo de un Proceso Térmico para la Estabilización de Lodos Provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2000. p. 76 – 90.
3. DE LORA, Federico y MIRO, Juan. Técnicas para la Defensa del Medio Ambiente. Volumen 2, Editorial Labor, Barcelona, 1978.
4. ESCOBAR, Milagro. Investigación, Tratamiento y Usos Alternativos de Lodos Producidos en Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales. Subdirección de Recursos Naturales, CDMB. 1999.
5. HERRERA, A. A. Eliminación de Lodos de una EDAR. Tesis de Maestría. Universidad de Madrid. 2003.
6. <http://www.cdmb.gov.co>
7. IMHOFF et al., “Taschenbuch der Stadtentwässerung” Oldenbourg Verlag, München (1993).
8. JIMÉNEZ, Blanca. “Producción de Biosólidos y su Reúso como Mejoradotes de Suelos”. Memorias en: Seminario Internacional, Reúso y mercadeo de los Subproductos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Efluentes, lodos y Biogás.

9. JOHANNSEN, A. Plotting Psychrometric Charts by Computer. En: The South African Mechanical Engineer, vol 32, Julio de 1982.
10. KNIGHT PIESOLD S. A. Caracterización, reutilización, tratamiento y disposición final de lodos provenientes de plantas de tratamientos, para la elaboración de una propuesta de norma técnica de manejo, elaborado para CONAMA, Agosto 1998.
11. MAHAMUD LÓPEZ, Manuel et al. BIOSOLIDOS GENERADOS EN LA DEPURACION DE AGUA PARTE I Y PARTE II. Ingeniería del Agua Volumen 3 Numero 2 Junio 1996.
12. McCABE, W; SMITH, J y HARRIOTT, P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 4ª edición, España, McGraw-Hill, 1991. p. 850 – 852.
13. MENESES, Alexander. Propuesta Técnica: Proyecto de Transferencia de Tecnología para la Valorización del Biogás y Control de Emisiones en la PTAR “Río Frío”. 2002.
14. METCALF & EDDY. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. 3ª edición, México, McGraw-Hill, 1995, Vol. I y II. p. 418 – 420, 871-873, 881-882.
15. MORENO, Wilson. Tratamiento y disposición de los sólidos procedentes de la recuperación de las aguas residuales. Tesis de la Escuela de Postgrado en Química UIS. Bucaramanga .1996
16. PERRY, Robert H y GREEN, D. Manual del Ingeniero químico. Séptima edición. Volumen III, section 18. España: McGraw-Hill, 2001. p. 18-80.

17. Revista Residuos, España, Meses Julio a Agosto, 1995.
18. ROMERO, Jairo A. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. p. 696–702, 233-246, 758-759, 775-778.
19. TREYBAL, R. E. Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición. México: McGraw Hill Interamericana, 1988. p. 766.
20. United States Environmental Protection Agency (E.P.A.), Solid Waste and Emergency Response : “Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States”, Journal WPCF, Office of Solid Waste, EPA530-R-99-009, September 1989.
21. -----: Municipal Technology Branch, “25 Page Summary of The Standars for Use or Disposal of Sewage Sludge 40 CFR Part 503 (58 Fr 32:9248-9415)”, Office of Wasterwater Enforcement & compliance”, 1993.
22. -----: Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal. EPA 625/1-79-011, 1979.
23. WALAS, S. Chemical Process Equipment: Selection and Design. Edit. USA: Butterworth – Heinemann series in Chemical Engineering. 1990. p. 247 - 260.

ANEXO A

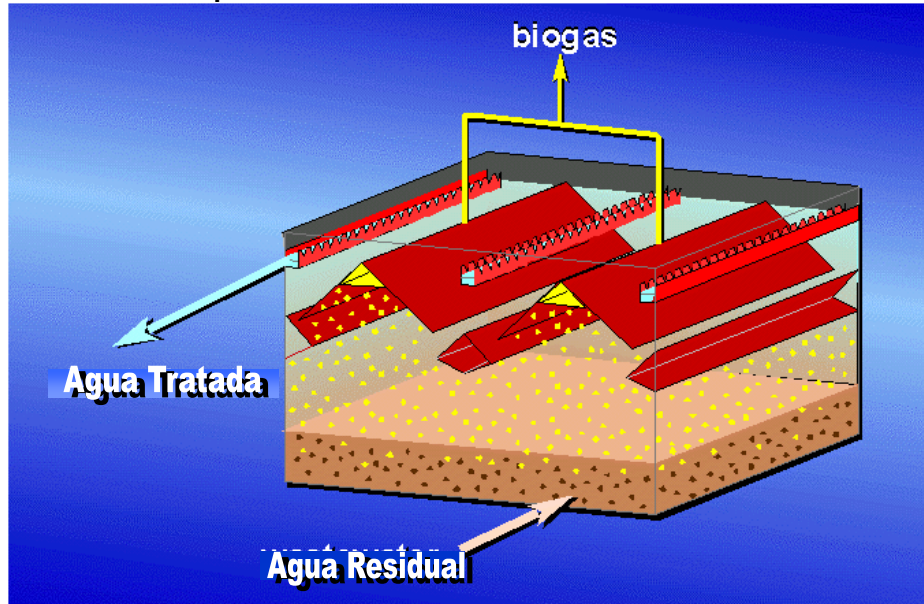
OPERACIONES UNITARIAS EN LA PTAR RÍO FRÍO

1. Tratamiento preliminar. Los dispositivos de pretratamiento se encuentran en toda ptar, cualquiera que sea el tipo de tratamiento adoptado. El objetivo es eliminar elementos sólidos y partículas, las más gruesas, capaces de interferir o causar daño a los equipos y/o unidades de tratamiento posterior. El tratamiento preliminar o pretratamiento de la PTAR “Río Frío” está constituido por tres sistemas: rejillado grueso, rejillado fino y desarenado. Tanto en el rejillado grueso como en el fino, se hace pasar el agua residual a través de rejillas abertura de 6 cm. y 6 mm. respectivamente, donde quedan retenidos todo tipo de sólidos gruesos. Luego de una limpieza mecánica y manual de las rejillas, el material rejillado (principalmente desechos y basura doméstica) es evacuado y enviado hacia un relleno sanitario. El pretatamiento es complementado en tres desarenadores, cuyo diseño permite la decantación eficaz de las arenas y partículas presentes en las aguas residuales.

2. Tratamiento primario: Reactores UASB. Luego del tratamiento preliminar, en el agua permanece la carga contaminante más difícil de remover, representada por material disuelto y material en suspensión, esencialmente de naturaleza orgánica. El objetivo del tratamiento primario es por consiguiente la máxima remoción de ésta carga. En el caso de la PTAR Río Frío, el sistema de tratamiento primario adoptado, es un proceso biológico anaerobio, cuya unidad principal son los reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Reactor anaerobio de flujo ascendente en manto de lodos (figura 11). En este tipo de reactor el agua es introducida por el fondo del reactor a través de unas boquillas uniformemente distribuidas, pasa

a través de un manto de lodos y posee una estructura de sedimentación integrada al mismo tanque que permite el retorno de los lodos al espacio de reacción.

Figura 11. Tratamiento primario: reactores UASB



Tomado de Anaerobic digestion in wastewater treatment, sitio Web: www.scientecmatrix.com

En este reactor, la materia orgánica contenida en las aguas residuales, se degrada por la acción de consorcios microbianos que se adaptan a condiciones favorables de temperatura y disponibilidad de nutrientes, en las cuales pueden sustentar sus necesidades metabólicas a través del rompimiento enzimático de las moléculas orgánicas mediante cuatro reacciones de degradación, siendo la más importante la de formación de metano (biogás), principal subproducto del proceso biológico anaerobio. A medida que el proceso transcurre, la comunidad bacteriana crece y se agrupa formando "flocs" que se depositan en la parte inferior del reactor, dando lugar al llamado "manto de lodos", responsable del proceso de biodegradación.

En la parte superior se encuentra el sistema de separación gas-sólido-líquido (separador GSL), constituido de mamparas deflectoras y campanas, que separan y descargan el biogás generado, previene el lavado de la biomasa activa (lodo floculento y lodo granular flotante) y sirven como barrera de expansión del lecho de lodo por aumento de cargas orgánicas.

La entrada del afluente debe ser uniforme y la velocidad ascendente del flujo la adecuada, para permitir la expansión del lecho de lodos, sin llegar al lavado de la biomasa, contribuyendo a un contacto apropiado de los microorganismos con toda la materia orgánica, es decir evitando la formación de zonas muertas o inactivas dentro del reactor.

3. Tratamiento secundario. En el tratamiento primario se logra una remoción de casi el 70% de la carga orgánica contaminante. Con el fin de aumentar la remoción al 85% en DBO, el agua se conduce hacia unos estanques conocidos como lagunas facultativas, con el objetivo de remover la materia orgánica soluble que escapa del tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de materia en suspensión. El solo tratamiento en un reactor UASB, podría servir como tratamiento compacto y eficiente, pero las condiciones de las aguas residuales domésticas de la ciudad de Bucaramanga necesitan un grado de tratamiento superior. El post-tratamiento con la laguna facultativa permite una sedimentación de sólidos arrastrados, una oxigenación del efluente y un aumento en la remoción de la carga orgánica.

Con este tratamiento, se logra una remoción adicional del 10 al 15% y se consolida una remoción total cercana al 85%, límite establecido por la norma ambiental de vertimiento

ANEXO B

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LOS LODOS

1. Contenido orgánico. El contenido orgánico presente en los lodos se expresa generalmente, como el porcentaje que representan los sólidos volátiles, removidos tras someter al lodo a una temperatura de 550°C, bajo condiciones de oxidación.

La determinación del contenido orgánico es importante para determinar su valor térmico, su potencial olor y para la utilización como mejorador de suelos.

2. Nutrientes. Los lodos provenientes de aguas residuales domésticas contienen tres nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Los nutrientes contenidos en los lodos pueden estar en diversas formas químicas. Por ejemplo, el nitrógeno contenido en los lodos pueden estar como nitratos, amonio o nitrógeno orgánico y el fósforo, por su parte, puede estar presente como ion fosfato y orto fosfato.

Sin embargo, los niveles de NPK presentes en los lodos estabilizados son inferiores a los contenidos en fertilizantes químicos como se indica en la tabla 28. Además, las plantas aprovechan los nutrientes que se encuentran en el suelo en forma mineralizada, con lo cual el valor fertilizante atribuible a los lodos estabilizados es aún menor.

Tabla 28. Comparación entre los niveles de nutrientes de los fertilizantes y el lodo proveniente de aguas residuales

COMPUESTO	NIVEL PORCENTUAL DE NUTRIENTES %		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizante	5.0	10.0	10.0
Lodo	3.3	2.3	0.3

Tomado de Metcalf & Eddy³³

3. Concentración de patógenos. Es importante el contenido de los organismos patógenos de los lodos, debido a que es una de las principales características para la limitación de su uso por ser estos transmisores de enfermedades. Todos los lodos crudos o no estabilizados son portadores de virus, bacterias y agentes patógenos que pueden causar enfermedades. El tratamiento puede reducir pero no eliminar completamente tales portadores.

Entre las bacterias patógenas que pueden estar presentes en los lodos se encuentran, por ejemplo, las *Salmonellas Typhi* (que produce fiebre tifoidea), *Eschericha coli* (que produce gastroenteritis), *Shigellas* (que produce disenteria), las *Vibrio Cholerae* (que producen diarreas extremadamente fuertes o cólera), etc. Entre los protozoos se encuentran la *Cryptosporidium* y la *Balantidium Coli* (que producen diarrea); y también se pueden encontrar tenias y lombrices intestinales. Entre los virus encontrados en los lodos frescos están los causantes de la hepatitis A y de la poliomielitis.

Los patógenos son difíciles de cuantificar, debiendo manejar indicadores que permitan estimar su reducción, como por ejemplo, los coliformes fecales. En la tabla 29 se indican niveles promedio de indicadores patógenos encontrados en un lodo mezclado (lodo primario más lodo biológico) no estabilizado. En la tabla 30 se indican valores referenciales manejados por la

³³ Ibid., p. 872.

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) de niveles de concentración típicos de patógenos en lodo no estabilizado y digerido anaeróticamente.

Tabla 29. Algunos niveles de indicadores patógenos para lodos mezclados

AGENTE	RANGO (Nº/g masa seca)	NIVEL PROMEDIO (Nº/g masa seca)
Coliformes totales	$1.1 \times 10^1 - 3.4 \times 10^9$	6.4×10^8
Coniformes fecales	ND - 6.8×10^8	9.5×10^6
Estreptococos fecales	$1.4 \times 10^4 - 4.8 \times 10^8$	2.1×10^6
Salmonella sp	ND - 1.7×10^7	7.9×10^2
Shigella sp.	ND	ND
Pseudomonas aeruginosa	$1.5 \times 10^1 - 9.4 \times 10^4$	5.7×10^3
Virus entérico	$5.9 - 9.0 \times 10^3$	3.6×10^2
Huevos/quistes parásitos	de ND - 1.4×10^3	1.3×10^2

Nota: ND: No disponible
Tomado de Knight Piesold S.A.³⁴

Tabla 30. Niveles de concentración típicos de patógenos en lodo no estabilizado y digerido anaeróticamente.

PATOGÉNO	LODO NO ESTABILIZADO (NMP/100 ml)	LODO DIGERIDO ANAEROBICAMENTE (NMP/100 ml)
Virus	2500 - 70000	100 - 1000
Coliformes fecales	1 000.000.000	30000 - 6 .000.000
Salmonella sp	8000	3 - 62
Ascaris Lumbricoides	200 - 1000	0 - 1000

Tomado de EPA 625/10-84-003, 1989³⁵

4. Metales. Los lodos pueden contener cierta concentración de metales pesados e iones orgánicos que son función del tipo y cantidad del residuo industrial descargado en el sistema de tratamiento de aguas residuales.

³⁴ KNIGHT PIESOLD S. A, Op. cit.,

³⁵ United States Environmental Protection Agency (E.P.A.), Solid Waste and Emergency Response : "Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States", Journal WPCF, Office of Solid Waste, EPA530-R-99-009, September 1989.

En un lodo, es posible encontrar metales como boro, cadmio, cromo, plomo, níquel, mercurio, plata y zinc. Algunos de estos elementos son micronutrientes esenciales requeridos por plantas y animales lo cuales a bajas concentraciones constituyen un aporte nutritivo al suelo, sin embargo, a altas concentraciones pueden ser tóxicos. En la tabla 31 se indican algunos valores referenciales típicos del contenido de metales pesados en lodos crudos manejados la USEPA. Además se incluye el contenido de metales pesados máximo permitido por la EPA (A 40 CFR Part 503).

Tabla 31. Contenido Típico de Metales pesados en lodos Frescos

METAL	CONCENTRACIONES EN LODOS SECO (mg/kg)		
	Intervalo ¹	Promedio ¹	Norma E.P.A. ²
Arsénico	1.1 - 230	10	75
Cadmio	1 - 3410	10	85
Cromo	10 - 99000	500	3000
Cobalto	1.3 - 2490	30	-
Cobre	84 - 17000	800	4300
Hierro	1000 - 154000	17000	-
Plomo	13 - 26000	500	840
Manganeso	32 - 9870	260	-
Mercurio	0.6 – 5.6	6	57
Molibdeno	0.1 - 214	4	75
Níquel	2 – 5300	80	420
Selenio	1.7 – 17.2	5	100
Estaño	2.6 - 329	14	-
Zinc	101 - 49000	1700	7500

¹ Tomado de Metcalf & Eddy³⁶

² Tomado de E.P.A 40 CFR Part 503³⁷

³⁶ METCALF & EDDY, Op. cit., p. 873.

5. Químicos orgánicos tóxicos. El lodo generado en una planta de tratamiento de aguas residuales, puede contener sustancias químicas orgánicas sintéticas aportadas por los efluentes industriales, productos químicos utilizados en el hogar y pesticidas.

En el caso de las aguas residuales tratadas actualmente por la PTAR Río Frío, la mayoría de los lodos contiene bajos niveles de estas sustancias, lo que reduce el riesgo de alterar la salud humana y el medio ambiente.

Tabla 32. Clase de biosólidos y sus características

TIPO DE BIOSÓLIDO	CARACTERÍSTICAS
Clase A	<ul style="list-style-type: none"> ● Salmonella sp: menor a 3 organismos por 4 grs de sólidos secos totales ● Virus entérico: menor a 1 organismo por 4 grs. de sólidos secos totales ● Huevos de helmintos: menor a 1 huevo viable por 4 grs sólido seco. ● Densidad de Coliformes Fecales 1000 NMP/grs de sólidos secos.
Clase B	Presentan una reducción adecuada de la densidad de patógenos Las Coliformes Fecales de tener valores menores de 2.000.000 NMP/grs de sólidos totales en base seca.
EQ	Los biosólidos de Calidad Excepcional (Exceptional Quality EQ) tienen concentraciones bajas de químicos contaminantes, especificaciones microbiológicas Clase A y bajo potencial de atraer organismos vectores. No tienen restricciones de ninguna clase.
PC	Los Biosólidos de Concentración de Contaminante(Pollutant Concentration Biosolds PC), Estos biosólidos tienen concentraciones por debajo de los límites de contaminantes, iguales que los EQ, pero cumplen con calidades microbiológicas de Clase B. Deben estar sujetos requerimientos generales y prácticas de manejo, pero no deben tener una estadística de los niveles de contaminantes aplicados al suelo
CPLR	Biosólidos con Rata de Aplicación por Acumulación de Contaminantes(Cumulative Pollutant Loading Rate Biosolds CPLR), estos biosólidos sobrepasan las concentraciones que tienen los biosólidos clasificados como EQ y PC, pero cumplen los límites establecidos de concentración, los biosólidos clasificados en esta clase, deben tener monitoreados para no exceder la rata de aplicación.
APLR	Biosólidos con Rata de Aplicación Anual de Contaminantes (Annual Pollutant Loagding Rate, APLR): igualmente, estos biosólidos exceden las concertaciones que tienen los biosólidos EQ y PC, pero cumplen los límites máximos de concentración establecidos. Pero deben cumplir la rata de aplicación anual además de tener especificada la cantidad de aplicación y uso correcto.

³⁷ Municipal Technology Branch, "25 Page Summary of The Standars for Use or Disposal of Sewage Sludge 40 CFR Part 503 (58 Fr 32:9248-9415)", Office of Wasterwater Enforcement & compliance", 1993.

ANEXO C

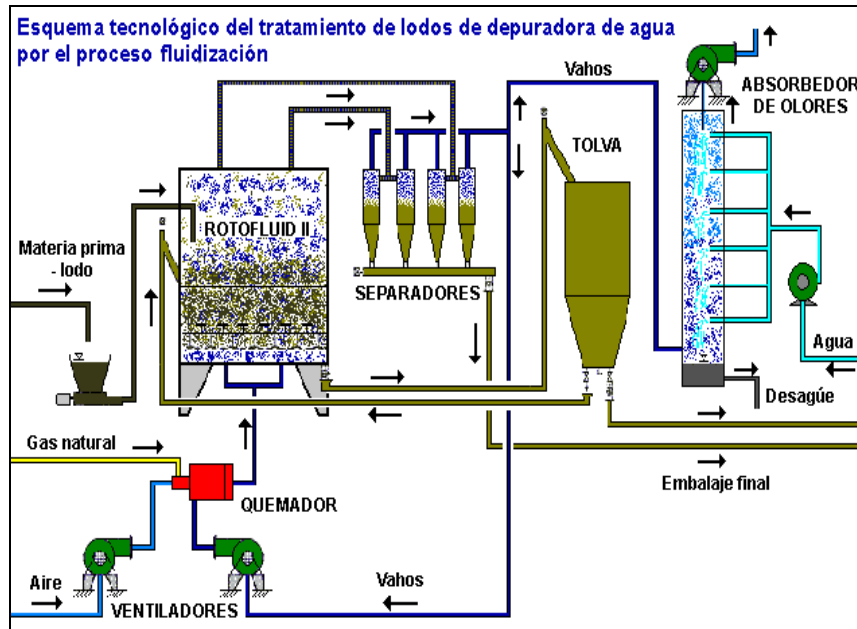
TECNOLOGÍAS COMERCIALES PARA EL SECADO TÉRMICO DE LODOS

1. Secador de pisos múltiples. Se considera como un secador por calor y como un incinerador. Consta de un cilindro vertical recubierto internamente con material refractario que contiene una serie de 4 o más pisos, uno por encima del otro, los lodos parcialmente deshidratados alimentan al piso superior y se secan por los gases calientes que llegan de los pisos inferiores. Estos lodos se hacen bajar al piso inferior por medio de cepillos rotatorios hasta obtener tal grado de sequedad que entran en ignición y se consumen.

2. Secador instantáneo. La torta de lodos se mezcla con lodos previamente secados y pasa por un molino de martillos, donde las partículas de lodos se secan, estas partículas se mantienen en suspensión en una corriente de gases calientes. Las partículas de lodo pasan a un separador donde el lodo seco es separado de los gases cargados de humedad. Este tipo de lodo se puede quemar o usar como fertilizante.

3. El proceso de fluidización del Rotofluid. Este proceso (ver figura 12) consiste en la introducción del aire caliente u otro gas por la parte inferior del roto fluidizador, de manera que el sólido se expande y el sistema se comporta como un líquido cuyo flujo es pistón. El proceso es continuo y permite la regulación del tiempo de residencia del material en el equipo. El roto fluidizador es un sistema de cámaras rotativas verticales de forma cilíndrica o cónica. El proceso contiene además un sistema de recuperación de sólidos y de control de olores. Es un proceso patentado y el diseño de los equipos depende del tamaño.

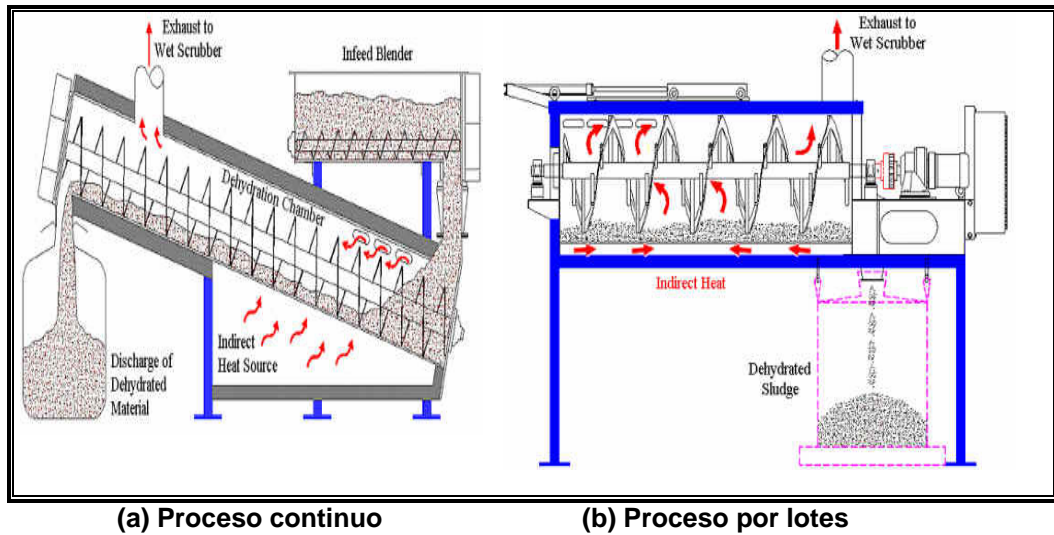
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de fluidización del Rotofluid



4. El sistema Bojner System. El sistema de secado indirecto de lodos consiste en introducir los lodos que deben estar deshidratados mecánicamente dentro de una cámara de secado, en la cual gases de combustión realizan el secado del lodo. Los gases de combustión son producidos en un generador alterno que puede estar alimentado por biogás producido de la estabilización o por cualquier combustible. Los olores son controlados por medio de scrubbers. Ver figura 13.

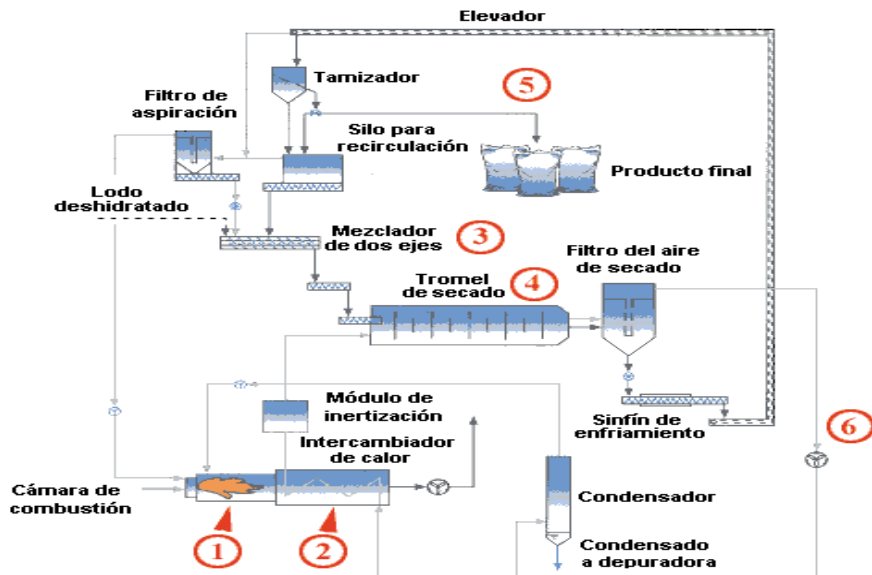
El producto son sólidos secos granulados al 95%, con recuperación de calor en el condensado del agua que puede ser utilizado en otros procesos de la planta, como en la estabilización.

Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de Deshidratación Térmica ACS



6. El proceso de secado térmico de swiss combi. Es un proceso de secado indirecto que utiliza los gases de combustión para calentar en un intercambiador de calor aire que posteriormente es utilizado para secar el lodo en una cámara de (tromel de secado) con un solo paso, donde el aire caliente evapora el agua del lodo, y luego el aire es filtrado y es enviado nuevamente al intercambiador. El lodo seco se separa y pasa a un sistema de cribado para su empaclado. Ver figura 15.

Figura 15. Diagrama de flujo del proceso de Secado Térmico de Swiss Combi.

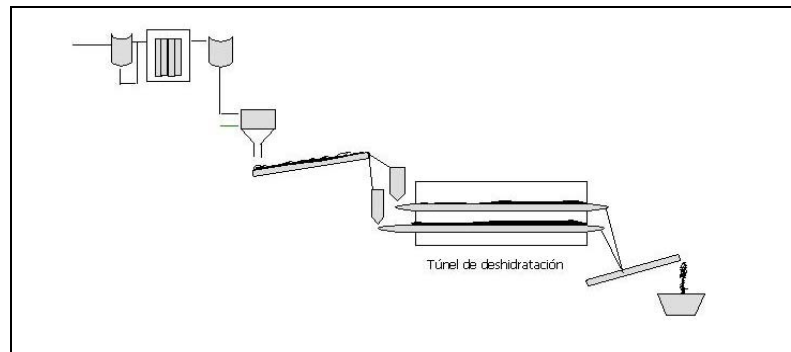


7. El sistema de secado térmico a baja temperatura STC. Este sistema consiste en hacer pasar el lodo previamente deshidratado por medio de una cinta transportadora a través de un túnel de secado, en la cual se hace pasar aire caliente a una temperatura de 70 °C. El aire es recirculado y utiliza la tecnología de Bomba de Calor para condensar el agua y calentar el aire. No existen emisiones al ambiente, ni generación de polvo. Ver figura 16.

La humedad obtenida con este sistema es inferior al 10%. La operación es continua y el sistema de alimentación y descarga es automático. Además, el sistema es manejado por un PLC y puede tener sistemas de cogeneración.³⁸

³⁸ PERMUY, Diana, Op. cit., pág. 23 -27.

Figura 16. Diagrama del proceso del Sistema STC



8. Secador Rotatorio. Consiste en un cilindro tubular (carcaza de 0.75 m a 3.5 m de diámetro) relativamente largo (hasta 9 m), dispuesto en forma horizontal o ligeramente inclinado hacia la salida. Al girar la carcaza (velocidad de giro entre 1 y 15 rpm), unas pestañas (aspas) levantan los sólidos para caer después en forma de lluvia a través del interior de la carcaza. La alimentación entra por un extremo del cilindro el producto seco descarga por el otro.³⁹

Los secadores rotatorios (figura 17) se calientan por contacto directo del gas con los sólidos, por gas caliente que pasa a través de un encamisado externo, o por medio de vapor de agua que condensa en un conjunto de tubos instalados sobre la superficie interior de la carcaza. El calentamiento de los gases se realiza a través de quemadores directos y se pueden adaptar al tipo de combustible disponible, también puede emplearse los gases de combustión de un sistema de cogeneración eléctrica, el control de temperatura se realiza con visualizadores digitales. Es necesario, que sean complementados con lavadores de gases y ciclones para el cumplimiento de

³⁹ McCABE, W; SMITH, J y HARRIOTT, P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 4ª edición, España, McGraw-Hill, 1991. p. 850 – 852.

las normas ambientales, ya que los gases de salida arrastran cantidades de material fino.

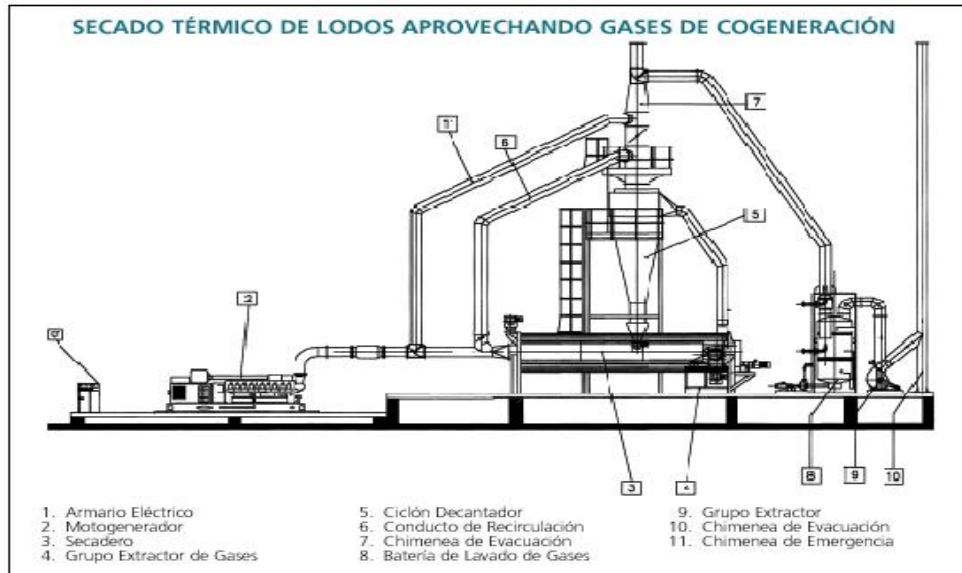
Figura 17. Secador rotatorio con aire caliente en contracorriente



9. Secado de lodos por cogeneración sistema cis engineering. Este sistema (figura 18) presenta un secador tubular, por medio de toberas y fluidificación, la energía necesaria para el secado es obtenida de gases calientes provenientes de la cámara de combustión, o gases de combustión de otras actividades, y también permite utilizar aire calentado por intercambiador. Así mismo, si hay disponibilidad emplea biogás proveniente de digestión anaerobia para su combustión en los motogeneradores.

Posee sistema de recirculación de los gases de secado, para rendimiento térmico y presenta un sistema de limpieza de gases para evitar la generación de olores, Tiene rendimientos inferiores que permiten obtener una humedad del 20 % de humedad en el producto final.

Figura 18. Secado térmico de lodos aprovechando gases de cogeneración



ANEXO D

CARACTERIZACIÓN DEL LODO HÚMEDO DE LA PTAR RÍO FRÍO

1. Características físicas. Entre las características físicas más importantes se encuentran el contenido de humedad y la densidad aparente.

- **Contenido de humedad.** La humedad se determina desecando en estufa a 105 °C una muestra previamente pesada, durante 5 horas o más, dejándola enfriar en un desecador y luego volviéndola a pesar.⁴⁰

En la tabla 33 se muestra el seguimiento típico de secado hecho a una muestra de lodo tomada a 1.5 m de altura, con el fin de determinar su humedad.

Tabla 33. Ejemplo de seguimiento de secado

TIEMPO (HORAS)	PESO (g)
0	71.28
1	69.48
2	53.84
3	43.86
4	29.51
5	19.05
6	8.00
7	6.53
8	6.40
9	6.35
10	6.34

$$\% \text{Humedad BH} = \frac{71.28 - 6.34}{71.28} * 100 = 91.10\%$$

⁴⁰ GARCÍA ARENAS, Jaime. Química Analítica Cuantitativa. Universidad Industrial de Santander. Colombia, 1964. Pág. 100.

La humedad encontrada en las muestras de lodos se resumen en la tabla 34.

Tabla 34. Contenido de humedad de las muestras de lodos

ALTURA (m)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)
0.50	49.35	6.34	87.15
1.00	47.45	5.58	88.31
1.50	49.55	4.17	91.60

Puede notarse que la variación del porcentaje de humedad del lodo es directamente proporcional a la altura del reactor a que fue tomada la muestra, lo cual indica que a menores alturas (mayor profundidad) hay mayor presión (ejercida por la columna de agua y lodo) por lo cual hay mayor cantidad de lodo por unidad de volumen.

Con base en la mayor humedad se escogió el lodo tomado a 1.50 m de altura para el diseño de los equipos de proceso para el secado de los lodos.

- **Densidad.** La densidad aparente de cada una de las muestras se relacionan en la tabla 35.

Tabla 35. Ejemplo de seguimiento de secado

ALTURA (m)	DENSIDAD (Kg/m ³)
0.50	1030
1.00	1020
1.50	1010

La densidad varía directamente proporcional con la profundidad del reactor por la misma razón expuesta en el caso de la humedad.

2. Características químicas. Muchos de los constituyentes químicos, incluidos los nutrientes de los lodos, son importantes desde el punto de vista de la evacuación final del lodo y del líquido separado del mismo durante los

procesos de tratamiento. El contenido de nutrientes y metales pesados son las características principales, las cuales se describirán a continuación.

- **Contenido de nutrientes.** El valor fertilizante de un lodo, se debe evaluar siempre que se vaya a utilizar el mismo como acondicionador del suelo, este se basa principalmente, en el contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). La tabla 36 presenta los valores obtenidos de la caracterización realizada a muestras de lodo líquido de la PTAR Río Frío.

Tabla 36. Análisis de fertilidad de los lodos al momento de la purga

PARÁMETROS	VALOR PROMEDIO
pH	6.3
Materia Orgánica, (%)	38.8
NT, (%)	1.56
REL C/N	14.4:1
P, (ppm)	300
Ca, (meq/100 g)	18.7
Mg, (meq/100 g)	4.1
K, (meq/100 g)	0.8
Al, (meq/100 g)	0.0
Cu, (ppm)	2.4
Zn, (ppm)	81.8
Fe, (ppm)	175
Mn, (ppm)	32.5
B, (ppm)	2.8

Tomado de Escobar Milagro⁴¹

- **Contenido de metales pesados.** Los metales pesados encontrados en lodos producidos en PTAR's, pueden ser tóxico si se encuentran en altas

⁴¹ ESCOBAR, Milagro. Investigación, Tratamiento y Usos Alternativos de Lodos Producidos en Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales. Subdirección de Recursos Naturales, CDMB. 1999.

concentraciones. En la tabla 37 se reportan los valores promedios del contenido de metales pesado en los lodos líquidos de la PTAR Río Frío.

Tabla 37. Análisis de metales pesados de los lodos al momento de la purga

METALES PESADOS	VALOR PROMEDIO (ppm)
Pb	277
Ag	13
Cr	109
Hg	8.1
Mn	119
Zn	1360
Cu	166

Tomado de Escobar Milagro⁴²

3. Características microbiológicas. En cuanto a la composición microbiológica de los lodos biológicos líquidos de la Planta, se encontraron microorganismo que sobrepasan los límites permisible por la norma 40 CFR Parte 503, de la US-EPA. Los resultados obtenidos de las muestras caracterizadas, se presentan en la tabla 38.

Tabla 38. Análisis microbiológico de los lodos al momento de la purga

ORGANISMO PATÓGENO	MUESTRA LÍQUIDA
Coliformes totales, NMP/g	Mayor de 240.000
Coliformes fecales, NMP/g	Mayor de 240.000
Pseudomonas	Positiva
Streptococcus	Positiva
Salmonella	Positiva
Helmintos	Huevos de uninaria

Tomado de Escobar Milagro

⁴² Ibid.,

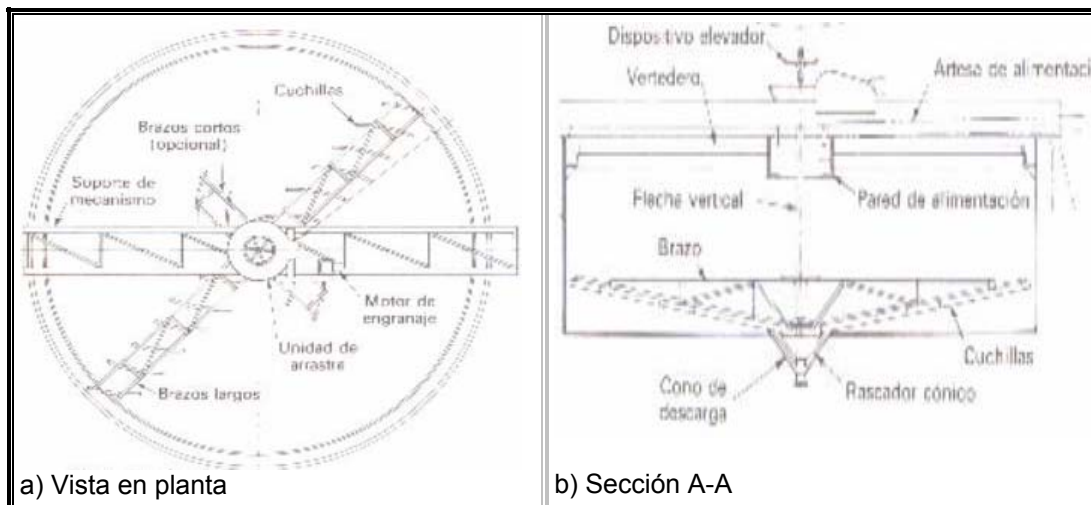
ANEXO E

DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE PROCESOS DE LA PTL Y ECUACIONES DE DISEÑO

1. ESPESADOR POR GRAVEDAD.

- **Descripción del equipo y proceso.** El espesado por gravedad se lleva a cabo en un tanque de diseño similar al de un tanque de sedimentación convencional. Un espesador por gravedad (figura 19), es un equipo mecánico que tiene generalmente forma circular, con profundidades de 2 a 5 m y diámetro de 3 a 30 m, para prevenir problemas de gasificación y flotación debidos al incremento en el tiempo de retención y a la actividad anóxica resultante. Se usan pendientes del piso entre 1:4 y 1:8 (12.5 a 25%), para profundizar el manto de lodos en el área central, permitir menor tiempo de retención y maximizar la profundidad del lodo sobre la tubería de extracción.⁴³

Figura 19. Espesador por gravedad con mecanismo soportado por puente



⁴³ ROMERO, Op. cit., p. 783.

Un espesador por gravedad tiene varios componentes básicos: un tanque para contener la suspensión, la tubería de alimentación y un pozo de alimentación central para permitir a la corriente de alimentación entrar en el tanque, un mecanismo de rastrillos para llevar los sólidos concentrados a los puntos de extracción, un sistema de extracción de sólidos del efluente inferior y un lavador del efluente superior. Además utilizan desnatadores para remover espumas y material flotante.⁴⁴

Básicamente en el proceso el lodo diluido se conduce al pozo de alimentación central. El lodo alimentado sedimenta y compacta, y el lodo espesado se extrae por la parte inferior del tanque. Los mecanismos de rastrillos remueven el lodo lentamente, promoviendo la apertura de canales para proporcionar salida al agua y favorecer la densificación. El sobrenadante que se origina, se puede enviar a las lagunas facultativas. Para prevenir problemas de limpieza de la tubería de lodos, porque las pérdidas de energía son altas, se debe proveer una longitud de succión de lodos lo más corta posible, velocidades de flujo de 1 a 2 m/s y, si es el caso, se deben diseñar dos tuberías de extracción de lodos.⁴⁵ El lodo espesado que se recoge en el fondo del tanque es bombeado al filtro banda.

- **Parámetros de diseño.** El espesador se diseña con base en una concentración específica esperada del lodo espesado, una carga másica superficial determinada y una carga de rebose de 16 a 32 m/d para lodos primarios y de 2 a 8 m/d para lodos secundarios. Sin embargo, la carga hidráulica no debe ser excesivamente baja porque se pueden tener condiciones sépticas, olores y lodo flotante.⁴⁶ La tabla 39 reporta los valores

⁴⁴ PERRY y GREEN, Op. cit., p.18-80.

⁴⁵ METCALF & EDDY, Op. cit., p. 907.

⁴⁶ ROMERO, Op. cit., p. 780 -784.

típicos de carga másica para espesadores por gravedad de algunos tipos de lodo.

Tabla 39. Carga másica para espesadores por gravedad

Tipo de lodo	Concentración de sólidos del lodo aplicado, %	Concentración esperada de sólidos del lodo espesado, %	Carga superficial de sólidos (CSS), kg/m ² d
Lodo primario	2 – 7	5 – 10	100 – 150
Lodo activado	0.5 - 1.5	2 – 3	20 – 40
Digerido anaerobiamente	8	12	120

Adaptado de Romero⁴⁷

- **Determinación del diámetro del espesador.** Los espesadores generalmente tienen diámetros de 3 a 30 mts. Este se determina calculando el área circular de la sección transversal requerida. El área se calcula por medio de la relación de la carga másica de lodo seco y la carga superficial de sólidos para espesar por gravedad un lodo digerido anaerobiamente (valor reportado en la tabla 39).

$$A_{\text{circular}} = \frac{\dot{m}_{\text{ls}}}{\text{CSS}} \quad (1)$$

Donde, A_{circular} = área circular del espesador, m²

\dot{m}_{ls} = caudal másico del lodo seco en el afluente, kg/d

CSS = carga superficial de sólidos (CSS) para lodo anaerobio, kg/m²d (tabla 20)

El diámetro del espesador puede ser calculado del área circular de la sección transversal del mismo, por:

⁴⁷ Ibid., p. 782.

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_{\text{circular}}} \quad (2)$$

• **Determinación del volumen del espesador.** El volumen se calcula suponiendo una profundidad del tanque del espesador. Las profundidades de los espesadores por gravedad generalmente se encuentran entre los 2 y 5 m.⁴⁸ El volumen esta dado por:

$$V = A_{\text{circular}} * \text{Profundidad} \quad (3)$$

Donde, V = volumen del espesador, m³

Profundidad = para nuestro caso se escogerá una profundidad de 2 m

• **Determinación de la carga de rebose.** Con el fin de comprobar que la carga superficial de rebose se encuentra en el rango de 2 a 8 m/d, para lodos anaerobios, se calcula la carga mediante la relación del flujo volumétrico del lodo húmedo y el área circular del espesador.

El flujo volumétrico del lodo húmedo esta dado por:

$$FV = \frac{\dot{m}_{\text{ls}}}{(C_{\text{SA}} / 100) \cdot (\rho_{\text{LA}})} \quad (4)$$

y, la carga superficial de rebose la obtenemos por:

$$CSR = \frac{FV}{A_{\text{circular}}} \quad (5)$$

⁴⁸ ROMERO, Op. cit., p. 783.

Siendo, FV = flujo volumétrico del lodo, m³/d

C_{SA} = concentración de sólidos en el afluente, en %

ρ_{LA} = densidad del lodo en el afluente, kg/m³

CSR = carga superficial de rebose, m/d

- **Determinación del tiempo de retención hidráulico.** La relación del volumen del espesador y el flujo volumétrico del lodo, nos da el tiempo de retención. Este tiempo se representa mediante la siguiente expresión.

$$\theta = \frac{V}{FV} \quad (6)$$

Donde, θ = tiempo de retención hidráulico, días

2. FILTRO BANDA.

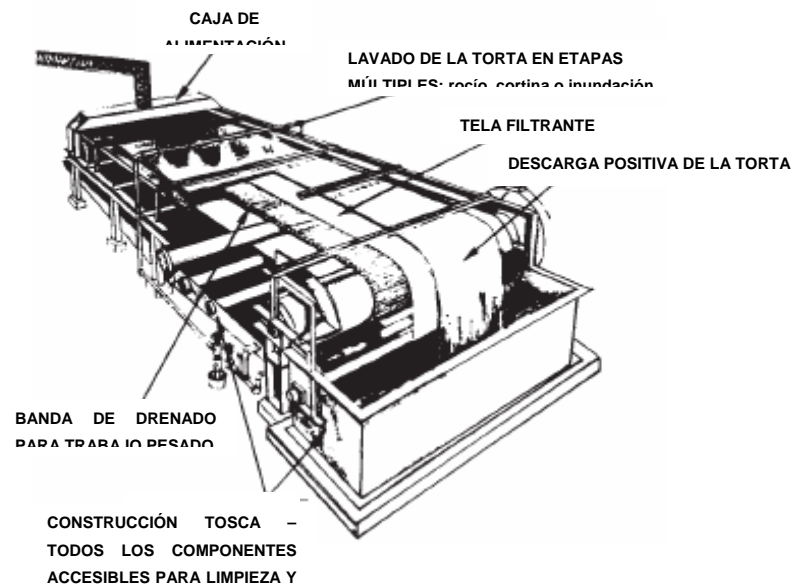
- **Descripción del equipo y proceso.** El filtro de banda horizontal que se muestra en la figura 20 es uno de los diferentes tipos de filtros horizontales que existen; consta de una banda perforada o ranurada elástica, que opera como un transportador de banda y lleva encima una banda de tela filtrante. Las dos bandas están apoyadas en una plataforma lubricada. Una plancha a vacío, alineada con las ranuras de la banda elástica, forma una superficie continua a vacío que puede incluir múltiples zonas para la formación de la torta, el lavado y la eliminación final del agua.⁴⁹

En el mercado se dispone de filtros banda de diferentes dimensiones, con anchuras de banda variables entre 0.5 y 3.5 m. Las bandas de 2 m de ancho son las más comúnmente empleadas para el tratamiento de lodos de aguas

⁴⁹ PERRY y GREEN, Op. cit., p.18-124.

residuales municipales. Las cargas de aplicación de lodo varían entre 90 y 680 kg/m.h, dependiendo del tipo del lodo y de la concentración del lodo alimentado. La extracción de agua, basada en la anchura de la banda, varía entre 1.6 y 6.3 l/m.s.⁵⁰

Figura 20. Filtro banda horizontal



Tomado de Perry⁵¹

Un sistema de filtros banda típicamente está formado por bombas de alimentación del lodo, equipos de dosificación de polímeros, una cámara de acondicionamiento del lodo (floculador), un filtro banda, una cinta transportadora de la torta de lodo y equipos complementarios (bombas de agua de lavado y compresor de aire). Algunas unidades no utilizan cámara de acondicionamiento químico.

⁵⁰ METCALF & EDDY, Op. cit., p. 979 - 980.

⁵¹ PERRY y GREEN, Op. cit., p.18-124.

En la mayoría de los filtros bandas, el lodo es introducido, en primer lugar, en zona de drenaje por gravedad donde se produce un espesado. En esta fase, la mayor parte del agua libre se elimina por gravedad. En algunos casos, esta fase de operación esta asistida por un sistema de vacío que favorece el drenaje y ayuda a reducir el desprendimiento de olores. A continuación del drenaje por gravedad, el lodo pasa a una zona de baja presión donde es comprimido entre dos telas porosas opuestas. En algunas unidades, esta zona de aplicación de presión baja va seguida de otra de alta presión, en la que el lodo se somete a esfuerzos tangenciales a medida que las bandas pasan a través de una serie de rodillos. Estos esfuerzos de prensado y tangenciales favorecen la liberación de cantidades adicionales de agua contenida en el lodo. La torta de lodo deshidratado se separa de las bandas mediante rascadores.⁵²

Las principales variables que influyen en el rendimiento de los filtros son: tasa y tipo de aplicación del lodo, método y tipo de acondicionamiento del lodo (si es acondicionado), presión aplicada a las bandas (50 – 70 m.c.a.), porosidad y anchura de bandas, velocidad de giro de las bandas (puede alcanzar 1 m/s). En general el filtro de banda es capaz de producir tortas con 25 a 35% de sólidos para lodos secundarios digeridos anaerobiamente.

- **Parámetros de diseño.** El criterio principal para diseño de un filtro banda es la carga de aplicación por metro de ancho de correa, que generalmente varía entre 90 y 680 kg/m.h. El suministro de agua es presurizado a 700 kPa y en caudales de un 50 a 100% del caudal de lodo aplicado.
- **Determinación de las dimensiones de la banda.** Para conocer las dimensiones de la banda, se debe seleccionar la carga de aplicación del lodo

⁵² METCALF & EDDY, Op. cit., p. 978.

por metro de ancho de la banda. En Romero⁵³, se recomienda emplear una carga de 360 a 550 kg/h. m de ancho banda, para lodos digeridos anaerobiamente. El ancho de banda esta dado por:

$$\text{Anchura de banda} = \frac{\dot{m}_{ss}}{\text{CLA}} \quad (7)$$

Donde, \dot{m}_{ss} = flujo másico de sólidos secos que se tratarán en el filtro banda, kg/h

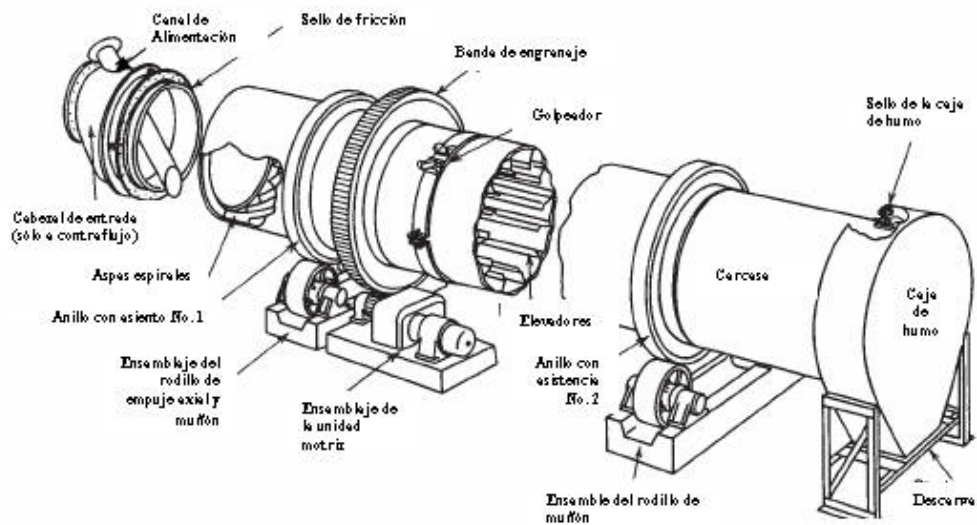
CLA = carga aplicada por metro de ancho de banda, 360 kg/h.m

3. SECADOR ROTATORIO

- **Descripción del equipo y proceso.** Consiste en un cilindro tubular (carcaza de 0.75 m a 3.5 m de diámetro) relativamente largo (hasta 9 m), dispuesto en forma horizontal o ligeramente inclinado hacia la salida. Al girar la carcaza (velocidad de giro entre 1 y 15 rpm), unas pestañas (aspas) levantan los sólidos para caer después en forma de lluvia a través del interior de la carcaza. La alimentación entra por un extremo del cilindro el producto seco descarga por el otro. Ver figura 21.

⁵³ Ibid., p. 827.

Figura 21. Configuración de los componentes de un secador rotatorio a contracorriente y de calor directo



Tomado de Perry⁵⁴

- **Parámetros de diseño.** El diámetro (D) y la longitud (L) de un secador rotatorio, dependen básicamente del calor total transmitido a la alimentación para evaporar una cierta cantidad de agua, de la velocidad másica de aire empleada en el proceso de secado y del tiempo de residencia. En el anexo C, se presentan todas las ecuaciones relacionadas al cálculo de estos parámetros, a continuación se describe la metodología de cálculo para cada una de ellas.

- **Metodología de cálculo del diámetro.** El diámetro se determina una vez se ha calculado las necesidades de aire en el secador, que resulta del balance de calor y materia en el sistema; también depende de la velocidad másica de aire por área de sección transversal del secador, que fue seleccionada. Estas velocidades varían por lo común de 0.27 a 13.6

⁵⁴ PERRY y GREEN, Op. cit., p.12-68

kg/(m².s). Se acostumbra a utilizar la mayor velocidad de aire posible sin producir una cantidad apreciable de polvo.⁵⁵

Para propósito de éste trabajo se utilizó con seguridad una velocidad del aire por área de sección transversal del secador de 4.0 kg/(m².s)*, que nos garantice una baja producción de polvo.

- **Metodología de cálculo de la longitud.** Para propósitos de diseño y basado en pruebas a escala pilotos, la longitud suele estimarse teniendo en cuenta el área de la sección transversal libre de la carcasa del secador y el tiempo de residencia del material a secar.

Un rango de área de sección transversal libre de 85 – 90% comúnmente es adoptada para un adecuado diseño; el resto del área es ocupada por el material a secar. Un área mayor será insuficiente para utilizar plenamente los elevadores, mientras que un área menor crea la posibilidad de provocar interrupciones de los sólidos de alimentación en la parte superior del lecho.

El tiempo de residencia depende de la naturaleza del material a secar y las características mecánicas del secador. Un rango de 7 – 90 min. es reportado por Walas, S. para diferentes unidades de secado.

Cortes y García⁵⁶, concluyen en su trabajo de grado que es necesario un tiempo de residencia entre 45 – 120 min. para secar un lodo biológico desde

⁵⁵ TREYBAL, R. E. Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición. México: McGraw Hill Interamericana, 1988. p. 766.

* PERRY y GREEN, Op. cit., p.12-71, recomiendan una velocidad de 1.4 kg/(m².s) con sólidos de malla 35 (d_p aproximadamente de 0.4 mm). Debido, a que el d_p de los lodos se encuentra entre 0.5 a 1 mm, se seleccionó una velocidad mayor igual a 4.0 kg/(m².s)

una humedad inicial de 90% hasta una humedad final de 8%, con una temperatura de bulbo seco del aire de entrada al secador cercana a 200 °C.

La razón L/D (longitud/diámetro) que resulta más eficaz en la práctica comercial oscila entre 4 y 10.

- **Estimación de la temperatura apropiada para el aire a la entrada del secador.** La temperatura de entrada del aire viene fijada, casi siempre, por el medio de calentamiento empleado. Con el fin de obtener el mejor rendimiento posible en el proceso de secado de lodos, y un manejo integral de las operaciones de la PTAR de Río Frío, aprovechando los recursos disponibles en esta, se propone el siguiente análisis:

- La temperatura del aire a la entrada del secador, debe ser lo suficientemente alta (150°C a 210 °C), para garantizar la evaporación del agua contenida en los lodos. En este estudio, se propone emplear una temperatura de 200 °C, una temperatura mayor pueda causar reacciones de combustión que pueden dar como resultado la descomposición de la materia orgánica presente en los lodos.
- Las condiciones meteorológicas del aire atmosférico en la región son las siguientes: temperatura (27.5 °C), humedad relativa (61.50%), presión barométrica (90593 Pa). Estos datos son el valor promedio mensual, obtenidos del valor promedio diario, que fueron medidos por la estación meteorológica de la CDMB entre las 6:00 a.m. hasta 6:00 p.m.

⁵⁶ CORTES, L. y GARCÍA, N. Desarrollo de un Proceso Térmico para la Estabilización de Lodos Provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Río Frío. Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2000. p. 76 – 90.

- Como el aire debe ser calentado, se propone utilizar un sistema de calentamiento con tubos extendidos, con el fin de aprovechar la energía térmica residual de los gases de combustión provenientes de la Planta de cogeneración eléctrica que se implementará en la PTAR.⁵⁷
- El calor necesario para calentar el aire desde la temperatura ambiente ($T_o = 27.5^\circ\text{C}$) hasta la temperatura de entrada al secador ($T_{ae} = 200^\circ\text{C}$), se puede estimar con la ecuación de calor.
- La energía térmica residual posible que podría recuperarse de los gases de cola generados en el motor de combustión interna puede ser del orden de 1800 Kw-h (1800 kJ/s).⁵⁸

El secado directo en un secador rotatorio de calor directo se expresa mejor como un mecanismo de transmisión de calor, como sigue:⁵⁹

$$Q_t = U_a V (\Delta t)_m \quad (8)$$

En donde, Q_t : calor total transmitido, J/s

U_a : coeficiente volumétrico de transmisión de calor, $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K})$

V : volumen del secador, m^3

$(\Delta t)_m$: diferencia de temperatura media real entre los gases calientes y el material, K

Cuando se elimina una cantidad considerable de humedad superficial de los sólidos y se desconocen las temperaturas de éstos, se obtendrá una

⁵⁷ Ampliación y Complementación PTAR Río Frío: Propuesta Técnico – Económica. BRASMETANO. 2002.

⁵⁸ Meneses Alexander, Op. cit.,

⁵⁹ PERRY, Robert H y GREEN, D. Manual del Ingeniero químico. Séptima edición. Volumen III, section 12. España: McGraw-Hill, 2001. ., p. 12-70.

aproximación aceptable de $(\Delta t)_m$ en la media logarítmica entre las depresiones de bulbo húmedo del gas secante a la entrada y salida del secador.

- **Determinación de las dimensiones del secador.**

En el caso de secadores comerciales que se fabrican actualmente a nivel mundial, que tienen, por lo común, de 2.4 a 3.0 D aspas por ciclo y funcionan con velocidades periféricas de 0.25 a 0.5 m/s, se recomienda la siguiente ecuación empírica dimensional para el coeficiente volumétrico de transmisión de calor:^{60, 61}

$$U_a = \frac{0.5G^{0.67}}{D} \quad (9)$$

Siendo, U_a : coeficiente volumétrico de transmisión de calor, Btu/(h.pie³.°F)

G: velocidad másica del gas por sección transversal del secadero, lb/h.pie²

D: diámetro del secadero, pies

Reemplazando la ecuación (9) en la ecuación (8), nos da la velocidad de transmisión de calor Q_t :

$$Q_t = \frac{0.5G^{0.67}}{D} V(\Delta t)_m \quad (10)$$

$$= 0.125\pi DLG^{0.67} (\Delta t)_m \quad (11)$$

Donde, L: longitud del secador, pies

⁶⁰ Ibid., p. 12-70.

⁶¹ McCABE y HARRIOTT, Op. cit., p. 852.

- Cálculo del diámetro.

El área de la sección transversal del secador A_{ST} , es calculada como:

$$A_{ST} = \frac{\dot{m}_{aire}}{G} \quad (12)$$

Donde, \dot{m}_{aire} : velocidad másica de aire, kg/s

G: velocidad másica de aire por área de la sección transversal, kg/(m².s)

El diámetro del secador puede ser calculado del área de la sección transversal del mismo, por:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_{ST}} \quad (13)$$

- **Cálculo de la longitud.** Walas S.⁶² describe la relación para determinar la longitud:

$$L = \frac{\theta \cdot \dot{V}_{LODO}}{\left(\frac{\%A_{LODO}}{100}\right) \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (14)$$

Siendo, θ : tiempo de residencia del material a secar, h

\dot{V}_{LODO} : flujo Volumétrico del material a secar, m³/h

$\%A_{LODO}$: porcentaje del área de sección transversal ocupada por el material a secar, %

D: diámetro del secador, m²

⁶² WALAS, S. Chemical Process Equipment: Selection and Design. Edit. USA: Butterworth – Heinemann series in Chemical Engineering. 1990. p. 247 - 260.

- **Estimación de la temperatura apropiada para el aire a la salida del secador.** La temperatura apropiada para el aire a la salida del secador es, por lo general, una función de índole económica, determinándose su valor como sigue:

$$N_t = \frac{T_{ae} - T_{as}}{(\Delta t)_m} \quad (15)$$

Donde, N_t : número de unidades de transmisión de calor basado en la fase gaseosa

T_{ae} , T_{as} : temperatura de aire a la entrada y salida del secador, respectivamente, °C

$(\Delta t)_m$: se define tal cual como en la ecuación 4.15, y se puede determinar como sigue:

$$(\Delta t)_m = \frac{(T_{ae} - T_{he}) - (T_{as} - T_{hs})}{\ln[(T_{ae} - T_{he}) / (T_{as} - T_{hs})]} \quad (16)$$

Siendo, T_{he} , T_{hs} : temperatura de bulbo húmedo a la entrada y salida del secador, respectivamente, °C

Para el sistema aire-agua $T_{hs} = T_{he}$ y la ecuación (15) se transforma en:

$$N_t = \ln \frac{T_{ae} - T_{he}}{T_{as} - T_{he}} \quad (17)$$

La ecuación (17) se puede utilizar para seleccionar una temperatura de aire a la salida (T_{as}), ya que se ha descubierto (empíricamente) que los secadores rotatorios son más económicos cuando funcionan entre $N_t = 1.5$ y $N_t = 2.5$.⁶³

- **Determinación del calor total transmitido.** La velocidad de global de transmisión de calor por unidad de masa de sólidos secos (Q_t/m_s), se puede determinar en la forma en que se indica a continuación:⁶⁴

⁶³ PERRY y GREEN, Op. cit., p.12-70.

⁶⁴ McCABE y HARRIOTT, Op. cit., p. 825 – 826.

$$\frac{Q_t}{\dot{m}_s} = c_{ps}(T_{ss} - T_{es}) + X_i c_{pL}(T_v - T_{es}) + (X_i - X_f)\lambda + X_f c_{pL}(T_{ss} - T_v) + (X_i - X_f)c_{pv}(T_{sv} - T_v) \quad (18)$$

Donde: T_{se} : temperatura de los sólidos a la entrada del secador, °C

T_v : temperatura de vaporización, °C

T_{ss} : temperatura de sólidos a la salida del secador, °C. Esta temperatura se aproxima a la del gas de entrada

T_{sv} : temperatura del vapor a la salida, °C

λ : calor latente de vaporización, kJ/kg

c_{ps} , c_{pL} , c_{pv} : calores específicos del sólido, líquido y vapor, respectivamente, kJ/kg.°C

En un secador adiabático T_v es la temperatura húmeda del gas T_{he} y T_{sv} es la temperatura del aire a la salida T_{as} . El calor transmitido a los sólidos, al líquido y al vapor, Q_t , tal como expresa la ecuación (18), procede del enfriamiento del aire caliente. Para un secador adiabático continuo el balance de calor conduce a:⁶⁵

$$Q_t = \dot{m}_{as}(1 + Y_i) \cdot c_{hi} \cdot (T_{ae} - T_{as}) \quad (19)$$

Siendo, \dot{m}_{as} : velocidad másica del aire seco, kg/s

Y_i : humedad absoluta del aire a la entrada, kg agua/kg aire seco

c_{hi} : calor húmedo del aire para la humedad de entrada, J/g.°C

⁶⁵ McCABE y HARRIOTT, Op. cit., p. 826.

ANEXO F

DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS AUXILIARES

1. Unidades de transporte de lodos. Como el lodo debe transportarse de un equipo a otro en la planta, en condiciones en que puede variar entre un lodo líquido hasta un lodo espeso o torta de lodo, es necesario considerar diferentes bombas y sistema de transporte para cada tipo de lodo y aplicación de bombeo.

- **Transporte de lodos desde el estanque de acumulación hasta el espesador por gravedad.** Para este tramo de transporte y considerando las características del lodo proveniente del estanque (concentración de sólidos del 8%), es necesario disponer de una bomba centrífuga del tipo vórtice con un motor de velocidad variable para impedir obturaciones en su interior, debido a la naturaleza variable del lodo que provoca variaciones de velocidad. Las bombas centrífugas del tipo vórtice son recomendada para el manejo de sólidos en suspensión, sus ventajas principales son la sencillez, el bajo costo inicial, el flujo uniforme (sin pulsaciones) el pequeño espacio para su instalación y su funcionamiento silencioso.

- **Transporte de lodos desde el espesador por gravedad hasta el filtro banda.** Con un lodo más espeso (concentración de sólidos del 12%), recomiendan emplear una bomba centrífuga del tipo vórtice, igual que la anterior.

- **Transporte de lodos desde el filtro banda hasta el secador rotatorio.** El lodo proveniente del filtro banda presenta una concentración de sólidos de aproximadamente 28%, para este tipo de lodo concentrado se suelen utilizar

bombas de desplazamiento positivo debido a su capacidad para generar el movimiento de la masa de lodo, de tamaño hasta el diámetro de la tubería de conducción.

2. Equipos auxiliares para el aire de secado. Las unidades que se describen a continuación, son de gran importancia para el adecuado secado térmico de los lodos.

- **Sistema para impulsar el aire de secado.** El aire de secado se hace pasar por el cilindro ya sea mediante un extractor o una combinación de extractor y ventilador. En este último caso, es posible mantener un control muy preciso de la presión interna, incluso cuando la caída total de presión del sistema es importante. No obstante, cuando se emplea un calentador de aire con una caída de presión limitada, casi siempre conviene utilizar un simple extractor, ya que las principales pérdidas de presión del aire se localizan en los conductos de salida de aire y en los lavadores de gases, cuando estos últimos existen. En muy raras ocasiones se emplea sólo un ventilador para forzar el paso del aire por el cilindro, debido a que la presión interna es superior a la atmosférica, y el aire caliente y el polvo pueden impulsarse hacia los sellos de gas o fugarse a las zonas de trabajo circundantes.

- **Sistema para calentar el aire de secado.** En esta capítulo se ha mencionado en varias ocasiones, que se debe emplear un sistema de calentamiento con tubos extendidos, para calentar el aire desde la temperatura de 27.5 a 200 °C, utilizando como fluido térmico los gases de salida del sistema de cogeneración eléctrica.

- **Sistema de lavado de gases.** Como el aire de secado a la salida del secador rotatorio presenta unas características inapropiadas para su emisión directa a la atmósfera, tales como, material particulado en suspensión,

cenizas y compuestos odoríferos, es muy aconsejable emplear unidades de lavado químico de gases. Estos equipos son muy empleados en el secado térmico de lodos biológicos, permitiendo la minimización de emisiones de gases azufrados causantes de mal olor, así como, la remoción de partículas suspendidas en el aire con una gran efectividad ya que por interacción directa con el líquido de lavado se pueden asegurar niveles de retención muy altos.

Existen diferentes tipos de sistemas de lavado químico, entre las más usadas en secado térmico de lodos, se encuentran las torres de lecho empacado, rocío y venturi. Todas son dimensionadas para maximizar el contacto entre los componentes olorosos de la corriente de aire contaminado y una solución química "scrubbing". Los componentes son absorbidos y entonces oxidados por los químicos. El rendimiento de un sistema de lavado químico depende de la solubilidad de los contaminantes olorosos en la solución "scrubbing".

ANEXO G

METODOLOGÍA Y CODIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO EN LENGUAJE MATLAB

Los componentes principales del programa desarrollado son:

- Un programa de ejecución principal, el cual controla las partes de entrada y salida de datos.
- Un conjunto de subrutinas que resuelven los sistemas de ecuaciones lineales y no-lineales que modelan las operaciones que intervienen en los procesos.
- Un subprograma que calcula las relaciones psicrométricas del sistema aire-agua, tales como (humedad absoluta, temperatura de bulbo húmedo, calor húmedo, etc.) en cada uno de los puntos del procesos de secado, a la temperatura y presión de diseño del secador.
- Un subprograma para estimar las propiedades del aire (C_{pa} , ρ_a) en función de la temperatura, mediante interpolación de Lagrange; y base de datos de propiedades de las corrientes que intervienen en los diferentes procesos. Así como, subrutinas para el cálculo del calor latente de vaporización y la capacidad calorífica del vapor en función de la temperatura.

CÓDIGO DEL PROGRAMA 20041001 EN MATLAB 6.5

```
%CODIGO EN LENGUAJE MATLAB STUDENT 6.5
%-----

clear;
clc;

fprintf('\nESTE PROGRAMA DE COMPUTADOR ES UNA HERRAMIENTA DE APOYO PARA EVALUAR
LOS\n');
fprintf('PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES DE PROCESOS (ESPESADOR POR
GRAVEDAD)\n');
fprintf('FILTRO BANDA - SECADOR ROTATORIO) EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO INTEGRAL DE LOS
LODOS\n');
fprintf('BIOLÓGICOS PRODUCIDOS EN LOS REACTORES UASB DE LA PTAR RÍO FRÍO\n');

%CONDICIONES DE OPERACIÓN Y DISEÑO
%-----

%ENTRADA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE TODO EL PROCESO

%-----
fprintf('\n \n');
fprintf('\n===CRITERIOS CARACTERISTICOS DE DISEÑO Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE TODO EL
PROCESO===\n');

%-----ENTRADA DE DATOS DE OPERACIÓN PARA EL LODO BIOLÓGICO-----

%BASE DE DATOS
DH2O = 1000; %Densidad del Agua a Temperatura Ambiente, kg/m^3

fprintf('\nLODO BIOLÓGICO DE LOS REACTORES UASB ');
fprintf('\n=====');
PDL = input('Producción Diaria (m^3/día) = ');
HIL = input('Humedad en Base Húmeda (%) = ');
PEIL = input('Peso Específico = ');
fprintf('=====');

%-----
```

```

%-----ENTRADA DE DATOS PARA EL CICLO DE OPERACION-----

fprintf("\nCICLO DE OPERACIÓN          ');
fprintf("\n===== \n");
DOS = input('Días de Operación a la Semana = ');
HOD = input('Horas de Operación por Día = ');
fprintf('===== \n');

%-----

%-----ENTRADA DE DATOS PARA EL ESPESADOR POR GRAVEDAD-----

%BASE DE DATOS
PEAE = PEIL;          %Peso Específico de la Alimentación en el Espesador
PEE = 1.02;          %Peso Específico del Espesado
PELR = 1.0;          %Peso Específico del Líquido de Rebose

fprintf("\nPARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD          ');
fprintf("\n===== \n");
CSS = input('Carga Superficial de Sólidos (kg/m^3.d) = ');
PROF = input('Profundidad del Espesador por Gravedad (m) = ');
CSE = input('Concentración de Sólidos Esperada en el Espesado (%) = ');
CSLR = input('Concentración de Sólidos Suspendedos en el Líquido de Rebose (mg/l) = ');
fprintf('===== \n');

%-----

%-----ENTRADA DE DATOS PARA EL FILTRO BANDA-----

%BASE DE DATOS
PELAFB = PEE;          %Peso Específico de la Alimentación en el Filtro Banda
PETL = 1.07;          %Peso Específico de la Torta de Lodo
PELF = 1.01;          %Peso Específico del Líquido Filtrado

fprintf("\nPARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL FILTRO BANDA          ');
fprintf("\n===== \n");
CLAB = input('Carga de Lodo por Ancho de Banda (kg/h.m) = ');
CALAB = input('Caudal de Agua de Lavado por Ancho de Banda (l/s.m) = ');
CSTL = input('Concentración de Sólidos Esperada en la Torta de lodo (%) = ');
CSLF = input('Concentración de Sólidos Suspendedos en el Líquido Filtrado (mg/l) = ');
fprintf('===== \n');

```

```

%-----

%-----ENTRADA DE DATOS PARA EL SECADOR ROTATORIO-----

fprintf("\nPARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR ROTATORIO          ');
fprintf("\n=====");

fprintf("\nCONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA REGIÓN                          ');
fprintf("\n-----\n");
TBS1= input('Temperatura Ambiente (°C) = ');
HR1 = input('Humedad Relativa (%) = ');
PA = input('Presión Atmosférica (Pascal) = ');
fprintf('-----\n');

fprintf("\nCONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA DEL LODO                      ');
fprintf("\n-----\n");
%BASE DE DATOS
CPLODO = 4.2;          %Calor Específico del Lodo a 30% de Humedad (kJ/kg.°C)
CPAL = 4.187;         %Calor Específico del Agua Líquida (kJ/kg.°C)
Dp = 100;            %Diámetro de Partícula (micras)
TEL = input('Temperatura a la Entrada (°C) = ');
TSL = input('Temperatura a la Salida (°C) = ');
HSS = input('Humedad Deseada a la Salida del Secador (%) = ');
fprintf('-----\n');

fprintf("\nCONDICIONES DE ENTRADA DEL AIRE                                ');
fprintf("\n-----\n");
TBS2 = input('Temperatura de Bulbo Seco a la Entrada del Secador (°C) = ');
VMMP = input('Velocidad Másica Máxima permitida (kg/m^2.s) = ');
fprintf('-----\n');

fprintf("\nCARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL EQUIPO                            ');
fprintf("\n-----\n");
NT = input('Número de Unidades de Transferencia de Calor = ');
PALS= input('Porcentaje del Área de la Sección Transversal Libre = ');
fprintf('-----\n');

fprintf("\n=====");

%-----

%-----

```

%1. DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS MÁSICOS BASANDOSE EN EL PERÍODO OPERACIÓN SELECCIONADA

%-----

%1.1 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN SEMANAL DE LODO Y SÓLIDOS SECOS

FVLS = PDL*7; %Producción Volumétrica de Lodo a la Semana (m³/semana)
FVLA = FVLS*52; %Producción Volumétrica de Lodo Anual (m³/año)
FMLS = FVLS*PEIL*DH2O; %Producción Másica de Lodo a la Semana (kg/semana)
FMLA = FMLS*52; %Producción Másica de Lodo Anual (kg/año)
CSA = 100 - HIL; %Concentración de Sólidos Secos en el Alimento (%)
FMSS = FMLS*(CSA/100); %Producción de Sólidos Secos en el Alimento (kg/semana)

%1.2 CÁLCULO DE LAS NECESIDADES HORARIAS Y DIARIAS DE TRATAMIENTO BÁSANDOSE EN EL CICLO OPERATIVO

FMSD = FMSS/DOS; %Tasa Diaria de Sólidos Secos (kg/día)
FMSH = FMSD/HOD; %Tasa Horaria de Sólidos Secos (kg/h)

%-----

%2. DISEÑO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD

%-----

%2.1 CÁLCULO DEL ÁREA CIRCULAR Y EL DIÁMETRO

ACESP1 = FMSD/CSS; %Área Circular del Espesador (m²)
DESP1 = sqrt((4/pi)*ACESP1); %Diámetro del Espesador (m)

%2.2 CÁLCULO DEL VOLUMEN Y EL ÁREA SUPERFICIAL

VESP = ACESP1*PROF; %Volumen del Espesador (m³)
ASESP = pi*DESP1*PROF; %Área superficial (m²)

%2.3 DETERMINACIÓN DE LA CARGA SUPERFICIAL DE REBOSE

FVLD = FVLS/DOS; %Flujo Volumétrico del Lodo por día (m³/día)
FMLD = FMLS/DOS; %Flujo Másico de Lodo por día
CSR = FVLD/ACESP1; %Carga Superficial de Rebose (m/d)

%2.4 CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

TRHD = VESP/FVLD; %Tiempo de Retención Hidráulico (día)
TRHH = TRHD*24; %Tiempo de Retención Hidráulico (h)

%2.5 DETERMINACIÓN DEL BALANCE DE SÓLIDOS Y CAUDALES DE SALIDA

FVLH = FVLD/HOD; %Flujo Volumétrico de Lodo Alimentado (m³/h)
FLHgpm = FVLH*4.40; %Conversión del Flujo Volumétrico de (m³/h) a (GPM)
FMLH = FVLH*(DH2O*PEIL); %Flujo Másico del Lodo por hora (kg/h)
CA = CSA/100; %Concentración de Sólidos en el Afluente (Fracción en peso)

CES = CSLR/(1000*1000); %Concentración de SS en el Líquido de Rebose (Fracción en peso)
 CEI = CSE/100; %Concentración de Sólidos en el Espesado (Fracción en peso)
 %2.5.1 Resolución del Sistema de Ecuaciones Lineales
 COEF = [1,1;CES,CEI]; %Matriz de Coeficientes del Sistema de Ecuaciones
 VECT = [FMLH; CA*FMLH]; %Vector de Terminos Independiente
 RES = inv(COEF)*VECT; %Vector de Resultados
 FMES = RES(1); %Flujo Másico del Líquido de Rebose (kg/h)
 FVES = FMES/(DH2O*PELR); %Flujo Volumétrico Líquido de Rebose (m³/h)
 FMEI = RES(2); %Flujo Másico del Espesado (kg/h)
 FVEI = FMEI/(DH2O*PEE); %Flujo Volumétrico del Espesado (m³/h)
 FVEgpm = FVEI*4.40; %Conversión del Flujo Volumétrico del Espesado de (m³/h) a (GPM)
 %2.5.2 Eficacia de Separación
 EFS =((FMLH*CA - FMES*CES)/(FMLH*CA))*100; %Eficacia de Separación del Sistema (%)

%-----

%3. DISEÑO DEL FILTRO BANDA

%-----

%3.1 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA BANDA

CAFB = CEI; %Concentración de Sólidos en el Afluente (Fracción en peso)
 FVAFB = FVEI; %Flujo Volumétrico del Lodo en el Afluente (m³/h)
 FMAFB = FMEI; %Flujo Másico del Lodo en el Afluente del Filtro Banda (kg/h)
 FMSSFB = FMAFB*CAFB; %Flujo Másico Sólidos Secos en el Afluente (kg/h)
 AB1 = FMSSFB/CLAB; %Anchura de la Banda (m)

%3.2 DETERMINACIÓN DEL BALANCE DE SÓLIDOS Y CAUDALES DE SALIDA

CSTL1 = CSTL/100; %Concentración de Sólidos en la Torta de Lodo (Fracción en peso)
 CSLF1 = CSLF/(1000*1000); %Concentración de Sólidos en el Filtrado (Fracción en peso)

%3.2.1 Cálculo del caudal de agua de lavado en contracorriente

QAL = CALAB*(3600/1000)*AB1; %Caudal de Agua de Lavado a Contracorriente (m³/h)
 FMAL = QAL*DH2O; %Flujo Másico de Agua de Lavado (kg/h)
 CSAL = 0; %%Concentración de Sólidos en el Agua de Lavado

%3.2.2 Resolución del Sistema de Ecuaciones Lineales

COEF = [1,1;CSLF1,CSTL1]; %Matriz de Coeficientes del Sistema de Ecuaciones
 VECT = [FMAFB + FMAL; CAFB*FMAFB]; %Vector de Terminos Independiente
 RES = inv(COEF)*VECT; %Vector de Resultados
 FMLF = RES(1); %Flujo Másico del Líquido Filtrado (kg/h)
 FVLV = FMLF/(DH2O*PELF); %Flujo Volumétrico Líquido Filtrado (m³/h)
 FMTL = RES(2); %Flujo Másico de la Torta d Lodo (kg/h)
 FVTL = FMTL/(DH2O*PETL); %Flujo Volumétrico de la Torta de Lodo (m³/h)
 FVTgpm = FVTL*4.40; %Conversión del Flujo Volumétrico de la Torta (m³/h) a (GPM)

%3.2.3 Captura de Sólidos en el Sistema (%)

CSOL = (FMAFB*CAFB - FMLF*CSLF1)/(FMAFB*CAFB)*100;

%-----

%4. DISEÑO DEL SECADOR ROTATORIO

%-----

%4.1 SUBPROGRAMA PARA DETERMINAR LAS RELACIONES PSICROMETRICAS DEL SISTEMA AIRE-AGUA

%NOMENCLATURA 1.(AGUA = AG) 2.(AIRE HÚMEDO = AH) 3.(AIRE SECO = AS)

R = 287.052; %Constante de Gas para Aire SI-(m³/k.s²)

PMH2O = 18.02; %Peso Molecular de H2O (Kg/Kmol)

PMaire = 28.96; %Peso Molecular de Aire (Kg/Kmol)

%4.1.1 Subrutina para calcular la humedad absoluta de la mezcla a la entrada del intercambiador

f = 1.005; %Factor de Corrección

%Subrutina para calcular la presión de vapor de agua saturada

%Constante

Fs = [-741.9242, -29.721, -11.55286, -0.8685635, 0.1094098, 0.439993, 0.2520658, 0.05218684];

for i = 1 : length(Fs)

 calculo(i) = Fs(i)*(0.65 - 0.01*TBS1)^(i-1);

end

sumatoria = sum(calculo);

P1 = (0.01/(TBS1 + 273.15))*(374.136 - TBS1)*sumatoria; %Constante

PVAS1 = 22.087837e6*exp(P1); %Presión de Vapor de Agua Saturada a la Entrada del Intercambiador (Pa)

%Cálculo de la Presión de Vapor de Agua y Humedad Absoluta antes del Intercambiador

PVA1 = (HR1/100)*PVAS1; %Presión de Vapor de H2O (Pa)

Hab1 = (PVA1*0.62198)/(PA - PVA1*f); %Humedad Absoluta del aire inicial (kg H2O/kg AS)

%4.1.2 Subrutina para calcular la Temperatura de Bulbo Húmedo (Tbh2) a la entrada del Secador

Hab2 = Hab1; %Humedad Absoluta del Aire a la Entrada del Secador

Tbh2sup = 10; %Dato de arranque de Tbh2 para su estimación por prueba y error

Habcal2 = 0; %Dato de arranque de Hab para entrar en el algoritmo de cálculo

c = 0; %Contador

%Determinación de Tbh2 por Prueba y Error

while abs(Hab2 - Habcal2) > 1e-04

 Tbh2sup = Tbh2sup + 0.01; %Incremento de Tbh2

```

for i = 1 : length(Fs)
    calculo(i) = Fs(i)*(0.65 - 0.01*Tbh2sup)^(i-1);
end
sumatoria = sum(calculo);
P = (0.01/(Tbh2sup + 273.15))*(374.136 - Tbh2sup)*sumatoria; %Constante
PVASh = 22.087837e6*exp(P); %Presión de Vapor de H2O Saturada a Tbh2 (Pa)
Hsh = (0.62198*f*PVASh)/(PA - f*PVASh); %Humedad Absoluta de Saturación a Tbh2 (kgH2O/kgAS)
Habcal2 = ((2501.6 - 2.3263*Tbh2sup)*Hsh - 1.00416*(TBS2 - Tbh2sup))/...
    (2501.6 + 1.8577*TBS2 - 4.184*Tbh2sup);
c = c + 1;
end

```

Tbh2 = Tbh2sup; %Temperatura de Bulbo Húmedo Estimada (°C)

%4.1.3 Subrutina para calcular la Humedad Relativa y el Calor Húmedo a la entrada del Secador

%Cálculo de la Humedad Relativa

PVA2 = (PA*Hab2)/(f*(0.62198 + Hab2)); %Presión de Vapor de H2O a la Entrada del Secador (Pa)

```

for i = 1 : length(Fs)

```

```

    calculo(i) = Fs(i)*(0.65 - 0.01*TBS2)^(i-1);

```

```

end

```

```

sumatoria = sum(calculo);

```

```

P2 = (0.01/(TBS2 + 273.15))*(374.136 - TBS2)*sumatoria; %Constante

```

```

PVAS2 = 22.087837e6*exp(P2); %Presión de Vapor de H2O Saturada a la Entrada del Secador (Pa)

```

```

HR2 = PVA2/PVAS2; %Humedad Relativa a la Entrada del Secador (fracción decimal)

```

```

Ch2 = 1.00416 + 1.8577*Hab2; %Calor Húmedo a la entrada del Secador (KJ/KG.°C)

```

%4.2 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE BULBO SECO DEL AIRE A LA SALIDA DEL SECADOR (°C)

```

TBS3 = (TBS2 + Tbh2*(exp(NT) - 1))/exp(NT);

```

%4.3 CÁLCULO DEL CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN A LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO Tbh2

%BASE DE DATOS

%DATOS PARA ESTIMAR EL CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIANTE

%LA CORRELACIÓN DE WATSON

```

Tea = 373.15; %Temperatura de Ebullición del H2O (K)

```

```

Tca = 647.1; %Temperatura de Crítica del H2O (K)

```

```

CLV1 = 2257; %Calor Latente de Vaporización a Tea (373.15 K) en (kJ/kg)

```

%Cálculo

```

TR1 = Tea/Tca; %Temperatura Reducida en Tea (373.15 K)

```

```

Tbh2K = Tbh2 + 273.15; %Temperatura de Bulbo Húmedo en Kelvin (K)

```

```

TR2 = Tbh2K/Tca; %Temperatura Reducida en TBS2

```

CLV2 = CLV1*((1 - TR2)/(1 - TR1))^(0.38); %Calor Latente de Vaporización a Tbh2K (kJ/kg)
CLV = CLV2; %Calor Latente de Vaporización (kJ/kg)

%4.4 CÁLCULO DEL CALOR ESPECIFICO DEL VAPOR DE AGUA A LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO
Tbh2

%BASE DE DATOS

%DATOS PARA ESTIMAR EL CALOR ESPECIFICO DEL VAPOR DE AGUA EN FUNCIÓN DE LA
TEMPERATURA

ALFA = 7.256; %Constante en la Ecuación
BETA = 2.298e-03; %Constante en la Ecuación
GAMMA = 0.283e-06; %Constante en la Ecuación

%Cálculo del Calor Específico

CPVMOL = ALFA + BETA*Tbh2K + GAMMA*Tbh2K^2; %Calor Específico del Vapor (Kcal/Kmol.°C)

CPVMAS = CPVMOL/PMH2O; %Calor Específico del Vapor (Kcal/Kg.°C)

CPV = CPVMAS*(4.187); %Calor Específico del Vapor (KJ/Kg.°C)

%4.5 DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD MEDIA DE TRANSFERENCIA DE MASA (VAPOR)

HES = 100 - CSTL;

Xi = HES/(100 - HES); %Humedad en Base Seca del Lodo a la Entrada del Secador (KgH2O/kgSS)

Xf = HSS/(100 - HSS); %Humedad en Base Seca del Lodo a la Salida del Secador (KgH2O/kgSS)

mss = FMTL*CSTL1; %Flujo Másico de Sólidos Secos en el Secador (kg/h)

mvapor = mss*(Xi - Xf); %Velocidad de Vaporización (kg/h)

FMLSS = FMTL - mvapor; %Flujo Másico de Lodo a la Salida del Secador (kg/h)

%4.6 CÁLCULO DEL CONSUMO DE CALOR TOTAL (Qt)

%4.6.1 Consumo de Calor por Unidad de Masa (KJ/KG)

Qtmss = CPLODO*(TSL - TEL) + Xi*CPAL*(Tbh2 - TEL) + (Xi - Xf)*CLV + Xf*CPAL*(TSL - Tbh2)...
+ (Xi - Xf)*CPV*(TBS3 - Tbh2); %Velocidad de Transmisión de Calor por Unidad de Masa (KJ/KG)

%4.6.2 Consumo de Calor Total (KJ/h) y (KJ/s)

Qt = Qtmss*mss;

Qts = Qt/3600;

%4.7 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FLUJO MASICA DE ENTRADA DE AIRE HÚMEDO Y SECO

FMAH2 = Qt/(Ch2*(TBS2 - TBS3)); %Flujo Másico de Aire Húmedo a la Entrada del Secador (kg/h)

FMAS2 = FMAH2/(1 + Hab2); %Flujo Másico de Aire Seco a la Entrada del Secador (kg/h)

%4.8 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD ABSOLUTA DEL AIRE A LA SALIDA DEL SECADOR

Hab3 = Hab2 + mvapor/FMAS2; % Kg H2O/kg AS

%4.8.1 Subrutina para calcular la Temperatura de Bulbo Húmedo a la salida del Secador (Tbh3)

```
Tbh3sup = 10;           %Dato de arranque de Tbh para su estimación por prueba y error
Habcal3 = 0;           %Dato de arranque de Hab para entrar en el algoritmo de cálculo
c = 0;                 %Contador
```

%Determinación de Tbh3 a la Salida del Secador Para Comprobar la Igualdad con Tbh2 a la Entrada

```
while abs(Hab3 - Habcal3) > 1e-04
    Tbh3sup = Tbh3sup + 0.01; %Incremento de Tbh3
    for i = 1 : length(Fs)
        calculo(i) = Fs(i)*(0.65 - 0.01*Tbh3sup)^(i-1);
    end
    sumatoria = sum(calculo);
    P = (0.01/(Tbh3sup + 273.15))*(374.136 - Tbh3sup)*sumatoria; %Constante
    PVASh = 22.087837e6*exp(P); %Presión de Vapor de H2O Saturada a Tbh (Pa)
    Hsh = (0.62198*f*PVASh)/(PA - f*PVASh); %Humedad Absoluta de Saturación a Tbh3 (kgH2O/kgAS)
    Habcal3 = ((2501.6 - 2.3263*Tbh3sup)*Hsh - 1.00416*(TBS3 - Tbh3sup))/...
        (2501.6 + 1.8577*TBS3 - 4.184*Tbh3sup);
    c = c + 1;
end
```

```
Tbh3 = Tbh3sup; %Temperatura de Bulbo Húmedo a la Salida del Secador (°C)
```

%4.9 CÁLCULO DEL ÁREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL Y DIÁMTERO INTERNO DEL SECADOR

```
Gair = VMMP*3600; %Velocidad Másica Máxima permitida de Aire (kg/m^2.h)
Ast1 = FMAH2/Gair; %Área (m^2)
Dsec1 = sqrt((4/pi)*Ast1); %Diámetro del Secador (m)
```

%4.10 ESTIMACIÓN DEI FLUJO MASICO DE AIRE HÚMEDO A LA SALIDA DEL SECADOR Y FLUJO MASICO DE SS POR AST

%4.10.1 Salida del Secador

```
FMAH3 = FMAH2*(1 + Hab3); %Flujo Másico de Aire Húmedo a la Salida del Secador (kg/h)
```

%4.10.2 Sólidos

```
mssast = mss/Ast1; %Velocidad de Sólidos Secos por Ast (kg/m^2.h)
```

%4.11 ESTIMACIÓN DE LA VOLUMEN Y DENSIDAD DE AIRE HÚMEDO Y ENTALPIA DE LA MEZCLA Y FLUJO VOLUMÉTRICO DE AIRE HÚMEDO Y SECO A LA ENTRADA DEL SECADOR

%4.11.1 Volumen Específico (Húmedo)

```
Vh2 = (R*(TBS2 + 273.15)/PA)*(1 + 1.6078*Hab2); % (m^3 AH/kg AS)
```

%4.11.2 Densidad de Aire Húmedo

DAH2 = ((1/Vh2)*(Hab2 + 1)); % (kg/m³)AH

%4.11.3 Flujo Volumétrico de Aire Húmedo

FVAH2 = FMAH2/DAH2; % (m³/h)AH

%4.11.4 Entalpia de la Mezcla

H2 = 1.0016*TBS2 + Hab2*(2501.6 + 1.8577*TBS2); % (KJ/KG)

%4.12 ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA, CALOR HÚMEDO, VOLUMEN Y DENSIDAD DE AIRE HÚMEDO,

% ENTALPIA DE LA MEZCLA Y FLUJO VOLUMÉTRICO DE AIRE HÚMEDO Y SECO A LA SALIDA DEL SECADOR

%4.12.1 Subrutina para calcular la Humedad Relativa y el Calor Húmedo a la Salida del Secador

%Cálculo de la Humedad Relativa

PVA3 = (PA*Hab3)/(f*(0.62198 + Hab3)); %Presión de Vapor de H2O a la Salida del Secador (Pa)

for i = 1 : length(Fs)

 calculo(i) = Fs(i)*(0.65 - 0.01*TBS3)^(i-1);

end

sumatoria = sum(calculo);

P3 = (0.01/(TBS3 + 273.15))*(374.136 - TBS3)*sumatoria; %Constante

PVAS3 = 22.087837e6*exp(P3); %Presión de Vapor de H2O Saturada a la Salida del Secador (Pa)

HR3 = PVA3/PVAS3; %Humedad Relativa a la Salida del Secador (fracción decimal)

Ch3 = 1.00416 + 1.8577*Hab3; %Calor Húmedo a la Salida del Secador (KJ/KG.°C)

%4.12.2 Volumen Específico (Húmedo)

Vh3 = (R*(TBS3 + 273.15)/PA)*(1 + 1.6078*Hab3); % (m³ AH/kg AS)

%4.12.3 Densidad de Aire Húmedo

DAH3 = ((1/Vh3)*(Hab3 + 1)); % (kg/m³)AH

%4.12.4 Flujo Volumétrico de Aire Húmedo

FVAH3 = FMAH3/DAH3; % (m³/h)AH

%4.12.5 Entalpia de la Mezcla

H3 = 1.0016*TBS3 + Hab3*(2501.6 + 1.8577*TBS3); % (KJ/KG)

%4.13 CÁLCULO DEL VOLUMEN, LONGITUD Y ÁREA SUPERFICIAL DEL SECADOR

%4.13.1 Estimación del Volumen del Secador

%Datos de Diseño

trsec = 60; %Tiempo de retención en el secador (min.) dato experimental obtenido

%en pruebas piloto y de secadores similares

PAOS = 100 - PALS; %Porcentaje del área de la sección transversal ocupada por los sólidos

Vsec = ((trsec/60)*(FMTL/(DH2O*PETL)))/(PAOS/100); %Volumen del Secador (m³)

%4.13.2 Estimación de la Longitud del Secador

Lsec1 = Vsec/((pi/4)*(Dsec1²)); %Longitud del Secador (m)

%4.13.3 Estimación del Área Superficial del Secador

Assec = pi*Dsec1*Lsec1; % m²

%4.14 ANÁLISIS DE PARAMETROS DE DISEÑO DEL SECADOR

%4.15.1 Estimación de la Relación L/D, la cual debe ser: 4 <= L/D <= 10 para operación eficaz

RLD = Lsec1/Dsec1; %Relación (Longitud/diámetro)

%4.15.2 Capacidad del Secador (Kg de agua evaporada/Volumen del secador m³)

CAPACIDAD = mvapor/Vsec; %(KgH2O/m³ vol. sec.)

%4.15.3 Eficiencia de Evaporacion (KJ suministrada al Lodo/Kg de agua evaporada)

EFEV = Qt/mvapor; %(KJ/KgH2O)

%4.16 CÁLCULO DEL CALOR NECESARIO PARA CALENTAR EL AIRE DESDE LA TEMPERATURA AMBIENTE (TBS1)

% HASTA LA TEMPERATURA DE ENTRADA EN EL SECADOR (TBS2)

%4.16.1 Estimación del Calor Necesario para calentar el aire

%Cálculo del Calor

Qca1 = FMAH2*Ch2*(TBS2 - TBS1); %Calor necesario para calentar el aire (KJ/h)

Qca2 = Qca1/3600; %Calor necesario para calentar el aire (KJ/s)

%-----

fprintf("\n \n');

fprintf("\n*****RESULTADOS*****\n');

fprintf("\n**PARAMETROS DE DISEÑO Y OPERACION DE LAS UNIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS**\n');

fprintf("\n ');

%-----CICLO DE OPERACION DE SISTEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE LODOS-----

```

fprintf("\nCICLO DE OPERACIÓN SELECCIONADO          ');
fprintf("\n=====');
fprintf("\nDías de Operación a la Semana = %3.0f ',DOS);
fprintf("\nHoras de Operación por Día   = %3.0f ',HOD);
fprintf("\n=====\\n');

%-----

fprintf("\n ');

%-----PROCESAMIENTO DE LODOS HORARIO-DIARIO-SEMANAL-----

fprintf("\nTABLA 1. PROCESAMIENTO DE LODOS BIOLOGICOS HORARIO - DIARIO - SEMANAL - ANUAL  ');
fprintf("\n=====
===');
fprintf("\nProcesamiento      Horario      Diario      Semanal      Anual  ');
fprintf("\nUnidades      ton/h      m^3/h      ton/d      m^3/d      ton/sem.      m^3/sem.      ton/a      m^3/a');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nLodo Tratado  %8.1f %8.1f %8.1f %7.1f %8.1f %8.1f %9.0f %6.0f,FMLH/1000,FVLH,...
          FMLD/1000,FVLD,FMLS/1000,FVLS,FMLA/1000,FVLA );
fprintf("\n=====
===\\n');

%-----

fprintf("\n ');

%-----CAPACIDAD DE LAS BOMBAS PARA EL TRANSPORTE DE LODO DE UN PUNTO A OTRO-----
-

fprintf("\nTABLA 2. CAPACIDAD DE LAS BOMBAS PARA EL TRANSPORTE DE LODO DE UN PUNTO A OTRO ');
fprintf("\n=====
===');
fprintf("\nProcedencia      Tanque de Acumulación      Espesador por Gravedad      Filtro Banda');
fprintf("\nDestino      Espesador por Gravedad      Filtro Banda      Secador Rotatorio');
fprintf("\nUnidades      m^3/h      gpm      m^3/h      gpm      m^3/h      gpm  ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nBomba Centrífuga %7.2f %12.2f %10.2f %12.2f %10.2f %11.2f ',FVLH,FLHgpm,FVEI,FVEgpm,...
          FVTL,FVTgpm );
fprintf("\n=====
===\\n');

%-----

fprintf("\n ');

```

```

%-----RESULTADOS DE DISEÑO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD-----

fprintf("\nRESULTADOS DE DISEÑO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD ');
fprintf("\n=====
===\n');

fprintf("\nDIMENSIONES Y PARÁMETROS DE DISEÑO ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nDiámetro (mt) = %3.1f ', DESP1);
fprintf("\nVolumen (m^3) = %3.2f ', VESP);
fprintf("\nÁrea Superficial (m^2) = %3.2f ', ASEP);
fprintf("\nCarga Superficial de Rebose (m/d) = %3.2f ', CSR);
fprintf("\nTiempo de Retención Hidráulico(d) = %3.1f ', TRHD);
fprintf("\nEficacia de Separación (porc.) = %3.2f ', EFS);
fprintf("\n-----\n');

fprintf("\nTABLA 3. FLUJOS MÁSICOS Y COMPOSICIÓN DE LAS CORRIENTES DE ENTRADA Y SALIDA ');
fprintf("\n=====
===');
fprintf("\n Variables Flujo Másico Flujo Volumétrico Conc.de Sólidos Densidad ');
fprintf("\n Unidades kg/h m^3/h porc. kg/m^3 ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nAlimentación %9.2f %14.2f %20.0f %15.0f',FMLH,FVLH,CSA,PEAE*DH2O);
fprintf("\nEspesado %9.2f %14.2f %20.0f %15.0f',FMEI,FVEI,CSE,PEE*DH2O);
fprintf("\nLíquido de Rebose %9.2f %14.2f %20.2f %15.0f',FMES,FVES,CES*100,PELR*DH2O);
fprintf("\n=====
===\n');

fprintf("\n=====
===\n');

%-----

fprintf("\n ');

%-----RESULTADOS DE DISEÑO DEL FILTRO BANDA-----

fprintf("\nRESULTADOS DE DISEÑO DEL FILTRO BANDA ');
fprintf("\n=====
===\n');

fprintf("\nDIMENSIONES Y PARÁMETROS DE DISEÑO ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nAnchura de Banda (mt) = %3.1f ', AB1);

```

```

fprintf("\nCaptura de Sólidos en el Sistema (porc.) = %3.2f ', CSOL);
fprintf("\n-----\n");

fprintf("\nTABLA 4. FLUJOS MÁSICOS Y COMPOSICIÓN DE LAS CORRIENTES DE ENTRADA Y SALIDA ');
fprintf("\n=====
===');
fprintf("\n Variables      Flujo Másico      Flujo Volumétrico      Conc.de Sólidos      Densidad ');
fprintf("\n Unidades          kg/h              m^3/h                  porc.                kg/m^3 ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nAlimentación      %9.2f %14.2f %20.0f %15.0f,FMAFB,FVAFB,CSE,PEE*DH2O);
fprintf("\nAgua de Lavado    %9.2f %14.2f %20.0f %15.0f,FMAL,QAL,CSAL,DH2O);
fprintf("\nTorta de Lodo     %9.2f %14.2f %20.0f %15.0f,FMTL,FVTL,CSTL,PETL*DH2O);
fprintf("\nFiltrado          %9.2f %14.2f %20.2f %15.0f,FMLF,FVLF,CSLF1*100,PELF*DH2O);
fprintf("\n=====
===\n');

fprintf("\n=====
===\n');

%-----

fprintf("\n ');

%-----RESULTADOS DE DISEÑO DEL SECADOR ROTATORIO-----

fprintf("\nRESULTADOS DE DISEÑO DEL SECADOR ROTATORIO');
fprintf("\n=====
===\n');

fprintf("\nDIMENSIONES Y PARÁMETROS DE DISEÑO ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nÁrea de Sección Transversal - AST (mt^2) = %3.2f ', Ast1);
fprintf("\nDiámetro (mt) = %3.2f ', Dsec1);
fprintf("\nLongitud (mt) = %3.2f ', Lsec1);
fprintf("\nVolumen (m^3) = %3.2f ', Vsec);
fprintf("\nÁrea Superficial (m^2) = %3.2f ', Assec);
fprintf("\nRelación (Longitud/Diámetro)(mt/mt) = %3.1f ', RLD);
fprintf("\nMasa de Agua Perdida por el Lodo durante el Proceso (kg/h) = %3.1f ', mvapor);
fprintf("\nCapacidad del Secador Rotatorio (KgH2O evaporada/m^3 volumen de secador) = %3.2f ', CAPACIDAD);
fprintf("\nEficiencia de Evaporacion (KJ suministrada/KgH2O evaporada) = %3.2f ', EFEV);
fprintf("\nCantidad de Calor Transmitido por el Aire a los Lodos (kJ/s) = %3.2f ', Qts);
fprintf("\nCalor Necesario para Calentar el Aire desde Tentrada al Sec.(kJ/s)= %3.2f,Qca2);
fprintf("\n-----\n");

fprintf("\nTABLA 5. CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA DEL AIRE DE SECADO ');

```

```

fprintf("\n=====
===');
fprintf("\n VARIABLES          UNIDAD          ENTRADA          SALIDA          ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nFlujo Másico de AH      kg/h AH      %7.2f      %5.2f      ,FMAH2,FMAH3);
fprintf("\nFlujo Másico de AS      kg/h AS      %7.2f      %5.2f      ,FMAS2,FMAS2);
fprintf("\nFlujo Volumétrico AH    m^3/h AH      %7.2f      %5.2f      ,FVAH2,FVAH3);
fprintf("\nVel. Másica Permitida  kg/h.m^2      %7.2f      %5.2f      ,Gair,Gair);fprintf("\nPresión Atmosférica
Pascal      %7.0f      %5.0f      ,PA,PA);
fprintf("\nTemp. Bulbo Seco      °C      %7.1f      %5.2f      ,TBS2,TBS3);
fprintf("\nTemp. Bulbo Húmedo    °C      %7.2f      %5.2f      ,Tbh2,Tbh2);
fprintf("\nHumedad Relativa      porcentaje      %7.2f      %5.2f      ,HR2*100,HR3*100);
fprintf("\nHumedad Absoluta      kgH2O/kgAS      %7.4f      %5.4f      ,Hab2,Hab3);
fprintf("\nVolumen Específico    m^3/KgAS      %7.2f      %5.2f      ,Vh2,Vh3);
fprintf("\nDensidad Húmeda      kg/m^3 AH      %7.2f      %5.2f      ,DAH2,DAH3);
fprintf("\nCalor Húmedo          kJ/kg.°C      %7.2f      %5.2f      ,Ch2,Ch3);
fprintf("\nEntalpia de Mezcla    kJ/kg AH      %7.2f      %5.2f      ,H2,H3);
fprintf("\n-----');
fprintf("\nNOMENCALTURA  1.(AGUA = H2O) 2.(AIRE HÚMEDO = AH) 3.(AIRE SECO = AS)');
fprintf("\n=====
===\n');

```

fprintf("\nTABLA 6. CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS LODOS BIOLÓGICOS EN EL SECADOR');

```

fprintf("\n=====
===');
fprintf("\n VARIABLES          UNIDAD          ENTRADA          SALIDA          ');
fprintf("\n-----');
fprintf("\nFlujo Másico de Lodo    kg/h      %7.2f      %5.2f      ,FMTL,FMLSS);
fprintf("\nFlujo Másico de SS      kg/h      %7.2f      %5.2f      ,mss,mss);
fprintf("\nVel. Másica de SS/AST   kg/h.m^2      %7.2f      %5.2f      ,mssast,mssast);
fprintf("\nHumedad en Base Húmeda  porcentaje      %7.0f      %5.0f      ,HES,HSS);
fprintf("\nHumedad en Base Seca    kgH2O/kgSS      %7.4f      %5.4f      ,Xi,Xf);
fprintf("\nTemperatura promedio    °C      %7.1f      %5.1f      ,TEL,TSL);
fprintf("\n-----');
fprintf("\nNOMENCALTURA  1.(SOLIDOS SECOS = SS)          ');
fprintf("\n=====
===\n');

```

```

fprintf("\n=====
===\n');

```

%-----

SOLICITUD DE INGRESOS DE DATOS AL PROGRAMA 20041001

```
MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\MATLAB6p5\work

ESTE PROGRAMA DE COMPUTADOR ES UNA HERRAMIENTA DE APOYO PARA EVALUAR LOS
PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES DE PROCESOS (ESPESADOR POR GRAVEDAD
FILTRO BANDA - SECADOR ROTATORIO) EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO INTEGRAL DE LOS LODOS
BIOLÓGICOS PRODUCIDOS EN LOS REACTORES UASB DE LA PTAR RÍO FRÍO

===CRITERIOS CARACTERISTICOS DE DISEÑO Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE TODO EL PROCESO===

LODO BIOLÓGICO DE LOS REACTORES UASB
=====
Producción Diaria (m^3/día) = 80
Humedad en Base Húmeda (%) = 92
Peso Especifico = 1.01
=====

CICLO DE OPERACIÓN
=====
Días de Operación a la Semana = 5
Horas de Operación por Día = 12
=====

PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL ESPESADOR POR GRAVEDAD
=====
Carga Superficial de Sólidos (kg/m^3.d) = 120
Profundidad del Espesador por Gravedad (m) = 2
```

IMPRESIÓN DE RESULTADOS DEL PROGRAMA 20041001

```

*****RESULTADOS*****

**PARAMETROS DE DISEÑO Y OPERACION DE LAS UNIDADES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS**

CICLO DE OPERACIÓN SELECCIONADO
=====
Días de Operación a la Semana = 5
Horas de Operación por Día = 12
=====

TABLA 1. PROCESAMIENTO DE LODOS BIOLÓGICOS HORARIO - DIARIO - SEMANAL - ANUAL
=====
Procesamiento          Horario          Diario           Semanal          Anual
Unidades               ton/h    m^3/h    ton/d    m^3/d    ton/sem. m^3/sem.    ton/a    m^3/a
=====
Lodo Tratado          9.4      9.3     113.1   112.0     565.6   560.0     29411   29120
=====

TABLA 2. CAPACIDAD DE LAS BOMBAS PARA EL TRANSPORTE DE LODO DE UN PUNTO A OTRO
=====
Procedencia           Tanque de Acumulación   Espesador por Gravedad   Filtro Banda
Destino               Espesador por Gravedad   Filtro Banda             Secador Rotatorio

```

ANEXO H

DESCRIPCIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DE CAPITAL DE INVERSIÓN Y COSTOS ANUALES

1. Estimación de los costos de capital total de inversión. El capital total de inversión CTI, incluye los costos de cada uno de los equipos CE_i , para la planta completa, así como, impuestos, fletes, instrumentación, y costos directos e indirectos de instalación. Los costos presentados son estimados con una exactitud esperada de $\pm 25\%$. Debe tenerse en cuenta que para una aplicación dada, los procedimientos de diseño y fabricación varían de un vendedor a otro, variando de esta manera los costos.

- **Costo directo total de la planta.** Para estimar el costo directo total de inversión, se toma como base el costo de los equipos fundamentales más auxiliares, asignando un porcentaje de este para obtener los costos de impuestos, fletes, y costos directos de instalación para cada uno.

El costo total de cada uno de las unidades principales (estanque de acumulación, espesador por gravedad, filtro banda y secador rotatorio), esta compuesto por los costos de cada uno de los componentes que los conforman, incluyendo equipos auxiliares. En la tabla 40, se describe los componentes principales que hacen parte de estas unidades.

Tabla 40. Componentes que hacen parte de las unidades fundamentales de la planta de tratamiento de lodos

EQUIPOS E INSTALACIONES	COMPONENTES
Estanque de acumulación	Tanque en concreto reforzado para contener los lodos
	Equipos auxiliares (bombas centrífugas de extracción)
Espesador por gravedad	Tanque de sedimentación en concreto reforzado
	Estructura de apoyo del motor
	La unidad de impulso y el dispositivo de elevación
	La estructura de arrastre
	El pozo de alimentación
	Los dispositivos de efluentes superior e inferior
	Equipos auxiliares (bombas centrífugas de extracción)
Filtro banda	Caja de alimentación
	Filtro banda
	Caja de lavado
	Compresor de aire
	Equipos auxiliares (tanque de agua de lavado, bomba de agua de lavado, bomba de extracción del lodo)
Secador rotatorio	Carcaza rotatoria
	Canal de alimentación
	Cabezal de entrada
	Campana de descarga de aire húmedo
	Descarga del producto
	Aspas espirales y de elevación
	Ensamblaje de la unidad motriz
	Ensamblaje del rodillo de empuje axial y muñón
	Rodillos para el soporte
	Banda de engranaje y piñón
	Anillo con asiento
	Golpeador
	Sello de fricción
Equipo auxiliar (Calentador de aire de tubos extendidos, extractor de aire, transportador de tornillo para el producto seco)	

En el anexo B se muestran con más detalle la configuración de los componentes de cada unidad

En la tabla 41, se presenta las especificaciones de los principales equipos con sus respectivos precios FOB (en el punto de fabricación).

Tabla 41. Especificación de los equipos principales y su respectivo costo FOB^a

CANTIDAD/ NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO* (US\$)
1 / TA-1	Tanque de Almacenamiento de concreto Volumen = 160 m ³ L*A*P = 10m*8m*2m	15000
1 / EG-1	Espesador por Gravedad Diámetro = 9.8 m Área superficial = 61.57 m ²	40000
1 / FB-1	Filtro Banda Ancho de banda = 2.0	150000
1 / SR-1	Secador Rotatorio Diámetro = 1.82 m Longitud = 7.90 m	186000
COSTO TOTAL DE EQUIPOS Y AUXILIARES (CTE)		391000

^a Proveído por los vendedores especializados de equipos y plantas de tratamiento de lodos

El costo total de adquisición de los equipos (CTAE), comprende: el costo total de equipos y sus auxiliares (CTE), instrumentación (0.30CTE), impuestos (0.03CTE), y fletes (0.05CTE).

$$CTAE = (1 + 0.30 + 0.03 + 0.05)CTE = 1.38CTE \quad (1)$$

Además de estos costos, hay que asumir los costos directos de instalación, como son, instalación (0.30CTAE), cimientos y soportes (0.12CTAE) tuberías de procesos y accesorios (0.30CTAE), aislamiento (0.03CTAE) y accesorios eléctricos (0.10CTAE) y instalación de auxiliares (0.40CTAE). (Seider, Warren, 1999).⁶⁶

Adicionalmente, hay que tener en cuenta los costos de preparación del lugar y construcción de edificios (0.45CTAE).

⁶⁶ SEIDER, Warren y Otros. Process Design Principles, Synthesis, Analysis, and Evaluation. New York. 1999. John Wiley & Sons, Inc.

Por tanto, el costo directo total de la Planta (CDTP), esta dado por:

$$\text{CDTP} = (1 + 1.25 + 0.45)\text{CTAE} = 2.70\text{CTAE} \quad (2)$$

- **Costo indirecto total de la planta.** (Seider, Warren, 1999), también presenta los factores de costos de capital para el costo indirecto de instalación. Este costo incluye: ingeniería (0.25CDTP), construcción y gastos de campo (0.35CDTP), puesta en marcha (0.01CDTP) y prueba de rendimiento (0.01CDTP).

$$\text{CITP} = (0.25 + 0.35 + 0.01 + 0.01)\text{CDTP} \quad (3)$$

El costo total de la planta, esta dado por:

$$\text{CTP} = \text{CDTP} + \text{CITP} \quad (4)$$

Finalmente, para estimar el capital total de inversión (CTI), hay que tener en cuenta los honorarios del contratista (0.05CTP) y contingencias (0.10CTP).

$$\text{CTI} = (1 + 0.05 + 0.10)\text{CTP} \quad (5)$$

2. Estimación de los costos anuales. El costo total anual, CTA, es la suma del costo anual directo e indirecto, los cuales incluyen: costos de operación y mantenimiento y, costos administrativos. A continuación se presentará un análisis de cada uno de estos costos.

- **Costo directo anual.** Los costos directos anuales son los gastos relacionados con la operación y mantenimiento de la Planta de Lodos, tales como mano de obra y materiales. Respecto a la mano de obra utilizada, la operación de la planta requiere dos operadores, un supervisor y un jefe de planta para cada turno de 6 horas. Para un día de operación (12 horas) se

estima un total de 6240 horas hombre por año de los operadores, cuyo costo es del orden de los 2.30 US\$/hora, es decir, 14352 US\$*. Si a este valor se le agregan las horas hombres por año de los supervisores, 520, con un costo de 3.70 US\$/hora, es decir, 1924 US\$, y las horas hombre por año del jefe de planta, 260, cuyo costo es de 5.50 US\$/hora, es decir, 1430 US\$, se tiene un consumo total anual de 7020 horas, lo que representa un monto total del orden de 17706 US\$.

El costo de mano de obra de mantenimiento y materiales mantenimiento es estimado como el 5% del costo total instalado (directo + indirecto).

Además, hay que asumir el costo de electricidad asociados con la operación de la Planta de Lodos, que se derivan de los requerimientos energéticos del espesador por gravedad + auxiliares (4 KW), filtro banda + auxiliares (13 KW) y secador rotatorio + auxiliares (16KW). Con un costo unitario aproximadamente de 0.11 US\$/KWh.

Igualmente, hay que estimar el costo asociado al consumo de agua de lavado para el filtro banda, cuyo costo unitario es del orden de 0.34 US\$/m³.

- **Costo indirecto anual.** Los costos indirectos anuales incluyen: gastos generales, impuestos, seguro, gastos administrativos, y costos de amortización. Los gastos generales son asumidos como el 60 % de la suma de los costos de operación, supervisión, mano de obra de mantenimiento y materiales de mantenimiento.

* Las conversiones realizadas de pesos a dólares se hicieron tomando como referencia una tasa de cambio de \$2315 (semana del 21 al 26 de Febrero de 2005), en el caso de los valores del componente colombiano, como salarios y servicios industriales.

Los gastos administrativos, impuestos de propiedad, y seguros, son evaluados como un porcentaje del capital total de inversión (CTI), típicamente: 2%, 1%, y 1%, respectivamente.

Finalmente, el costo total anual (CTA), es calculado por la suma del costo directo anual (CDA) y el costo indirecto anual (CIA).

$$CTA = CDA + CIA \quad (5.6)$$