



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**Análisis del aprovechamiento del calor remanente de los
generadores de energía eléctrica del Relleno Sanitario de
Pichacay para la deshidratación de lodos residuales**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

Nombre de los Autores:

**CRIOLLO ORTIZ BRYAN FRANCISCO
VIDAL CABRERA ERIKA DANIELA**

Nombre del Director:

CÉSAR VINICIO ARÉVALO VÉLEZ

CUENCA, ECUADOR

2020

Las ideas y comentarios expuestos en este proyecto son de exclusiva propiedad y responsabilidad de sus autores.

Bryan Francisco Criollo Ortiz

Erika Daniela Vidal Cabrera

Cuenca, 26 de octubre de 2020

DEDICATORIAS

Este presente trabajo está dedicado a mis padres, Francisco y Patricia, a mi hermano Sebastián por la ayuda que me dio en los momentos más difíciles de mi vida, para mi abuela María por alentarme siempre a seguir adelante. A mis amigos por permitirme aprender más de la vida a su lado, pero especialmente dedico a mi hermana Tania que desde el cielo me cuida y protege de todo, por cada noche que le recé para pedirle que me vaya bien en la carrera como ingeniero y en la vida como persona. Esto es posible gracias a todos ustedes

Bryan Francisco Criollo Ortiz

Este proyecto de titulación va dedicado de manera especial a mis padres, Jaime y Martha, quienes con mucho sacrificio y esfuerzo hicieron posible la culminación de esta carrera profesional en Ingeniería Civil y Gerencia de Construcciones; también a mis abuelitos, Carlos y Clemencia, quienes me motivaron desde mi niñez al estudio y a mis hermanos, Santiago y Juan, por los consejos y el apoyo brindado.

Erika Daniela Vidal Cabrera

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer de manera especial al Ingeniero César Arévalo Vélez, quién con sus sabios conocimientos y apoyo nos guió a través de cada una de las etapas de este proyecto, ya que sin él no hubiera sido posible la culminación exitosa de nuestro proyecto de grado.

Agradecemos a nuestros padres, quienes fueron, son y serán nuestro pilar fundamental en nuestra vida, por brindarnos palabras de apoyo cuando sentíamos que no podíamos continuar y por los abrazos reconfortantes, gracias por permitirnos ser parte de su orgullo.

A nuestros compañeros y amigos, por hacer más ameno nuestro paso por la Universidad, ya que llegaron a convertirse en nuestros hermanos.

A la empresa EMAC EP por su acogida, apoyo y prestación de la información para realizar el proyecto.

Por último, queremos agradecer a nuestra familia y demás personas que de una u otra manera estuvieron en todo este proceso acompañándonos.

Muchas gracias a todos.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
RECOPILOCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SOBRE LOS MOTORES GENERADORES DE LA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DEL BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO DE PICHACAY	3
1.1 Relleno Sanitario	3
1.2 Metano.....	6
1.3 Combustión Interna	7
1.4 Combustión Externa	7
1.5 EMAC-BGP ENERGY	8
1.6 GUASCOR.....	9
1.7 Generación de Energía	13
CAPÍTULO II	19
SISTEMATIZACIÓN Y PROYECCIÓN DE LAS CANTIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE LAS PLANTAS DE AGUAS RESIDUALES DE ETAPA EP	19
2.1 Aguas Residuales.....	19
2.2 Tratamiento de Aguas Residuales	20
2.3 Lodos Residuales.....	21

2.4 Convenio entre ETAPA EP y EMAC EP.....	23
2.5 Factores que afectan la disposición de los lodos al Relleno Sanitario	24
2.6 Formas de secado de lodos	25
2.7 Características principales de los lodos provenientes de la PTAR de Ucubamba	27
CAPÍTULO III	34
INVESTIGACIÓN, APLICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA Y PROCESOS TÉCNICOS PARA CALCULAR LA CANTIDAD DE ENERGÍA NECESARIA PARA DESHIDRATAR LOS LODOS UTILIZANDO EL CALOR REMANENTE, APLICABLES EN NUESTRA REALIDAD	34
3.1 Ubicación.....	34
3.2 Modelos para el secado de lodos deshidratados	38
3.2.3 Secado de lodos por medio de bandas transportadoras.....	38
3.2.4 Secado de lodos por medio de un horno sin fin	42
3.3 Determinación de la metodología a aplicar	45
3.4 Temperatura en el escape	47
3.5 Temperatura, presión y flujo en el bioprocador, y en el motor generador....	50
3.6 Modelación para el secado de lodos	56
CAPÍTULO IV	58
DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE ANÁLISIS TÉCNICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL MÁS ÓPTIMOS APROVECHANDO EL CALOR REMANENTE	58
4.1 Principios de la termodinámica	58
4.2 Transferencia de calor	59
4.2.1 Transferencia de calor por conducción.	59
4.2.2 Transferencia de calor por convección	59
4.2.3 Transferencia de calor por radiación.....	60
4.3 Ley de Fourier	62

4.4 Ley de los Gases Ideales.....	63
4.5 Diseño de la cámara de secado.....	64
4.5.1 Tubería	64
4.5.2 Aislante Térmico.....	65
4.5.3 Temperatura Final	66
4.5.4 Tornillo sin fin.....	72
4.5.5 Sistema de ventilación.....	73
4.5.6 Ensayos de laboratorio	73
4.5.7 Cámara	100
4.5.8 Bandas Transportadoras	101
4.5.9 Opciones de Diseño.....	101
4.6 Análisis Técnico	106
4.7 Análisis Ambiental	106
4.8 Análisis Económico.....	107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
CONCLUSIONES:.....	108
RECOMENDACIONES:	110
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXOS	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación geográfica del Relleno Sanitario de Pichacay	5
Figura 1.2 Motor Generador del Relleno Sanitario de Pichacay	7
Figura 1.3 Antorcha	8
Figura 1.4 Motor Generador Guascor SFGM 560	9
Figura 1.5 Motor con doble circuito de refrigeración	12
Figura 1.6 Esquema de Generación de Energía Eléctrica a partir de biogás	14
Figura 1.7 Red de Distribución de Pozos del Relleno Sanitario de Pichacay	15
Figura 1.8 Pozos ubicados en el Relleno Sanitario de Pichacay	16
Figura 1.9 Bioprocesador y antorcha del Relleno Sanitario de Pichacay	17
Figura 2.1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba	20
Figura 2.2 Diagrama de procesos del sistema de extracción y deshidratación de lodos	23
Figura 2.3 Invernadero para secado solar de lodos de última generación	26
Figura 2.4 Unidad de Tratamiento de Lodos en Loeches	27
Figura 3.1 Ubicación referencial de los tres terrenos a elegir	35
Figura 3.2 Vista topográfica del Terreno 1	36
Figura 3.3 Vista topográfica del Terreno 2	36
Figura 3.4 Vista topográfica del Terreno 3	37
Figura 3.5 Terreno donde se localizará la planta de secado.....	38
Figura 3.6 Transporte en bandas	39

Figura 3.7 Elementos principales de una banda transportadora.....	40
Figura 3.8 Transportador de banda plano	41
Figura 3.9 Transportador de banda en canal	42
Figura 3.10 Tornillo sin fin	43
Figura 3.11 Horno de secado	43
Figura 3.12 Diagrama de funcionamiento del proceso de secado térmico de lodos ..	46
Figura 3.13 Equipo STC implantado en una Estación Depuradora de Aguas Residuales	47
Figura 3.14 Toma de temperatura a la salida del escape del motor de biogás	47
Figura 3.15 Pirómetro Raytek MT6	49
Figura 3.16 Medición de la temperatura en el escape del motor generador	50
Figura 3.17 “Pantalón” del motor generador a biogás	51
Figura 3.18 Esquema del escape del motor generador.....	53
Figura 3.19 Horno de convección por gravedad	56
Figura 3.20 Horno Humboldt de la Universidad del Azuay	57
Figura 4.1 Modelo de la conexión de dos tuberías de cobre	68
Figura 4.2 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 140°C.....	79
Figura 4.3 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 160°C.....	79
Figura 4.4 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 180°C.....	80

Figura 4.5 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 200°C.....	80
Figura 4.6 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 220°C.....	81
Figura 4.7 Los lodos residuales colocados en bandeja para su secado térmico.....	82
Figura 4.8 Curva del tiempo vs. Humedad de los lodos residuales a una temperatura de 150°C de la prueba 1	86
Figura 4.9 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 130°C de la prueba 1	87
Figura 4.10 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 150°C de la prueba 2	90
Figura 4.11 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 130°C de la prueba 2	91
Figura 4.12 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 150°C de la prueba 3	95
Figura 4.13 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 130°C de la prueba 3	95
Figura 4.14 Curva comparativa con temperatura de 150°C y espesor 4 cm	96
Figura 4.15 Curva comparativa con temperatura de 150°C y espesor 2 cm	97
Figura 4.16 Curva comparativa con temperatura de 130°C y espesor 2 cm.....	97
Figura 4.17 Curva comparativa con temperatura de 130°C y espesor 2 cm	98
Figura 4.18 Curvas humedad vs tiempo con temperatura de 150°C, 130°C y espesores de 4 cm y 2 cm	99
Figura 4.19 Opción 1 de cámara de secado, vista en planta.	102

Figura 4.20 Opción 2 de cámara de secado, vista frontal	103
Figura 4.21 Opción 3 de cámara de secado, vista frontal	104
Figura 4.22 Opción 3 de cámara de secado, vista en planta	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Rango de composición de biogás en rellenos sanitarios	5
Tabla 1.2. Especificación técnica del motor SFGM GUASCOR	10
Tabla 1.3. Características técnicas del Motor Generador GUASCOR SFGM	10
Tabla 2.1 Porcentaje de Humedad por día	28
Tabla 2.2 Características generales de los lodos residuales en Ucubamba	32
Tabla 2.3 Caracterización de metales y patógenos del lodo en Ucubamba, obtenidos del muestreo realizado por ALS Ecuador	33
Tabla 3.1 Selección óptima del terreno.....	37
Tabla 3.2 Especificaciones del pirómetro Raytek MT6.....	48
Tabla 3.3 Temperatura del escape del motor generador	49
Tabla 3.4 Temperatura, presión y flujo en el bioprocesador y motor	51
Tabla 3.5 Tabla del flujo de biogás al ingresar al motor.....	54
Tabla 3.6 Tabla de la temperatura del biogás al ingresar al motor	55
Tabla 3.7 Media del flujo y Temperatura del Biogás.....	55
Tabla 3.8 Características del Horno Humboldt modelo 30 GC	57
Tabla 4.1 Propiedades de los metales	62
Tabla 4.2 Conductividad térmica de los aislantes térmicos de origen inorgánico	66
Tabla 4.3 Estimado de Energía Termal Disponible	67
Tabla 4.4 Temperatura final al llegar a la cámara de secado del escape 1	68
Tabla 4.5 Temperatura final al llegar a la cámara de secado del escape 2	69

Tabla 4.6 Ensayo 1 con temperatura a 140°C	73
Tabla 4.7 Ensayo 2 con temperatura a 160°C	74
Tabla 4.8 Ensayo 3 con temperatura a 180°C	75
Tabla 4.9 Ensayo 4 con una temperatura de 200°C	76
Tabla 4.10 Ensayo 5 con una temperatura de 220°C	77
Tabla 4.11 Humedad a las 24 horas de la prueba 1	83
Tabla 4.12 Prueba 1 con temperatura de 150°C.....	83
Tabla 4.13 Prueba 1 con temperatura de 130°C.....	84
Tabla 4.14 Humedad a las 24 horas de la prueba 2.....	87
Tabla 4.15 Prueba 2 con temperatura de 150°C.....	88
Tabla 4.16 Prueba 2 con temperatura de 130°C.....	89
Tabla 4.17 Humedad a las 24 horas de la prueba 3.....	91
Tabla 4.18 Prueba 3 con temperatura de 150°C.....	92
Tabla 4.19 Prueba 3 con temperatura de 130°C.....	93
Tabla 4.20 Costo total de la cámara de secado	107

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ensayo de contenido de humedad, por el método de secado al horno según (NTE, Mecánica de suelos, 1982) o método gravimétrico.....	116
Anexo 2. Determinación de la temperatura final mediante la fórmula de Fourier	118
Anexo 3. Convenio entre EMAC EP y ETAPA EP	120

Análisis del aprovechamiento del calor remanente de los generadores de energía eléctrica del Relleno Sanitario de Pichacay para la deshidratación de lodos residuales

RESUMEN

Esta investigación analiza el aprovechamiento del calor remanente de los generadores de energía eléctrica a partir del biogás producido en el relleno sanitario de Cuenca, para deshidratar los lodos provenientes de las PTAR de ETAPA EP. Mediante cálculos y ensayos de laboratorio se determinó que la energía descargada en los gases de escape de los motores – generadores permitiría alcanzar humedades entre el 10-15 % en los lodos, misma que posibilitaría su utilización como combustible sustituto en la industria cementera o su disposición en el relleno sanitario. Además, se presenta un pre-diseño de una cámara de secado aplicable a nuestra realidad.

Palabras clave: Calor remanente, lodos residuales, biogás, humedad, cámara de secado.



Ing. César Vinicio Arévalo V. M.Sc.

Director del Trabajo de Titulación



Ing. José Fernando Vázquez C. M.Sc.

Director de Escuela



Bryan Francisco Criollo Ortiz

Autor



Erika Daniela Vidal Cabrera

Autora

Analysis of the utilization of the remaining heat from the electric power generators of the Pichacay Landfill for the dewatering of sewage sludge

Abstract

This research analyzed the use of the remaining heat from the electrical energy generators from the biogas produced in the Cuenca sanitary landfill, to dehydrate the sludge coming from the PTAR of ETAPA EP. Thorough calculations and laboratory tests, it was determined that the energy discharged in the exhaust gases of the engines generators allowed reaching humidity between 10-15% in the sludge. It would make possible its usage as substitute fuel in the cement industry or its disposal in the sanitary landfill. In addition, a pre-design of a drying chamber applicable to our reality was presented.

Keywords: Remaining heat, sewage sludge, biogas, humidity, drying chamber.

Translated by



Bryan Francisco Criollo Ortiz



Erika Daniela Vidal Cabrera

Trabajo de Titulación

Ing. César Vinicio Arévalo Vélez

Noviembre, 2020

**ANÁLISIS DEL APROVECHAMIENTO DEL CALOR
REMANENTE DE LOS GENERADORES DE ENERGÍA
ELÉCTRICA DEL RELLENO SANITARIO DE PICHACAY
PARA LA DESHIDRATACIÓN DE LODOS RESIDUALES**

INTRODUCCIÓN

Cuenca es la primera ciudad que tiene una planta de biogás, la cual aprovecha el gas metano que se encuentra en el relleno sanitario de Pichacay para producir 1 MW de potencia y a finales del año 2020 podrá generar 2MW. El calor que emana de sus motores generadores puede ser utilizado para reducir la humedad que contiene los lodos provenientes de las plantas de aguas residuales de ETAPA EP, como también eliminar los patógenos que estos tienen. Además, los fangos pueden utilizarse como combustible sustitutivo. Existen varios tipos de tratamiento para los lodos residuales, sin embargo, son muy costosos por lo que este proyecto trata de buscar procesos aplicables a nuestra realidad.

La EMAC EP recibe a diario 50 m³ de lodos residuales provenientes de la planta de aguas residuales de Ucubamba, y a partir del 2022 recogerá 80 m³ por día de la planta de Guangarcucho. Estos lodos se receptan en el relleno sanitario de Pichacay, sin embargo, la humedad que contienen es muy alta, por lo que generan desestabilidad al relleno si se lo introduce directamente, como también ocupan un volumen muy alto y

se pueden rehidratar fácilmente; por lo que es necesario realizar un secado de los fangos.

El objetivo de este trabajo de titulación es analizar la viabilidad del aprovechamiento del calor remanente de los generadores de energía del relleno sanitario de Pichacay, para deshidratar los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales de ETAPA EP.

La metodología empleada fue de tipo experimental, pues se midió cuánta pérdida de calor se presenta en los escapes de los motores generadores de biogás, para determinar la reducción de humedad de los lodos. Se investigó por medio de un análisis bibliográfico que proceso es el más óptimo con base a nuestra realidad, y por medio de cálculos y ensayos se realizó cuanta cantidad de energía es necesaria para deshidratar los lodos residuales. Por último, se realizó un análisis técnico, económico y ambiental.

CAPÍTULO I

RECOPILOCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SOBRE LOS MOTORES GENERADORES DE LA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DEL BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO DE PICHACAY

La población en el mundo va en continuo crecimiento, así como también el aumento de la basura que se produce, por lo que buscar una forma de tratar los desechos es imprescindible. A lo largo del tiempo se han utilizado tres diferentes maneras para el tratamiento de los residuos sólidos, el primero es mediante vertederos con una locación específica que con los años se perfeccionó y se tecnifica llamándolos rellenos sanitarios, el segundo por medio de la incineración y el tercero a partir del compostaje/reciclaje.

1.1 Relleno Sanitario

A nivel mundial, los rellenos sanitarios sirven para la disposición de los residuos sólidos, según la ASCE como se citó en Noguera & Olivero (2010), se define como:

Técnica para la disposición de la basura en el suelo, sin perjuicio al medio ambiente y sin causar molestias o peligros para la salud y seguridad pública, método este, que utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área menor posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable, y para cubrir la basura, así depositada en una capa de tierra, por lo menos al fin de cada jornada. (p.348)

Los rellenos sanitarios se componen de cinco fases para la descomposición de sus desechos, los cuales son:

Fase I: Aeróbica, que inicia inmediatamente después de la disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario y en la que las sustancias fácilmente biodegradables se descomponen por la presencia de oxígeno y se propicia la formación de dióxido de carbono (CO₂), agua, materia parcialmente descompuesta registrando temperaturas entre 35 y 40 °C.

Fase II: Aeróbica con el desarrollo de condiciones anaeróbicas en la que ocurre el proceso de Fermentación, actúan los organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos y la reduce significativamente el pH, condiciones propicias para la liberación de metales en el agua y la generación de dióxido de carbono (CO₂).

Fase III: Anaeróbica, resultado de la acción de organismos formadores de metano (CH₄), que en las condiciones adecuadas, actúan lenta y eficientemente en la producción de este gas mientras reducen la generación de dióxido de carbono (CO₂).

Fase IV: Metanogénica estable, que registra la más alta producción de metano oscilando entre 40-60% de metano (CH₄) en volumen.

Fase V: Estabilización, la producción de metano (CH₄) comienza a disminuir y la presencia de aire atmosférico introduce condiciones aeróbicas en el sistema.

(Camargo & Vélez, 2009, p.2)

Cada fase tiene su duración, esto depende del clima en el que se encuentre el relleno sanitario, como también de las condiciones operarias, su humedad, la compactación, etc. La fase I y II pueden durar entre varias semanas a dos años e incluso más, III y IV tiene un tiempo de aproximadamente cinco años y la fase V puede llegar a tener una duración de varias décadas o siglos.

El relleno sanitario que posee Cuenca se encuentra en la parroquia rural Santa Ana, en la comunidad de Pichacay, a 21 km de la capital Azuaya. En el 2011 la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca, EMAC EP, inicia el “Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental de Pichacay”.



Figura 1.1 Ubicación geográfica del Relleno Sanitario de Pichacay

Fuente: Autores

Los rellenos sanitarios son una fuente importante para la generación de biogás, resultado de la descomposición anaeróbica de varias sustancias orgánicas por una gran cantidad de bacterias, principalmente está compuesta de metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 . En la siguiente tabla se presentan los compuestos que presenta el biogás.

Tabla 1.1 Rango de composición de biogás en rellenos sanitarios

Parámetro	Unidad	Rango de variación
Metano	% CH_4	30-65
Dióxido de carbono	% CO_2	20-40
Nitrógeno	% N_2	may-40
Hidrógeno	% H_2	01-mar
Oxígeno	% O_2	0-5
Argón	% Ar	0-0.4
Sulfuro de hidrógeno	% H_2S	0-0.01
Sulfato total	% S	0-0.01
Cloruro total	% Cl	0.005
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	oct-40

Contenido de humedad	% humedad relativa	0-100
Masa	Kg/m ³	1.1-1.28
Nivel de energía mínimo	MJ/Nm ³	10.8-23.3

Fuente: Camargo & Vélez, 2009

1.2 Metano

El metano CH₄ es un hidrocarburo incoloro, inflamable y no tóxico. Es un gas de efecto invernadero, el segundo de mayor importancia después del dióxido de carbono CO₂, se generan principalmente en la actividad agropecuaria como la digestión del ganado y la producción de cereal, en especial el arroz; en la descomposición de los desechos sólidos; y en la energía, basados en petróleo y gas natural. (Baethgen & Martino, 2000).

El índice PCG (Potencial Calentamiento Global) o PGW por sus siglas en inglés, define la capacidad que tiene un gas en atrapar calor en la atmósfera, tomándolo como referencia al dióxido de carbono (CO₂), por lo que se ha estimado que el CH₄ es 25 veces más efectivo en atrapar el calor que el CO₂, mientras que el óxido nitroso N₂O es de 298. Estos dos últimos son los más peligrosos e importantes para el calentamiento global. (Espíndola & Valderrama, 2011)

Existen varias formas para tratar y mitigar las emisiones de metano hacia el aire, generalmente en el mundo los países lo incineran, de esta manera al juntarse con el oxígeno “se producen moléculas de dióxido de carbono y vapor de agua disparadas a gran velocidad que ceden su energía en forma de calor” (Juliarena, 2013), esto significa que por cada molécula de CH₄ que se quema se proporciona una molécula de CO₂ al ambiente, dicho esto no sería lo más propicio pero como se puede observar en el párrafo anterior es muchísimo mejor que dejar al metano libre en el aire.

El metano tiene varios usos en la industria química, se utiliza como materia prima para la producción de varios productos sintéticos como son: el hidrógeno, el metanol, el ácido acético, el anhídrido acético, entre otros. Además, se lo utiliza como fuente de

energía alternativa, se lo emplea como combustible para los generadores de vapor o turbinas de gas. (Cornejo, 2015)

En la ciudad de Cuenca, en el Relleno Sanitario de Pichacay se realiza dos formas para la mitigación del metano en el aire de manera externa e interna.

1.3 Combustión Interna

En este caso, es llevar el metano hacia un motor generador para la producción de energía, aquí el metano sirve como combustible.



Figura 1.2 Motor Generador del Relleno Sanitario de Pichacay

Fuente: Autores

1.4 Combustión Externa

La gran mayoría de rellenos sanitarios concentran el metano y lo queman mediante una antorcha, el objetivo principal es la liberación de los gases y quemarlos de forma segura y controlada, así se evita la emisión directa a la atmósfera. La eficacia de la

combustión puede llegar hasta un 98% basándonos en las pruebas de laboratorio realizadas por EPA (Agencia de protección ambiental de Estados Unidos).



Figura 1.3 Antorcha

Fuente: EMISON, 2014

En Pichacay, se utiliza la antorcha cuando el metano es de baja calidad; es decir, tiene un porcentaje bajo de CH_4 o al existir oxígeno, ya que no se puede usar para la generación de energía como también cuando el motor generador se encuentra en mantenimiento o paralizado.

Para determinar si el metano es de mala calidad, se utiliza un bioprocesador, este es un equipo que limpia el gas, elimina cierto porcentaje de humedad y mide los porcentajes de metano y oxígeno y siguiendo ciertos parámetros se va a dirigir a su respectiva combustión.

1.5 EMAC-BGP ENERGY

En el año 2012 la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca EMAC junto con la empresa Holandesa BGP ENGINEERS B.V se constituyeron para crear EMAC-BGP ENERGY COMPAÑÍA DE ECONOMÍA MIXTA CEM (EBE); su objetivo principal es el aprovechamiento y extracción del gas metano que se produce en el Relleno Sanitario de Pichacay para generar hasta 2 MWh de electricidad por medio de dos motores generadores, y así poder reducir la contaminación en aproximadamente 46000 toneladas de CO_2 equivalente a un año.

Se contrató a la empresa española GUASCOR, la construcción de los motores generadores, en el año 2009 hace su lanzamiento de su motor modelo SFGM 560 y en julio del 2017 comenzó a operar su primer motor en el Relleno Sanitario de Pichacay generando 840 kilovatios hora (kw/h) (El Mercurio, 2019) y en este año se instalará el segundo motor.



Figura 1.4 Motor Generador Guascor SFGM 560

Fuente: Dresser-Rand, 2015

1.6 GUASCOR

GUASCOR fue creada en el año 1966, esta empresa está dedicada al diseño, investigación y fabricación de sistemas de producción energética, siendo adquirida por el grupo Dresser Rand en 2011. GUASCOR ocupa un lugar de referencia mundial en el sector de la Generación distribuida, la Cogeneración y las energías renovables, es decir, la bioenergía. (Dresser Rand, 2015)

Motor GUASCOR SFGM 560. La serie de motores SFGM operan utilizando la tecnología de ciclo Miller con carburador electrónico, en la siguiente tabla se puede apreciar las características de estos modelos:

Tabla 1.2. Especificación técnica del motor SFGM GUASCOR

MOTORES DE GAS DE COGENERACIÓN								
Tipo	N° cil.	Cilind.	Motores			Grupos		
			1200 rpm kWb	1500 rpm kWb	1800 rpm kWb	1200 rpm/60Hz KWe	1500 rpm/50Hz Kwe	1800 rpm/60Hz Kwe
SFGM 560	16V	56,3	-	1055	1100	-	1025	1065

Fuente: Guascor Power, 2015

Estos motores son una evolución de los mismo en su versión diésel, GUASCOR POWER ha aplicado soluciones adecuadas siguiendo algunos principios de la eliminación o reducción de riesgos en el diseño y fabricación del motor, adoptando medidas de protección para cuando sea necesario frente a los peligros que no se van a poder eliminar, también se debe informar a los usuarios de los riesgos residuales debido a la poca eficacia en las medidas de protección.

En la siguiente tabla, se puede observar las características principales del motor generador que se usa en el Relleno Sanitario de Pichacay.

Tabla 1.3. Características técnicas del Motor Generador GUASCOR SFGM

SIEMENS	
Fabricante / <i>Manufacturer</i>	SIEMENS ENGINES S.A.U
Número de serie / <i>Serial number</i>	340.109
Año de fabricación / <i>Year of manufacturing</i>	2019
Potencia nominal / <i>Rated power</i> (kWe)	1060
Factor de potencia / <i>Rated power factor</i>	1
Altitud máxima de instalación (m)	500
Temperatura ambiente máxima (C°)	25

Frecuencia / <i>Rated frequency</i> (Hz)	60
Tensión nominal / <i>Rated voltage</i> (V)	480
Intensidad nominal / <i>Rated current</i> (A)	1275
Peso / <i>Mass</i> (Kg)	10200
Clase de funcionamiento / <i>Performance Class</i>	62
<i>Manufactured By Siemens Engines S.A.U 20759</i>	
<i>Zumaia, Gipuzkoa, Spain</i>	

Fuente: Siemens, 2017

El motor posee un sistema de mando seguro y fiable, con accionamientos claramente visibles, en donde se pueden identificar fácilmente, también posee un sistema de alarma, dispositivos de parada normal y de emergencia.

En los motores se tienen riesgos: mecánicos, eléctricos, por temperatura extrema, incendio o explosión, en los que se debe adoptar medidas para no sufrir daños en el motor o inclusive daños físicos, ya sean heridas por contacto o a distancia con piezas o materiales de alta temperatura.

Otro factor que se debe tomar muy en cuenta es el ruido, ya que la producción de este es inherente e inevitable al propio motor en general. La protección acústica de los trabajadores en el cuarto de máquinas con los motores en servicio es de obligada necesidad; es decir, que se debe indicar a la entrada del cuarto de máquinas el uso de protección acústica. Para esto se debe tener una protección individual y sobre todo homologada que se encuentre disponible en el mercado.

En cuanto al ruido externo a la sala de máquinas se recomienda instalar silenciadores de escape convenientes para el cumplimiento de las normas locales o de entorno en el lugar donde se instalen los motores.

Los gases del escape de un motor de combustión interna son tóxicos y pueden producir daños o incluso hasta la muerte. Todas las instalaciones de los motores deben estar

equipadas con un adecuado sistema de tuberías de escape de modo que los gases procedentes de la combustión puedan salir fácilmente al exterior sin causar ningún daño. Para los lugares cerrados deben tener una buena y correcta ventilación, y contar con un suministro constante de aire exterior.

Una precaución que se debe tomar muy en cuenta es que, si un motor ya ha sido girado varias veces sin conseguir que se prenda, se debe cerrar la llave de paso de gas y seguir girando el motor hasta que expulse todo el gas no quemado que ha quedado acumulado en los cilindros, si no se toma en cuenta esta recomendación, una bujía podría inflamarse y causar una explosión.

La ventilación de la sala de máquinas, debe cumplir con dos funciones fundamentales:

- Garantizar la condición ambiental que permita funcionar al motor y equipo con el adecuado nivel de rendimiento.
- Proporcionar una condición ambiental lo más confortable posible a las personas que deben operar en el cuarto.

Se debe tomar en cuenta que los motores GUASCOR deben tener un sistema de refrigeración capaz de disipar la energía térmica que producen durante su funcionamiento.

A continuación, se muestra un ejemplo de un circuito de refrigeración de un motor.

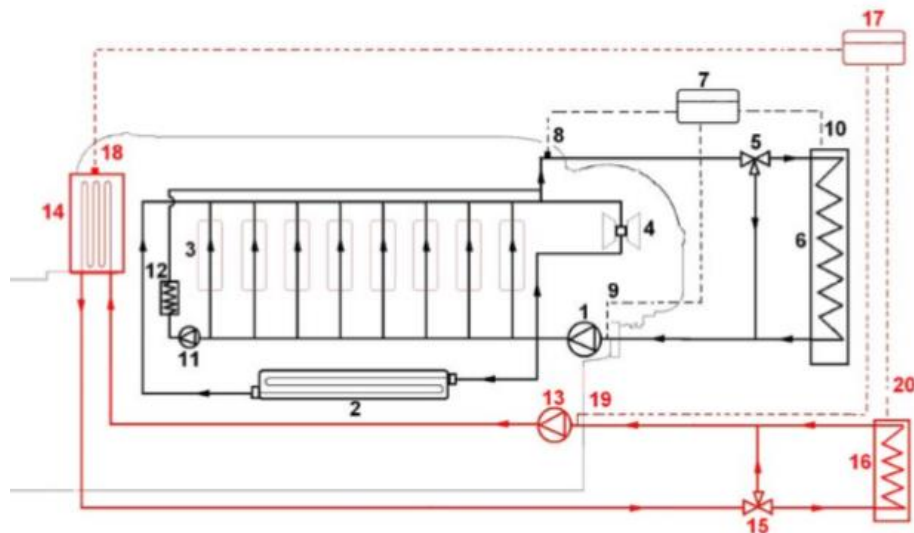


Figura 1.5 Motor con doble circuito de refrigeración

Fuente: Dresser Rand, 2015

1. Bomba de impulsión de agua.
2. Refrigerador de aceite del circuito principal.
3. Bloque motor, camisas y culatas.
4. Cuerpo cojinetes turbocompresor.
5. Regulador de temperatura del circuito principal.
6. Sistema de refrigeración externo al motor del circuito principal.
7. Depósito de expansión del circuito principal.
8. Tubería de venteo en el punto más alto del motor del circuito principal y purgador de agua del motor.
9. Tubería de venteo en la entrada de la bomba principal.
10. Tubería de venteo en el punto más alto del sistema de refrigeración externo al motor del circuito principal.
11. Bomba auxiliar de precalentamiento de agua.
12. Resistencia de precalentamiento de agua.
13. Bomba de impulsión de agua del circuito auxiliar.
14. Refrigerador de aire o de mezcla aire/combustible.
15. Regulador de temperatura circuito auxiliar.
16. Sistema de refrigeración externo al motor del circuito auxiliar.
17. Depósito de expansión circuito auxiliar.
18. Tubería de venteo en el punto más alto del motor del circuito auxiliar y purgador de agua del motor.
19. Tubería de venteo en la entrada de la bomba del circuito auxiliar.
20. Tubería de venteo en el punto más alto del sistema de refrigeración externo al motor del circuito auxiliar.

(Dresser Rand, 2015)

1.7 Generación de Energía

Para poder utilizar el metano como fuente de energía, se requiere de un largo proceso, en el cual consiste de una extracción a través de pozos, pasando por un bioprocesador para su respectiva extracción, tratamiento y compresión de biogás para luego ser llevado hacia los motores generadores de energía, el cual tiene como finalidad

alimentar a la red de distribución eléctrica. En la siguiente imagen se puede apreciar dicho proceso.



Figura 1.6 Esquema de Generación de Energía Eléctrica a partir de biogás

Fuente: Dirección Nacional de Regulación Técnica, 2019

Todo comienza en la red de extracción de gas, en el Relleno Sanitario de la EMAC se encuentran 60 pozos para la succión del metano, sin embargo solo 44 están activos en este momento debido a que 16 de ellos se cerraron, ya que en los mismos se produce muy poca cantidad de CH_4 , como también exceso de CO_2 . Además, se espera en este año conectar 5 pozos más.

En la siguiente imagen se puede observar la red de distribución del Relleno Sanitario de Pichacay, cada círculo amarillo representa a los pozos; las líneas amarillas, azules y rojas representan a las tuberías, estas se diferencian por sus diámetros. Sumando la longitud de todas las tuberías se tiene aproximadamente 3 kilómetros.

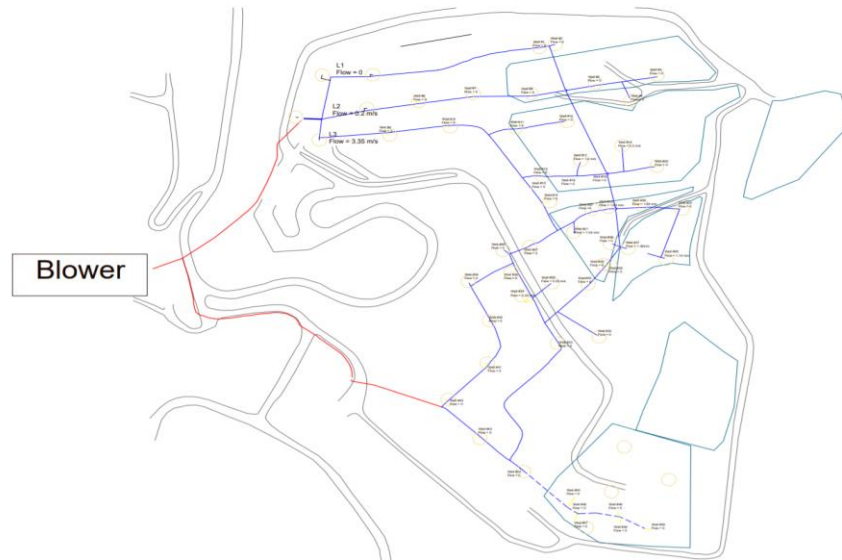


Figura 1.7 Red de Distribución de Pozos del Relleno Sanitario de Pichacay

Fuente: EBE BGP Energy, 2019

La calidad del metano se evalúa en dos fases, la primera dentro de cada pozo y la segunda en el Bioprocesador o *Blower*.

Para definir qué calidad tiene el gas se verifica que cumpla ciertos parámetros:

- Metano (CH_4) $\geq 45\%$
- Dióxido de Carbono (CO_2) $\geq 40\%$
- Oxígeno (O_2) = 0%
- Ácido sulfhídrico (H_2S) $< 200\%$

En cada pozo se tienen dos válvulas de mariposa pequeñas para medir que se cumplan las condiciones ya dichas, además se cuenta con una válvula de regulación, su función es, como su nombre lo indica, regular la apertura de la válvula de acuerdo a como se encuentran las características del biogás. Si las condiciones del gas son óptimas se abre toda la válvula para que llegue al bioprocesador, pero si no cumple los parámetros se cierra hasta conseguir las características necesarias, sin embargo si después de haberse cerrado por un período de tiempo continúa siendo un gas de mala calidad, se la cierra totalmente y el pozo queda anulado.

El material de la red de distribución de pozos en un gran porcentaje es de polietileno de alta densidad, son resinas especiales para que resista al ataque químico como

también a las altas temperaturas que se producen dentro de los pozos; además, contiene acero inoxidable en lo que son tuberías y casa de máquinas.

La presión máxima normalmente de cada pozo es de 150 a 200 milibares, por lo que se manejan presiones muy bajas. El flujo total es generalmente de 420 m³/h.



Figura 1.8 Pozos ubicados en el Relleno Sanitario de Pichacay

Fuente: Autores

La segunda fase es el bioprocesador, su capacidad es de 1800 m³/h, este tiene cuatro tareas: La principal es la extracción del biogás, se succiona a una presión de -20 milibares. La segunda es la deshumidificación del gas, debido a que este viene con un alto porcentaje de humedad 80% y de temperatura puede alcanzar hasta los 70°C dentro del relleno se realiza la condensación del gas mediante un chiller o enfriador, obteniendo un gas seco, se reduce aproximadamente un 10% de humedad. La tercera tarea es el análisis del biogás para verificar si es apto o no apto para la generación de energía; es decir, si cumple con los parámetros ya expuestos anteriormente, en especial el metano y el oxígeno, y la cuarta tarea, aquí se tiene un *bypass* en donde desvía el gas hacia el motor o la antorcha para quemarlo, dependiendo de los resultados obtenidos del análisis.



Figura 1.9 Bioprocesador y antorcha del Relleno Sanitario de Pichacay

Fuente: Autores

Como siguiente fase es el motor, si el biogás cumple con todos los parámetros ya establecidos, este entra a los cilindros del motor donde se produce la admisión; la segunda fase es la compresión del gas; la tercera fase es la explosión mediante la bujía; y la cuarta fase salen los gases del motor mediante escapes.

Para la salida a los escapes, la tubería total cuenta con una longitud de aproximadamente 8 metros, además de contar con un silenciador. Todo el proceso genera aproximadamente 600°C , sin embargo, en su salida por las pérdidas que se producen solo llega hasta 350°C aproximadamente. Con este trabajo, se aprovechan estos gases residuales que se disipan en el medio ambiente para utilizar como secadores térmicos.

Para la generación de energía se mueve una bobina, lo que produce una excitación en los electrones y protones del generador, y así se genera 480 Voltios, esto se pasa a una subestación para llegar a producir 22000 voltios.

Se realiza la quema en la antorcha en tres escenarios: cuando se ve que el gas es de pésima calidad, si es así se verifica en cada uno de los pozos para saber el por qué se está teniendo estos resultados y se procede a calibrar con las válvulas de regulación

antes mencionadas; el segundo caso es cuando se tiene un exceso del biogás, debido a que solo se necesita 400 m³/h para generar 1 MWh de potencia con un motor generador; en este año se proyecta la empresa EBE ocupar entre 650 a 700 m³/h con los dos motores, funcionando cada uno al 70% y 80% respectivamente de su capacidad; y el tercer caso es cuando se realiza mantenimiento al motor.

CAPÍTULO II

SISTEMATIZACIÓN Y PROYECCIÓN DE LAS CANTIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE LAS PLANTAS DE AGUAS RESIDUALES DE ETAPA EP

Cada vez más, es la preocupación de cómo tratar a nuestros residuos para que no afecten al medio ambiente, por lo que los tratamientos de aguas residuales son factores muy importantes a considerar. En primer lugar, para la conservación del bienestar de cada pueblo y ciudad, y en segundo lugar para que en el momento de regresar a los ríos, sus características no le afecten ni lo deterioren de manera significativa.

2.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales se producen debido a la contaminación química de los residuos domésticos o urbanos, es decir, materia fecal y orina; residuos líquidos industriales; químicos, entre otros. Las aguas negras, llamadas así por su color, son recolectadas por el sistema de saneamiento o alcantarillado, estas pueden ser mezcladas con el agua lluvia, dependiendo del sistema y se conducen hasta la planta de tratamiento de aguas residuales o hasta su disposición final.

Existen varios factores para determinar la composición de las aguas residuales, debido a que en primer lugar dependen de su concentración, esto se determina por el consumo promedio de agua por habitante y por día, y en segundo lugar depende de los hábitos alimenticios de la población para así definir su calidad. Generalmente, las aguas negras contienen alrededor del 99,9% de agua y solo un 0,01% de materia sólida, este último está compuesto por materia orgánica y mineral. La materia orgánica proviene de la actividad del ser humano y la materia mineral proviene de los subproductos que se desechan día a día, así como también de las condiciones que presentan las aguas de abastecimiento. (Rojas, 2002)

2.2 Tratamiento de Aguas Residuales

A lo largo del tiempo se han ido desarrollando varios procesos para el tratamiento de las aguas residuales, estos pueden ser físicos, químicos y biológicos, o una combinación de ellos.

“El tratamiento de las aguas residuales es realizado con el propósito de evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica y radiactiva de los cursos y cuerpos de agua receptores.” (Rojas, 2002, p.9)

Sin embargo, se generan subproductos por el tratamiento de las aguas residuales, independientemente de la tecnología utilizada, estos son los lodos residuales, los cuales producen un costo extra para su manejo y disposición final, ya que pueden llegar a ser fuente de contaminación ambiental si estos no son tratados.

Cuenca es la primera ciudad del Ecuador en poseer una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicado en el sector de Ucubamba, en la provincia del Azuay, esta trata alrededor del 95% de las aguas residuales de la capital Azuaya.



Figura 2.1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Ucubamba

Fuente: ETAPA, 2007

La Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Saneamiento y Gestión Ambiental del cantón Cuenca (ETAPA EP) comenzó en el año de 1985 un proceso para restablecer la calidad de los cuatro ríos que atraviesan a la ciudad, así se inició la construcción de una PTAR y de una red de interceptores marginales. A partir de noviembre del 1999 empezó su funcionamiento; la planta está constituida por Lagunas de Estabilización en dos series, cada una compuesta por una laguna aireada primaria, una laguna facultativa secundaria y una laguna de maduración terciaria. (Durazno & Díaz, 2009)

Se debe destacar además que Cuenca tiene un sistema de alcantarillado combinado; es decir, se transporta por la red de tuberías, las aguas residuales urbanas e industriales, como también el agua pluvial hacia la estación depuradora de Ucubamba.

Debido a que la vida útil de la actual PTAR está acercándose a su fin en un par de años más, y con el crecimiento y desarrollo de los sectores de la ciudad ha llevado a la necesidad de ampliar el área de servicio hacia nuevos lugares, por lo que ETAPA EP ha previsto la construcción de un nuevo sistema de depuración de agua, en el sector de Guangarcucho, este recibirá el exceso de caudal de Ucubamba de las zonas Nulti y Challuabamba, y de las industrias aguas abajo de la actual PTAR.

2.3 Lodos Residuales

Los lodos o fangos son subproductos generados en las lagunas de las PTAR resultado del tratamiento biológico de las aguas residuales que son los remanentes de las rejillas, desarenadores y sedimentadores.

Si no se tienen una forma para su manejo, pueden provocar un gran impacto al medio ambiente como también a la salud de los seres humanos, por esta razón se consideran residuos peligrosos. No obstante, si estos no contienen sustancias tóxicas se pueden aprovechar como compostaje.

Se puede definir a los fangos como:

Residuos sólidos remanentes de los procesos de tratamiento de aguas residuales, cuya composición se basa en materia orgánica no descompuesta,

microorganismos patógenos, compuestos no biodegradables y/o potencialmente tóxicos como metales pesados y sales inocuas que han sido removidas de los procesos de tratamiento de agua.

(Ortiz, Gutiérrez, & Sánchez, 1995, p.106)

ETAPA EP maneja aproximadamente 220000 m³ de lodos residuales, por lo que la PTAR de Ucubamba realiza cinco procesos para deshidratar sus lodos desde el momento que son extraídos de cada una de las lagunas, los cuales son: extracción, transporte, bombeo, espesamiento y deshidratación.

La línea de proceso adoptada, se encuentra constituida por:

- Extracción y bombeo inicial de lodos sedimentados mediante un sistema de dragas.
- Recolección y transporte de lodos mediante un sistema de tuberías situadas en la periferia de las lagunas aireadas y facultativas.
- Bombeo de lodos recolectados desde estaciones auxiliar y principal.
- Tamizado de lodos en canales de cribado.
- Espesamiento de lodos en dos unidades de gravedad.
- Bombeo de lodos espesados
- Acondicionamiento del lodo mediante dosificación de polielectrolito.
- Deshidratación en filtros de banda.
- Bombeo de lodos deshidratados a silo.
- Almacenamiento de lodos deshidratados en silo.
- Sistemas auxiliares de bombeo de agua, redes de aire comprimido, pesaje de camiones.
- Sistemas de mando, monitoreo, control y fuerza.

(ETAPA, 2007)

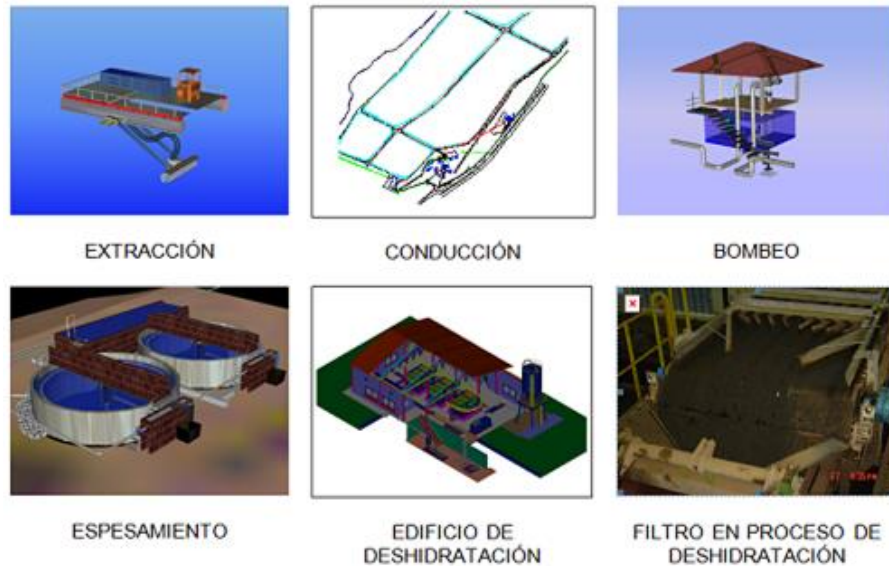


Figura 2.2 Diagrama de procesos del sistema de extracción y deshidratación de lodos

Fuente: ETAPA, 2007

2.4 Convenio entre ETAPA EP y EMAC EP

A partir del 2014 se celebra el convenio entre la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca EMAC EP y la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA EP, con el objetivo de garantizar por ambas partes una adecuada disposición de los lodos deshidratados generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, como también de los lixiviados producidos en el Relleno Sanitario de Pichacay.

El contrato declara que ETAPA EP debe entregar 50 m³ diarios de lodos deshidratados al Relleno Sanitario con una humedad aproximada del 70%, tal como está establecido en el TULAS, y a partir del 2022 recogerá 80 m³ provenientes de la planta de aguas residuales de Guangarcucho. Mientras que EMAC EP suministrará los lixiviados para que estos sean atendidos en Ucubamba, sin embargo, existen varios problemas que ocasionan los lodos residuales al relleno sanitario, es por ello que esta investigación trata de buscar una metodología para reducir su humedad mediante un secado térmico gracias a la energía calórica que producen los motores generadores de energía que se encuentran en la planta de biogás en Pichacay.

2.5 Factores que afectan la disposición de los lodos al Relleno Sanitario

Debido a que los lodos deshidratados contienen un alto porcentaje de agua, alrededor del 70%, generan varias dificultades a la hora de introducirlos en el relleno sanitario. Uno de los más importantes es la desestabilización de los taludes en el Relleno, gracias a su contenido de humedad tienden a que las terrazas del relleno se derrumben; el segundo es la rehidratación que poseen, ya que si llueve y el lodo está esparcido por el relleno para su secado, no perdiera nada de agua y al contrario obtuviera más; otro problema que ocasiona es que su volumen es alto, por lo que no existe la suficiente superficie para su colocación.

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (2015) en su Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, TULAS, el máximo porcentaje que se debe colocar dentro del Relleno Sanitario es del 70%, por lo que buscar una manera aplicable a nuestra realidad para el secado de los lodos es indispensable.

Existen algunos factores que afectan al secado de los lodos, estos influyen principalmente en la actividad de secado y la pérdida de humedad, como por ejemplo:

2.5.1 Temperatura

La temperatura que se requiere para este secado va a constar de dos etapas, en la primera etapa la temperatura tiene que ser relativamente baja, esta va a servir para la evaporación en la superficie del fango y posteriormente elevada en la segunda etapa para que esta pueda evaporar el agua que tiene en el interior del capilar. Es muy difícil llegar a realizar este sistema de secado.

Sin una cámara de secado se dependería únicamente de la radiación solar, ya que no se va a poder regular la temperatura con la que es necesario secar estos lodos, por lo que al momento de llegar los lodos al relleno sanitario estos son tendidos a lo largo del terreno con el fin de reducir su volumen y estos puedan tener un secado natural y que la radiación solar llegue al interior de ellos.

2.5.2 Humedad

Los lodos antes de llegar al relleno sanitario pasan por un proceso para deshidratarlos, y a estos poderlos llevar a la planta de Pichacay, lo que hace la empresa ETAPA es un secado físico, se les deshidratan mediante un sedimentador, el agua que queda excedente se las devuelve a las lagunas, los silos ayudan a que el agua vaya por una dirección y luego se les coloca polímeros, estos son químicos que aglutinan las partículas para vencer la resistencia, luego de que se junten las partículas estos van a unos filtros banda que aplastan mediante unos rodillos el lodo, entonces el sólido se queda adherido a la banda, el líquido sale por los lados y en la banda quedan los lodos que van a ser llevados al relleno sanitario, mediante este proceso llegan a una humedad aproximada del 70%.

Este proceso que realiza ETAPA EP para la deshidratación de lodos no es suficiente, por lo que causa problemas al relleno sanitario, por este motivo es de interés tanto de ETAPA EP como de EMAC EP aprovechar el calor de los motores y secarlo térmicamente a los lodos.

2.6 Formas de secado de lodos

En la actualidad existen varias formas de secado de lodos, ya sea físicamente, mecánicamente o químicamente.

2.6.1 Invernadero

Este proceso es bien visto en algunos países, ya que es una opción donde se va a utilizar una energía gratuita, alternativa e inacabable como es la energía solar. Una de las ventajas del invernadero con respecto a los demás métodos de secado es su baja inversión al momento de implementarlo, un bajo costo de producción.

La estructura que va albergar el lodo puede ser de diferentes dimensiones según lo que cada empresa requiera, en donde se va a depositar el lodo, puede ser construido con láminas de acrílico, este tipo de modelo va a aumentar la temperatura del lecho en donde se encuentran los lodos con la ayuda del diseño del invernadero.



Figura 2.3 Invernadero para secado solar de lodos de última generación

Fuente: Interempresas, 2016

El invernadero está constituido por un plástico de polietileno, se le añade una malla en la cual no permite la circulación del aire por el efecto de la velocidad del viento, así se evita usar extractores de aire, esto va a depender de la zona en donde se realice este invernadero.

2.6.2 Cámara de secado

Esta opción es una de las más utilizadas en algunos países, especialmente en el continente europeo, con el fin de secarlos de manera rápida y así optimizar el tiempo y espacio.

Este proceso es un secado térmico de lodos, es considerado como uno de los procesos más eficientes y seguros del mercado, consiste en obtener un lodo final con una humedad menor al 10%.

A diferencia de otros métodos este es un poco más costoso, pero su rendimiento es mejor que cualquiera, sin embargo va a necesitar mantenimiento a lo largo del tiempo; por lo general se utilizan temperaturas de 80 a 100 °C.



Figura 2.4 Unidad de Tratamiento de Lodos en Loeches

Fuente: Canal de Isabel II, 2018

2.6.3 Mezcla de materiales

Uno de los principales intentos o soluciones que se da para el secado de los lodos es mezclarlos con diferentes tipos de materiales para que no sea tan costoso, lo fundamental es mezclar con cal, para poder elevar así su pH, con el fin de que los microorganismos no mantengan sus funciones metabólicas.

Mientras los lodos mantengan su valor de pH no van a emanar malos olores. La cal puede ser utilizada previo a un proceso de deshidratación, se lo puede agregar tanto cal viva como cal hidratada.

2.7 Características principales de los lodos provenientes de la PTAR de Ucubamba

A continuación, se presentan varias características que son importantes para tener una idea más amplia de lo que constituyen los lodos residuales.

2.7.1 Contenido de humedad

Se puede definir como “El contenido de humedad (w) también se conoce como contenido de agua y se define como la razón del peso de agua al peso de los sólidos en un volumen dado de suelo.” (Braja M. Das, 2014)

Para la determinación de la humedad de los lodos de la planta de aguas residuales de ETAPA EP se utilizó la siguiente fórmula que se obtuvo del libro “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, en donde la humedad se va a expresar en porcentaje:

$$\%W = \frac{(B - A) - (C - A)}{(B - A)} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde,

A = Peso del tarro

B = Peso del tarro + muestra del suelo húmeda

C = Peso del tarro + muestra del suelo seca

El Relleno Sanitario de Pichacay recibe a diario 5 volquetas de 10 m³ que contienen lodos residuales provenientes de la Planta de Aguas Residuales de Ucubamba, en los siguientes horarios: 08:00, 10:30, 12:30, 14:30 y 16:30. Por esta razón, se realizó un muestreo durante dos semanas recogiendo los fangos a distinta hora cada día para obtener una mayor proximidad a la humedad que contienen. A continuación, se resume el porcentaje de humedad por día:

Tabla 2.1 Porcentaje de Humedad por día

Lunes 02/marzo/2020				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,73	51,18	37,88	65,04
2	30,38	43,25	34,9	64,88
3	30,56	44,81	35,57	64,84

4	30,02	48,89	36,64	64,92
5	30,61	45,16	35,87	63,85
PROMEDIO				64,71
Martes 04/marzo/2020				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,75	54,78	39,09	65,29
2	30,33	64,06	42,12	65,05
3	30,74	62,22	41,71	65,15
4	30,61	50,33	37,5	65,06
5	29,84	59,79	40,46	64,54
PROMEDIO				65,02
Miércoles 05/marzo/2020				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,7	50,14	37,36	65,74
2	30,36	50,12	37,13	65,74
3	30,53	55,81	39,22	65,63
4	30	52,09	37,57	65,73
5	30,64	54,95	38,97	65,73
PROMEDIO				65,71
Jueves 06/marzo/2020				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,71	60,78	41,26	64,92
2	30,37	64,87	42,36	65,25
3	30,55	57,18	39,82	65,19
4	30,01	52,57	37,89	65,07

5	30,65	58,79	40,43	65,25
PROMEDIO				65,13
Viernes 07/marzo/2020				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,76	50,45	37,73	64,6
2	30,32	64,71	42,51	64,55
3	30,74	65,98	43,3	64,36
4	30,25	54,77	38,88	64,8
5	29,95	57,54	39,68	64,73
PROMEDIO				64,61
Lunes 09/marzo/2020				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,77	67,88	43,5	65,7
2	30,37	62,51	41,38	65,74
3	30,55	66,22	42,75	65,8
4	30,02	70,25	43,78	65,8
5	30,64	56,39	39,49	65,63
PROMEDIO				65,73
Martes 10/marzo/2020				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,79	67,76	43,94	64,43
2	30,31	65,45	42,89	64,2
3	30,73	56,89	39,97	64,68
4	30,26	61,73	41,38	64,66
5	29,94	68,95	43,85	64,34

				PROMEDIO	64,46
Miércoles 11/marzo/2020					
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %	
1	30,77	74,65	45,67	66,04	
2	30,3	78,86	46,97	65,67	
3	30,77	75,45	45,97	65,98	
4	30,28	81,83	47,82	65,97	
5	29,93	81,84	47,68	65,81	
				PROMEDIO	65,9
Jueves 12/marzo/2020					
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %	
1	30,68	86,18	49,89	65,39	
2	30,34	78,67	46,82	65,9	
3	30,66	88,99	50,85	65,39	
4	30,26	96,67	53,16	65,52	
5	29,81	100,36	54,16	65,49	
				PROMEDIO	65,54
Viernes 13/marzo/2020					
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %	
1	30,4	60,56	41,2	64,19	
2	30,88	73,89	45,63	65,71	
3	30,77	61,53	41,63	64,69	
4	30,36	71,23	45,36	63,3	
5	29,95	69,53	43,59	65,54	
				PROMEDIO	64,69

PROMEDIO TOTAL	65,15
-----------------------	--------------

Fuente: Autores.

El porcentaje de humedad que contienen los lodos es aproximadamente del 65,15%.

2.7.2 Características Químicas

En abril del 2019 se realizó una consultoría por parte de la Empresa Greeley and Hansen para revisar la calidad de los lodos deshidratados en el PTAR de Ucubamba y el PTAR de Guangarcucho. A continuación, se presenta la tabla 5, en la cual se muestra las características químicas de los lodos residuales.

Tabla 2.2 Características generales de los lodos residuales en Ucubamba

PARÁMETROS	UNIDAD	PROMEDIO G&H 2019
PARÁMETROS FÍSICOS		
DENSIDAD	g/cm	1,03
PARÁMETROS QUÍMICOS		
pH		8,09
PODER CALORÍFICO	J/g	3387,73
SÓLIDOS TOTALES	%	22,83
SÓLIDOS FIJOS	%	49,33
SÓLIDOS VOLÁTILES	%	20,67
N. AMONICAL	g/Kg	1,17
N. ORGÁNICO	g/Kg	0,24
N. KJELDAHL	g/Kg	1,41
NITRATOS	g/Kg	0
FÓSFORO TOTAL	g/Kg	0,33
FÓSFORO REACTIVO	g/Kg	0,07
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	g/Kg	75,09
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	g/Kg	7,68

PARÁMETROS BIOLÓGICOS		
COLIFORMES TOTALES	NMP/g	1,67E+06
E. COLI	NMP/g	5,74E+04

Fuente: Greeley and Hansen, 2019

Así mismo, ALS Ecuador realizó un muestreo de los fangos acerca de los metales y patógenos que contienen. A continuación se presenta la siguiente tabla.

Tabla 2.3 Caracterización de metales y patógenos del lodo en Ucubamba, obtenidos del muestreo realizado por ALS Ecuador

PARÁMETROS ANALIZADOS	UNIDADES	CONCENTRACIÓN
ARSÉNICO	mg/kg	2,51
CADMIO	mg/kg	2,69
CROMO TOTAL	mg/kg	165,8
COBRE	mg/kg	106,2
PLOMO	mg/kg	64,1
MERCURIO	mg/kg	0,13
NÍQUEL	mg/kg	30,5
ZINC	mg/kg	1008,2
COLIFORMES FECALES	NMP/g	460000
SALMONELLA	NMP/g	0
HUEVOS DE HELMINTOS	huevos/g	<1

Fuente: Greeley and Hansen, 2019

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN, APLICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA Y PROCESOS TÉCNICOS PARA CALCULAR LA CANTIDAD DE ENERGÍA NECESARIA PARA DESHIDRATAR LOS LODOS UTILIZANDO EL CALOR REMANENTE, APLICABLES EN NUESTRA REALIDAD

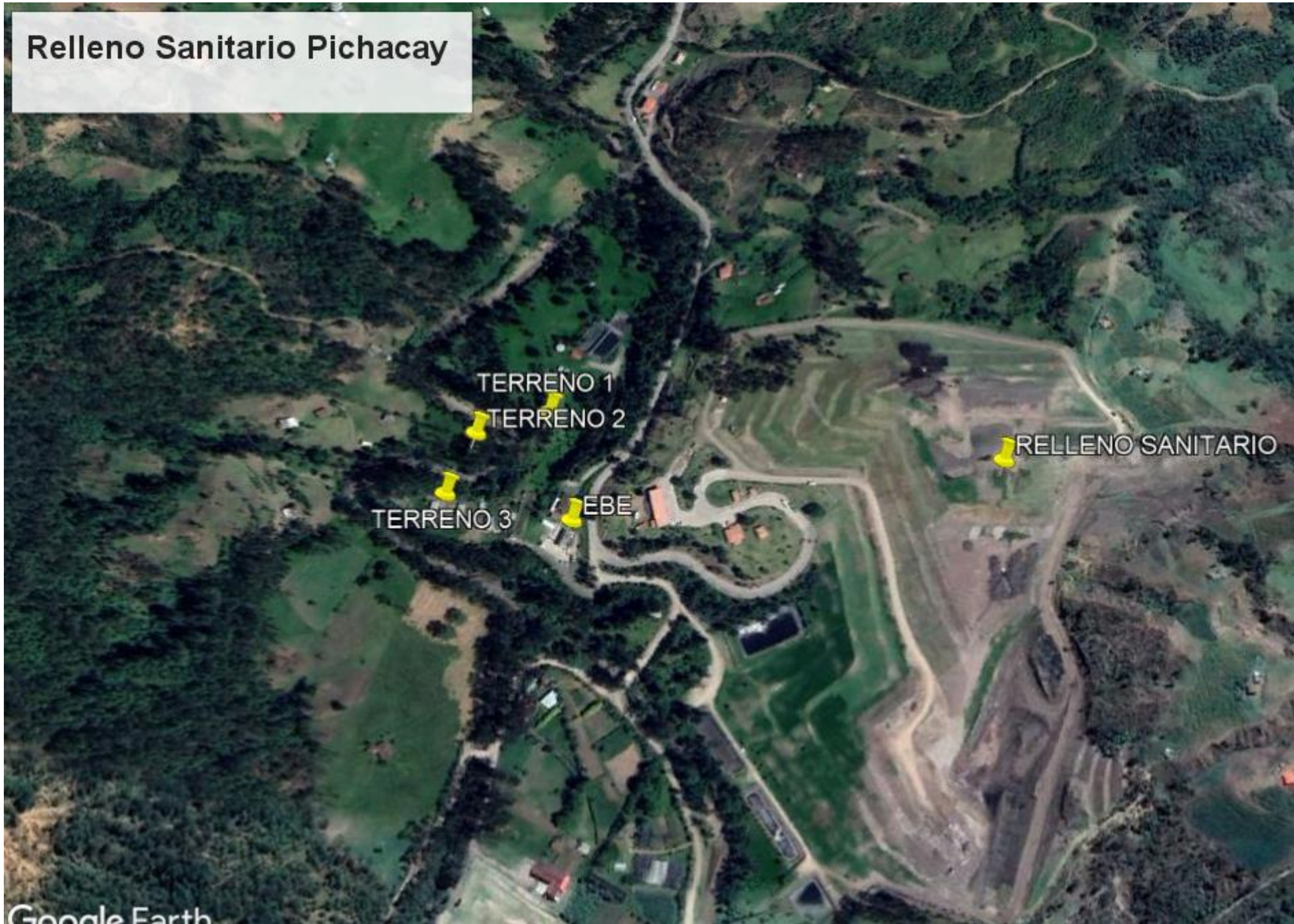
Existen varias metodologías para el secado de los lodos a base de calor, desde secarlos por los rayos solares hasta hornos de secado con un nivel tecnológico alto, todo esto depende de la factibilidad económica como también de la producción de los lodos que exista. En este capítulo se presentan varios tipos de secado térmico, como también el lugar en donde se puede llevar a cabo y los principales datos de los motores generadores para poner en marcha la deshidratación de los fangos como son: temperatura, flujo y presión.

3.1 Ubicación

El Relleno Sanitario de Pichacay, cuenta con un área aproximadamente de 123 hectáreas (Galarza, Parra & Vásquez, 2013), por lo que implantar una planta de secado en el área no genera ninguna dificultad, sin embargo, se debe tener en cuenta que se encuentre lo más cerca posible de la planta de biogás, de esta manera el porcentaje de pérdida de calor térmico no disminuirá significativamente.

Para la ubicación de la planta de secado de los lodos residuales, se proponen 3 lugares relativamente cercanos a la planta de biogás EBE, en donde puede ser posible la implantación de la misma. A continuación se puede apreciar a qué longitud se encuentra cada uno de EBE.

Relleno Sanitario Pichacay



Se puede observar la topografía de los terrenos para elegir el más óptimo y con mayor facilidad de construcción evitando la tala excesiva de árboles que se encuentran alrededor.

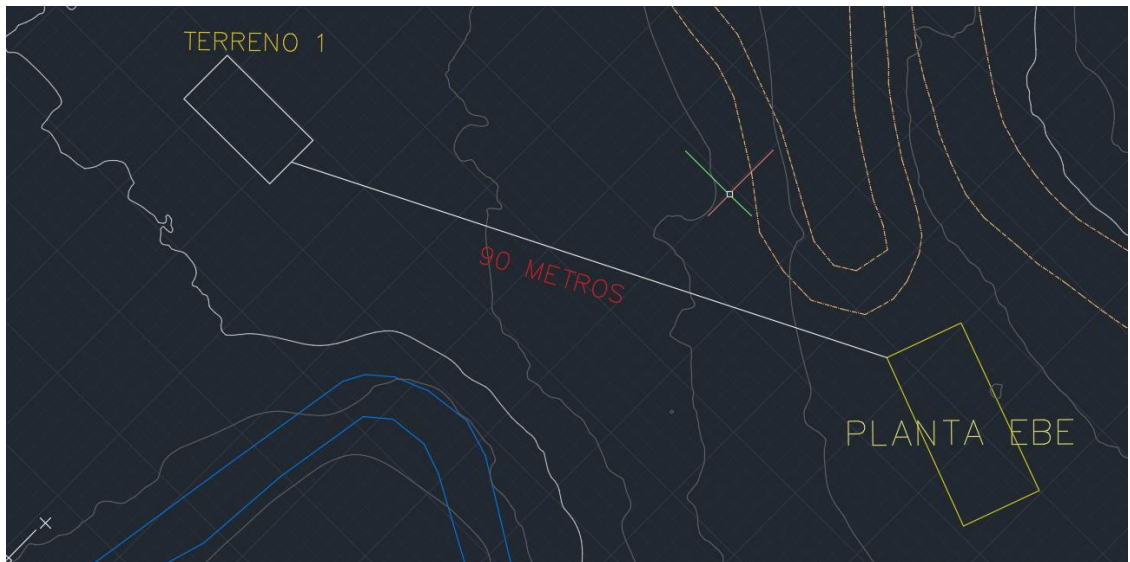


Figura 3.2 Vista topográfica del Terreno 1

Fuente: Autores

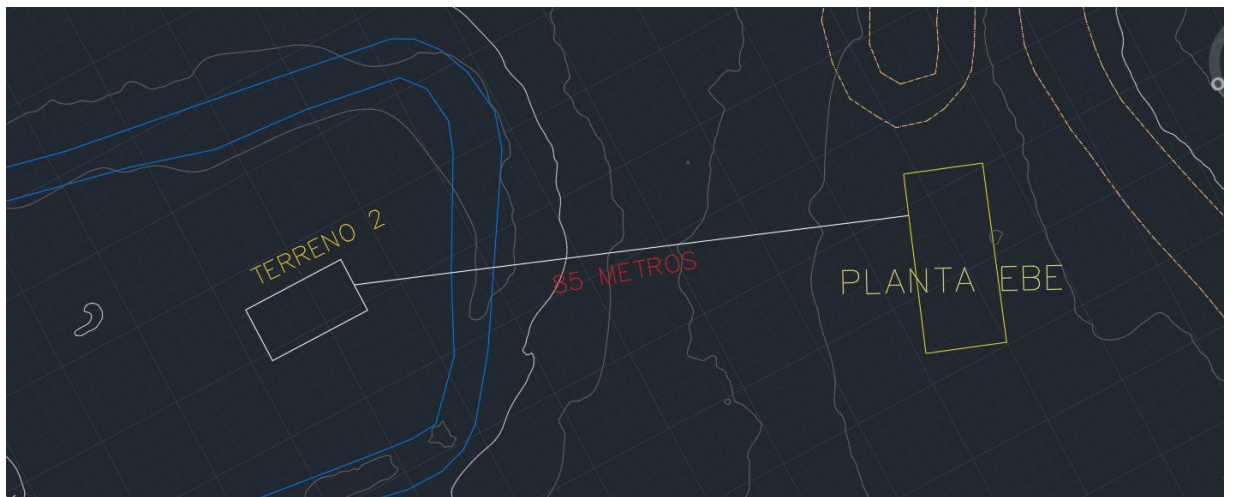


Figura 3.3 Vista topográfica del Terreno 2

Fuente: Autores



Figura 3.4 Vista topográfica del Terreno 3

Fuente: Autores

Para la selección óptima del terreno se utiliza el siguiente método: en una tabla se colocan las variables que se consideran las más importantes con sus pesos, los pesos significan que tan importante es esa variable para la selección, al sumar todos los pesos estos deben dar 1.

Se colocan los terrenos a elegir y se califican si cumplen o no con cada variable, se puede colocar desde 0 hasta 5, después se multiplican por el peso de la variable y se suman, el que tiene más valor es el más óptimo.

Tabla 3.1 Selección óptima del terreno

Variables	Peso	Terreno 1	Total	Terreno 2	Total	Terreno 3	Total
Vías de Acceso	0.5	5	2.5	1	0.5	3	1.5
Topografía	0.25	5	1.25	5	1.25	5	1.25
Espacio disponible	0.15	5	0.75	5	0.75	3	0.45
Seguridad de la zona	0.1	4	0.4	5	0.5	4	0.4

TOTAL	1		4.9		3		3.6
--------------	---	--	-----	--	---	--	-----

Fuente: Autores

Mediante este análisis se puede observar que el terreno 1 es el lugar que mejor condición presenta para las variables impuestas. A continuación, se presenta la figura 3.4 que hace referencia al terreno 1.



Figura 3.5 Terreno donde se localizará la planta de secado

Fuente: Autores.

Una vez que se elige el lugar donde va a estar situada la planta de secado se expondrán qué métodos de secado de lodos, aprovechando el calor remanente del escape de los motores generadores de biogás, son los más óptimos para aplicar en el relleno sanitario de Pichacay.

3.2 Modelos para el secado de lodos deshidratados

3.2.3 Secado de lodos por medio de bandas transportadoras

Las cintas transportadoras son utilizadas para transportar, elevar o distribuir grandes toneladas de material hacia otro punto, la capacidad puede ser de varias toneladas por

hora y la distancia puede ir hasta varios metros. La trayectoria va a depender de la necesidad, puede ir de forma horizontal, inclinada o una combinación de las dos.

Los materiales que pueden ser llevados por estas bandas pueden ser vegetales, combustibles, minerales, materiales para la construcción, entre otros; con la única condición de que la temperatura de trabajo no sea tan alta como para quemar la superficie de la banda.

La banda transportadora funciona cargando el material sobre una cinta continua, la cual va a transportar el material de un punto A a un punto B.

La capacidad de las bandas transportadoras por cinta va a depender del ancho de la cinta, de la velocidad empleada y de las características del material que se va a transportar. (Astudillo y Bermeo, 2011)

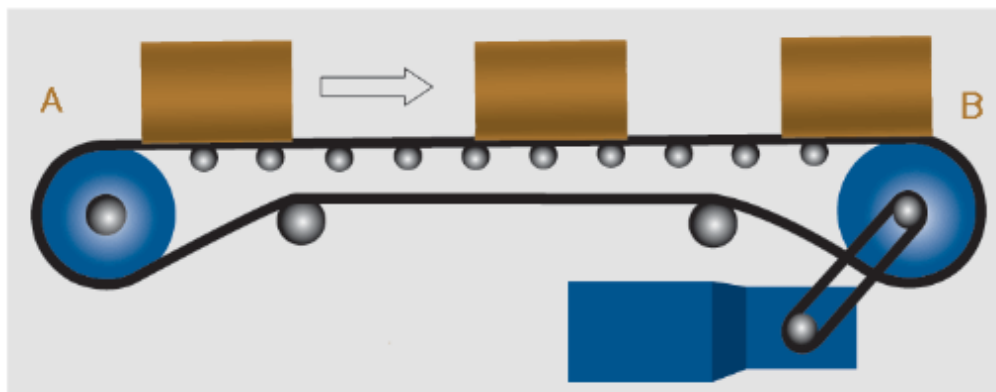


Figura 3.6 Transporte en bandas

Fuente: Astudillo y Bermeo, 2011

Las dos principales ventajas que tienen las bandas transportadoras son: la gran velocidad con la que va y que puede llegar a transportar grandes longitudes. Además, que no altera el producto transportado, se adapta al lugar y se lo puede mover.

3.2.3.1 Elementos de una banda transportadora

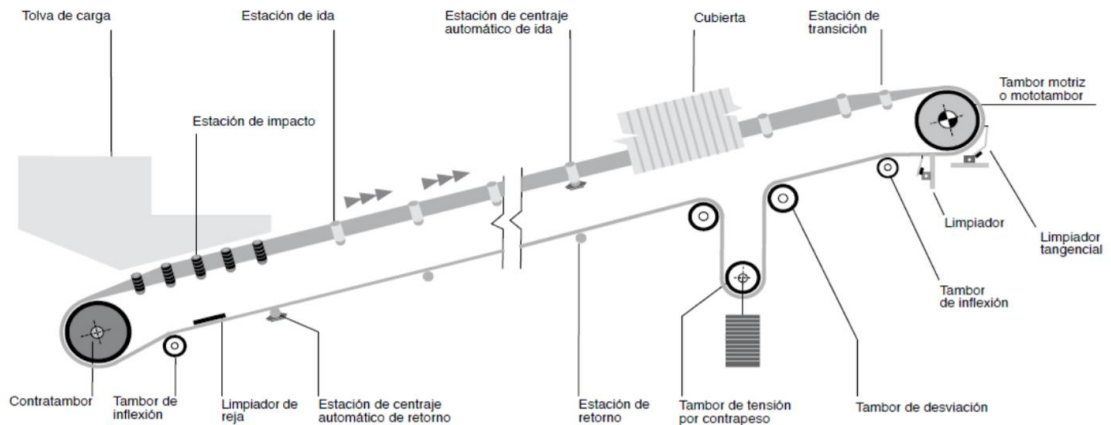


Figura 3.7 Elementos principales de una banda transportadora

Fuente: Salinero, 2013

Por lo general un transportador de bandas consta de las siguientes partes:

1. Tolva de carga.
2. Estación de impacto.
3. Estación de ida.
4. Estación de centraje automático de ida.
5. Cubierta.
6. Estación de transición.
7. Tambor motriz o mototambor.
8. Limpiador tangencial
9. Limpiador
10. Tambor de inflexión
11. Tambor de desviación.
12. Tambor de tensión por contrapeso
13. Estación de retorno.
14. Estación de centraje automático de retorno.
15. Limpiador de rejilla
16. Tambor de inflexión.
17. Contratambor.
18. Cinta transportadora.

(Salinero, 2013)

3.2.3.2 Tipos de transportadores por bandas

Existen dos tipos de transportadores por banda, dependiendo de lo que se vaya a transportar se toma la decisión del transportador a utilizar.

Transportador de banda plano: Sirve para transportar paquetes o materiales a granel que tengan definida su trayectoria y a una velocidad propuesta.



Figura 3.8 Transportador de banda plano

Fuente: Pastor, 2019

Transportador de banda en canal: Se utiliza principalmente para el transporte de materiales a granel, como por ejemplo: cemento, arena, carbón, lodo, entre otros. El material puede estar seco o húmedo.



Figura 3.9 Transportador de banda en canal

Fuente: Salinero, 2013

3.2.3.3 Materiales de las bandas transportadoras

Existen varios tipos de materiales para las cintas, esto depende del uso que se vaya a aplicar, pueden ser de: pvc, caucho, poliéster, fibra de vidrio, algodón, etc.

Debido a que las bandas deben soportar altas temperaturas, diferentes compañías productoras de cintas transportadoras utilizan materiales que resistan térmicamente para que no se desgasten, como principales son el caucho, fibra de vidrio y el teflón.

Además, se debe tener en cuenta que para elegir el material este debe resistir también a los agentes químicos, ya que como se destacó en el capítulo II los lodos residuales poseen metales pesados.

De acuerdo a varias empresas, el caucho puede resistir temperaturas constantes de hasta 200°C, la fibra de vidrio hasta 260°C y el teflón hasta 1200°C.

3.2.4 Secado de lodos por medio de un horno sin fin

Un tornillo sin fin es un sistema que está formado, como su nombre lo indica, por un tornillo dentado helicoidal, comúnmente engranado a una rueda dentada y de esta forma transmite el movimiento entre ejes generalmente perpendiculares entre sí. En

este caso, en vez de un engranaje se utiliza un motor, el cual está anclado a un tornillo, este transporta el material lentamente y al mismo tiempo realiza un constante mezclado. Como la única pieza que se mueve es la espiral, el costo de instalación es menor y su eficiencia es mayor, ya que no tiene muchos puntos de fricción.

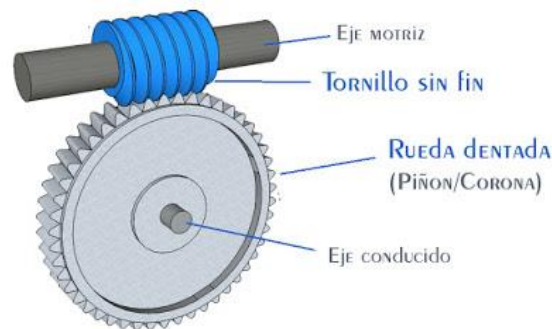


Figura 3.10 Tornillo sin fin

Fuente: Landín, 2018

Este modelo de secado es un sistema térmico-mecánico, debido a que se utiliza el calor que se genera en el horno mientras se van moviendo y mezclando los lodos con el tornillo sin fin. Para utilizar el horno sin fin los lodos deben tener un porcentaje de humedad menor a 85%.

Una principal ventaja es que el horno se encuentra montado sobre una estructura, por lo tanto se puede transportar a cualquier lugar si se desea.



Figura 3.11 Horno de secado

Fuente: Astudillo y Bermeo, 2011

Se compone de los siguientes elementos:

- Alimentación de lodos.
- Sistema mecánico y de transmisión.
- Horno.
- Sistema de aporte térmico.
- Extracción del material.
- Sistema de control.

(Astudillo y Bermeo, 2011)

3.2.4.1 Alimentación de lodos

La alimentación se realiza por medio de una bomba, está impulsa los lodos que se encuentran en un silo a lado del secador y los deposita en una tolva que se encuentra ubicada en la parte superior del sistema. Los tornillos sin fin distribuyen a los fangos por columnas de tratamiento, gracias a un motor reductor.

3.2.4.2 Sistema mecánico y de transmisión

Los lodos avanzan hacia el horno por medio de los sinfines. Para que se genere el giro se utilizan mecanismos reductores que transmiten el movimiento a las cajas de transmisión. Se puede variar la velocidad de los tornillos sin fin, ya que depende en qué fase del secado se encuentre el lodo como también de la calidad de los mismos.

3.2.4.3 Horno

Este es el elemento principal del sistema, se utilizan canaletas para que pueda avanzar los lodos con la ayuda de los tornillos sin fin. Para el secado de los fangos en el horno se producen por convección, gracias a los gases calientes que atraviesan el horno, y por conducción, debido al calentamiento que se producen en los tornillos. Existen tres fases de tratamiento para los lodos mientras se encuentran en el módulo; presecado, secado y estabilización; en las dos primeras fases es donde más porcentaje de humedad se pierde, mientras que en la tercera fase además de perder agua también se reduce la granulometría del material. (Astudillo y Bermeo, 2011)

3.2.4.4 Sistema de aporte térmico

Se pueden utilizar quemadores de gas natural o combustibles líquidos, para obtener temperaturas homogéneas en todo el ancho del horno, los quemadores deben ser de tipo lineal y llama corta, ya que de esta manera se reduce la cámara de combustión. Además, permiten la inyección de gases calientes como aire de dilución consiguiendo una reducción del consumo de combustible. También se puede trabajar con otros tipos de aporte térmico como gases de escape de motores de cogeneración, gases calientes, etc. (Astudillo y Bermeo, 2011)

3.2.4.5 Extracción del material

Una vez secado los lodos, se recoge el material de cada columna por sinfines y se depositan en una tolva al final del secador.

3.2.4.6 Sistema de control

Debido a que todo el sistema es automático, se tiene una centralita, la cual activa alarmas o paradas si se produce alguna anomalía.

3.3 Determinación de la metodología a aplicar

El proceso o método a emplearse es el secado térmico de los lodos que está basado en un proceso de convección de aire caliente a baja temperatura entre (65 - 80 °C) en un túnel continuo y cerrado, este método va a consistir en eliminar el agua contenida en los fangos hasta alcanzar una humedad del 30%.

Este sistema se llama STC, se basa en un depósito de lodos, el cual mediante un tornillo sin fin va a trasladar los lodos hacia las cintas de la cámara de secado con el fin de distribuirlos de igual manera y mezclarlos. A esto se le va a implantar dos bandas que recorren longitudinalmente que van a ir una arriba de la otra para tener mayor cantidad de lodo en la cámara de secado.

Arriba de cada banda transportadora de lodo va a ir el calor térmico que vienen de los motores de biogás, durante el recorrido se hace circular aire caliente y seco a una temperatura de 100 °C.

Ese aire que es impulsado por el sistema de ventilación, atraviesa el producto extrayendo el agua por equilibrio higroscópico. El aire caliente y húmedo que ha pasado a través de la masa de fango, es condensado en los intercambiadores situados en el interior del túnel, separando el agua que se ha extraído del fango, a la vez que se le aporta nueva energía calorífica, lo que permite la recirculación del aire y mantener el proceso en circuito cerrado de aire (Arauzo - Permuy, 2011)

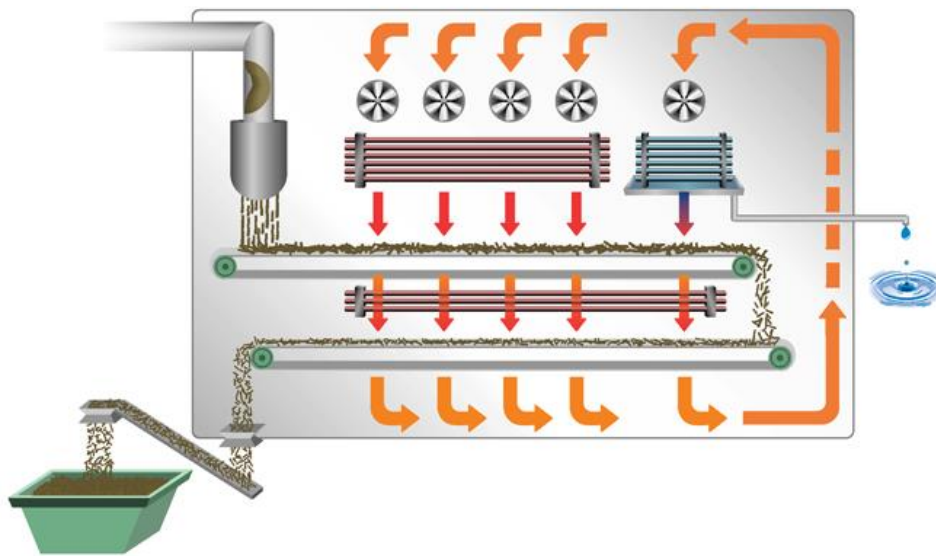


Figura 3.12 Diagrama de funcionamiento del proceso de secado térmico de lodos

Fuente: TecnoAqua, 2016.

Al trabajar en un circuito cerrado de aire como es la cámara de secado, no se va a producir emisiones gaseosas ni olores hacia la atmósfera. El único residuo que sale por la cámara de secado va a ser el agua de buena calidad, con mínimos arrastres que va a depender de la naturaleza del producto a tratar.



Figura 3.13 Equipo STC implantado en una Estación Depuradora de Aguas Residuales

Fuente: TecnoAqua, 2016

La longitud de la cámara de secado va a depender del espacio que se tenga, por lo que en un inicio la cámara tendrá 10 metros con una longitud de bandas de 8 metros cada una.

3.4 Temperatura en el escape



Figura 3.14 Toma de temperatura a la salida del escape del motor de biogás

Fuente: Autores

Para la toma de temperatura del escape del motor a biogás se utiliza un pirómetro de la marca Raytek MT6, el cual sirve para medir altas temperaturas. A continuación, se presentan algunas características principales en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Especificaciones del pirómetro Raytek MT6

Especificaciones	
Rango de medición	-30 a 500 ° C (-20 a 932 ° F)
Exactitud	± 1 ° C (2 ° F) de 10 ° C a 30 ° C (50 ° F a 86 ° F), $\pm 1,5\%$ de lectura o $\pm 1,5$ ° C (3 ° F)
	(asume condiciones de medición estándar y estables)
Repetibilidad	$\pm 0.5\%$ de lectura o $<\pm 1$ ° C (± 2 ° F)
Emisividad	preestablecido 0,95
Tiempo de respuesta	< 500 milisegundos
Distancia al tamaño del punto	10:1 calculado a 80% de energía
Rango espectral	Detector de termopila de 6,5 a 18 μm
Resolución de pantalla	0.2°C (0.5°F)
Retención de pantalla (7 minutos)	✓
LCD retroiluminado	✓
Pantalla de temperatura	° C o ° F seleccionable
Rango de funcionamiento ambiental	0 a 50°C (32 a 120°F)
Humedad relativa	10-90% RH sin condensación, @ hasta 30 ° C (86 ° F)
Distancia típica a objetivo (punto)	Hasta 2. (6 pies)
Clase de laser II	Avistamiento de punto laser
Peso / dimensiones	7 onzas (200g) 152 x 101 x 38 mm (6 x 4 x 1,5 pulgadas)
Poder	Pila alcalina de 9V

Duración de la batería (alcalina)	12 horas
--------------------------------------	----------

Fuente: Raytek Corporation, 2005



Figura 3.15 Pirómetro Raytek MT6

Fuente: Autores

Para conocer la temperatura que se genera en el escape, se realizan varias tomas a diferentes horas del día: 10:00, 14:00 y 18:00, durante tres días y se determina la media de las muestras, de esta manera se conoce la temperatura inicial para la cámara de secado.

Tabla 3.3 Temperatura del escape del motor generador

Horario	TEMPERATURA °C		
	Día 1 (03/08/2020)	Día 2 (04/08/2020)	Día 3 (05/08/2020)
10:00	353.2	359	355.4
14:00	353.2	359.8	355.2
18:00	358.2	361.2	357.4
Promedio	354.87	360	356
Promedio de Temperatura (°C)			356.96

Fuente: Autores

La temperatura del escape es de 356.96 °C.



Figura 3.16 Medición de la temperatura en el escape del motor generador

Fuente: Autores

3.5 Temperatura, presión y flujo en el bioprocesador, y en el motor generador

La empresa mixta EBE BGP Energy realiza un levantamiento de información manual de la planta de biogás las 24 horas, todos los días; en donde se verifica que esté funcionando correctamente y no exista ninguna anomalía. Analizan principalmente: medidor energía, tablero generador, presión del biogás, carburación, bioprocesador, presión del agua y aceite, temperatura, flujo total, aceite ojo buey y aceite cárter. Se tienen registros desde que inició el funcionamiento de la planta, es decir, en el año 2017.

Gracias a toda esa información levantada se realiza una media de la temperatura, presión y flujo en el bioprocesador, y un promedio de la temperatura y presión en el motor.

Se debe tener en cuenta que se toma la temperatura en ambos brazos del “pantalón” (izquierdo y derecho) del motor, se llama así debido a que las tuberías forman un pantalón al unirse, como se puede ver a continuación.



Figura 3.17 “Pantalón” del motor generador a biogás

Fuente: Autores

Debido a que los datos se encuentran de forma manual y no electrónica, se seleccionó una muestra aleatoria de los datos por mes, desde que se inició el funcionamiento del motor.

Tabla 3.4 Temperatura, presión y flujo en el bioprocesador y motor

Fecha	Temperatura (°C)			Presión Biogás (mbar)	Flujo (m ³ /h)
	Bioproc.	Escape B. D	Escape B. I	Bioproc.	Bioproc.
29/06/2017	46,1	529	522	226	386,1
25/07/2017	39,2	522	518	190	402,7
28/08/2017	38,9	525	523	200	402,7
25/09/2017	45,4	536	533	205	377,1
29/10/2017	49,9	557	553	220	303
29/11/2017	50,2	526	525	196	383,2
29/12/2017	48,5	532	531	190	352,1

27/01/2018	56,9	584	597	220	287,7
28/02/2018	43,2	556	556	168	415,1
29/03/2018	51,8	551	543	192	359,6
28/04/2018	46,7	538	529	155	406,1
22/05/2018	47,3	543	536	157	389,3
28/06/2018	51,5	560	556	155	384,1
30/07/2018	46,4	563	557	165	347,5
28/09/2018	49,1	548	551	150	375,3
27/10/2018	50,7	499	557	152	391,7
20/11/2018	52,6	501	498	160	391,3
29/12/2018	48,8	480	593	124	395,6
03/01/2019	49,6	478	592	138	414,2
29/05/2019	44,8	603	569	184	371,2
28/06/2019	44,3	531	463	162	455,3
29/07/2019	37,7	517	482	165	423,5
26/08/2019	42,3	550	462	170	380,1
23/09/2019	43,2	526	553	163	419,3
18/10/2019	39,8	529	543	163	411,1
25/11/2019	42,9	525	569	149	442,1
16/12/2019	45,8	551	573	165	372,2
02/01/2020	41,4	522	566	172	407,9
04/02/2020	41,3	542	555	178	353,2
17/03/2020	43,9	538	641	150	380,6
01/04/2020	48,9	568	616	162	434
04/05/2020	46,7	569	600	164	424,2
03/06/2020	50,6	563	564	160	441,4
29/06/2020	41,2	527	509	165	414,1
Total	1567,6	18289	18635	5835	13294,6
Promedio	46,106	537,912	548,088	171,618	391,018

Fuente: Autores

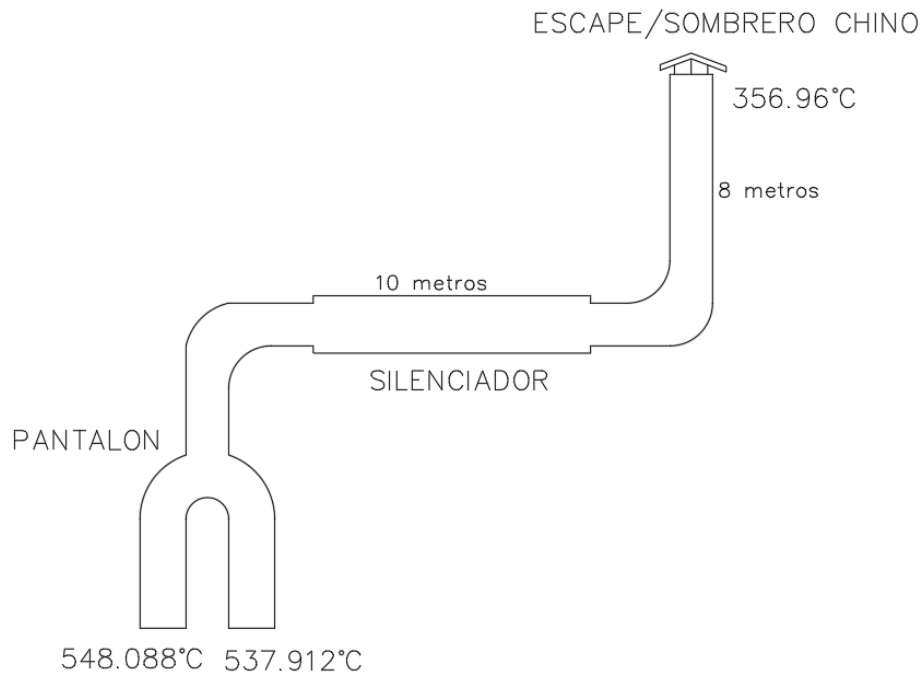


Figura 3.18 Esquema del escape del motor generador

Fuente: Autores.

Además, la empresa mixta EBE BGP en el año 2018 realizó un convenio con la empresa Halcon Data debido a la necesidad de un reporte de datos de producción de Biogás en la Planta de Pichacay, por lo que desde Diciembre del 2018 se ha realizado un monitoreo en tiempo real con un reporte de datos mensual, por un tiempo de seis meses. Su objetivo es que los datos puedan ser confiables e inmodificables gracias a que Halcon Data es una empresa neutral.

La empresa Halcon Data para la medición utiliza:

Un *Data Logger* instalado en Pichacay, conectado directamente al sensor KURZ de biogás instalado por EBE, registra exactamente y en tiempo real las lecturas del sensor. Este registrador de datos contiene una memoria interna capaz de almacenar datos por más de 8 meses.

(Halcon Data, 2020)

Halcon Data realiza el levantamiento de los siguientes parámetros: voltaje, flujo, velocidad y temperatura. El reporte comprende solamente para las lecturas registradas

cuando el motor está en funcionamiento, esto es debido a que si se encuentra en modo encendido “*On*” indica que el biogás es parte del proceso de producción y si está en modo apagado “*Off*”, se refiere a que el biogás no ingresa al proceso de producción sino al quemador, por lo que se debe destacar que en las siguientes tablas no se registran, en algunos meses, el flujo de gas, ya que se han hecho mantenimientos preventivos al motor, sin embargo la temperatura del biogás si se le ha medido antes de ingresar a la antorcha.

“La determinación de encendido o apagado se determina de acuerdo a los cambios de voltaje registrados en el contactor 7k2, cuando el voltaje es mayor igual a 24V, se considera encendido, cuando es menor a 24V apagado.” (Halcon Data, 2020)

A continuación, se presentan las tablas 11 y 12 indicando el flujo de biogás y su temperatura de los reportes de Halcon Data.

Tabla 3.5 Tabla del flujo de biogás al ingresar al motor

Fecha	Flujo Acumulado NCMH	Flujo Promedio NCMH
Diciembre 2018	252507,6192	394,5400
Enero 2019	249070,974	388,5660
Mayo 2019	30822,09	366,9300
Abril 2020	135372,9301	420,4128
Mayo 2020	267628,7942	422,7943
PROMEDIO		398,6486

Fuente: Autores

Las siglas NCMH significan Normalised Cubic Meter per Hour, o flujo en metros cúbicos normalizados por hora.

Tabla 3.6 Tabla de la temperatura del biogás al ingresar al motor

Fecha	Temperatura (°C)
Diciembre 2018	48,8794
Febrero 2019	38,3212
Marzo 2019	35,2408
Mayo 2019	43,6200
Abril 2020	42,8097
Mayo 2020	41,7216
PROMEDIO	41,7654

Fuente: Autores

Por lo tanto, gracias a los datos de la empresa mixta EBE BGP Energy y de Halcon Data se puede tener una aproximación mucho más cercana del flujo y temperatura que tiene el biogás, al entrar al motor.

Tabla 3.7 Media del flujo y Temperatura del Biogás

Registro	Flujo de Biogás (m3/h)	Temperatura (°C)
EBE BGP Energy	391,018	46,106
Halcon Data	398,6486	41,7654
PROMEDIO	394,8333	43,9357

Fuente: Autores

Se debe destacar que los motores generadores poseen un turbocompresor, es decir, tienen una sobrealimentación, por lo que entra más oxígeno para que se produzca la combustión en los motores generadores y esto genere más fuerza. No se considerará en nuestro proyecto el extra de flujo que ingresa al motor para que sea más conservador, ya que el flujo no es preciso.

3.6 Modelación para el secado de lodos

Para la simulación de que los lodos residuales se encuentran en una cámara de secado mediante el aprovechamiento del gas que emana desde los motores generadores de la Planta de Pichacay, se utiliza un horno de convección por gravedad de la marca Humboldt.

El horno de marca Humboldt se va a utilizar para las pruebas de laboratorio de los lodos residuales.

Los hornos de convección por gravedad de calidad tienen una construcción de doble pared y un exterior de acero soldado pesado. El espacio de trabajo está aislado del gabinete exterior con una pulgada de lana mineral de alta densidad y los interiores están hechos de acero aluminizado resistente a la corrosión. Se utilizan elementos revestidos de baja densidad de vatios. Incluye termocontrol automático, indicador de calor con luz piloto y un termómetro de mercurio montado en la parte superior (0° - 300° C). Todos los hornos vienen con dos estantes ajustables y un cable de alimentación de 3 hilos de 6 pies y un enchufe con conexión a tierra. Las unidades también tienen patas de goma a prueba de rayones, puerta con bisagras tipo piano de longitud completa y manija de puerta termoplástica extruida.

(Humboldt Mfg. Co., 2020)



Figura 3.19 Horno de convección por gravedad

Fuente: Humboldt Mfg. Co., 2020

A continuación, en la Tabla 14 se presentan las características principales del horno Humboldt modelo 30 GC.

Tabla 3.8 Características del Horno Humboldt modelo 30 GC

HORNO HUMBOLDT	
Modelo	H - 30120
Especificaciones	115 V
Número de modelo (Model Number)	30 GC
Número de serie (Serial Number)	G3 - 007925
WATTS	1200
AMPS	10.5
Suministro de Voltaje (Supply Voltage)	115
Frecuencia / HZ	60

Fuente: (Humboldt Mfg. Co., 2020)

La Universidad del Azuay posee tres hornos de la marca Humboldt modelo 30GC en su laboratorio de suelos, en el año 2011 se les hizo una mejora, quitando el elevador de temperatura manual para colocar un electrónico y así al elevar la temperatura este sea exacto.



Figura 3.20 Horno Humboldt de la Universidad del Azuay

Fuente: Autores.

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE ANÁLISIS TÉCNICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL MÁS ÓPTIMOS APROVECHANDO EL CALOR REMANENTE

En primer lugar, se analiza el factor técnico para saber si es posible que llegue la energía residual de los motores hasta la planta de secado.

El calor que se utiliza para el secado de los lodos residuales son los gases que emanan de los escapes de los motores generadores a base de Biogás, para que pueda llegar el gas se utiliza ductos o tuberías que traslada el calor de un punto A hacia un punto B, con la finalidad de que en el punto B llegue la mayor cantidad posible de calor para que el tiempo de secado sea menor.

A continuación, se hablará de la termodinámica, la cual es la ciencia que estudia las transformaciones de la energía o el movimiento del calor.

4.1 Principios de la termodinámica

- La ley cero de la termodinámica establece:

“Si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí.” (Çengel & Boles, 2012)

- Primera ley de la termodinámica establece:

“La energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma.” (Çengel & Boles, 2012)

- La segunda ley de la termodinámica afirma:

“Los procesos ocurren en cierta dirección y que la energía tiene calidad así como cantidad.” (Çengel & Boles, 2012)

- Enunciado de Kelvin-Planck expresa:

“Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo.” (Çengel & Boles, 2012)

- Enunciado de Clausius expresa:

“Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura.” (Çengel & Boles, 2012)

- La cuarta ley de la termodinámica afirma:

“La entropía de una sustancia pura cristalina a una temperatura absoluta de cero es cero.” (Çengel & Boles, 2012)

4.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor consiste en el intercambio de energía de dos cuerpos o partes de un mismo cuerpo, siempre que exista un gradiente térmico.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

4.2.1 Transferencia de calor por conducción.

“La razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura.” (Sandra Fernández, 2015)

4.2.2 Transferencia de calor por convección

La Transferencia de calor por convección consiste de dos mecanismos los cuales operan simultáneamente. El primer mecanismo es debido al movimiento molecular, el mismo que en la transferencia debido a conducción. El segundo mecanismo es de la transferencia de energía debido al movimiento macroscópico de “paquetes” del fluido. El movimiento del fluido es el resultado de paquetes de líquido, cada uno de los cuales consisten en un gran

número de moléculas, que se mueven en virtud de una fuerza externa. Esta fuerza extraña puede deberse a un gradiente de densidad, como en la convección natural, debido a una diferencia de presión generada por una bomba o un ventilador, o posiblemente a una combinación de los dos.

La transferencia de calor por convección depende de la densidad, viscosidad y velocidad del fluido así como de sus propiedades térmicas (calor específico conductividad térmica).

(Jiménez Carballo, 2018)

4.2.3 Transferencia de calor por radiación

Radiaciones la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta. La tasa de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área superficial A , y aumenta rápidamente con la temperatura T , según la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin). El flujo de calor para cuerpos que están calientes a una temperatura T se define como:

$$H = eA\sigma T^4,$$

Donde e es la emisividad del material, que es un número adimensional entre 0 y 1 que representa la relación entre la tasa de radiación de una superficie dada y la de un área igual de una superficie radiante ideal a la misma temperatura. La emisividad suele ser mayor para superficies oscuras que claras. Para un radiador ideal la emisividad tiene un valor igual a 1. Por otro σ es la constante física fundamental llamada constante de Stefan-Boltzmann, la cual tiene el valor de:

$$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Un cuerpo que emite radiación a una temperatura T también absorbe radiación del entorno el cual se encuentra a temperatura T_s . Un cuerpo que irradia y absorbe tiene un flujo de calor neto, el cual se determina

$$H_{\text{neto}} = \epsilon A \sigma (T_4 - T_4s)$$

En esta ecuación, un valor positivo de H implica salida neta de calor del cuerpo.

(Jiménez Carballo, 2018)

Para saber la cantidad de temperatura que llega al punto B, se utiliza la ecuación diferencial de Fourier en superficies cilíndricas debido a que el calor será llevado a través de un material cilíndrico, el cual se explicará más adelante.

Por lo tanto, la transferencia de calor para este trabajo es de conducción para llevar el calor de un lugar a otro.

La Transferencia de calor por conducciones es el resultado de interacciones moleculares. Las moléculas de un objeto que está a una temperatura más alta vibran con mayor rapidez, estas chocan contra las moléculas más energéticas situadas en la parte de menor temperatura del objeto. Como resultado del choque las moléculas que se mueven a mayor velocidad transfieren una parte de su energía a las que se mueven más despacio. De esta forma se dice que la transferencia de calor por conducción siempre se da de una región con temperatura más alta hacia una región con temperatura más baja. Se trata de una transferencia como resultado de una diferencia de temperaturas.

(Jiménez Carballo, 2018)

En estos se encuentran dos tipos de sólidos, principalmente el metal, el cual es un buen conductor de calor, debido a que tiene un gran número de electrones en los que se pueden mover libremente. El segundo tipo son los no metales como la madera, estos tienen un número muy pequeño de electrones libres, por lo cual, hacen que sean malos conductores de calor y tener un mal conductor de calor se le denomina aislante térmico.

Por lo general, para conducir el calor va a depender de su fase. Los gases van a ser malos conductores térmicos, ya que sus moléculas están relativamente separadas, es decir, los choques son poco frecuentes, en cambio los líquidos y sólidos son buenos

conductores térmicos, gracias a que sus moléculas se encuentran más juntas y pueden interactuar con facilidad.

Si existen diferentes temperaturas en un material o diferentes materiales, el calor siempre fluye desde la mayor temperatura hacia la menor temperatura.

4.3 Ley de Fourier

La ley de Fourier sirve para cuantificar la conducción y dice que la tasa a la cual el flujo es transferido por conducción, $H = Q / \Delta t$ es proporcional al gradiente de temperaturas dT/dx y al área transversal A a la dirección de flujo.

$$H = -kA \, dT/dx$$

Donde k es la conductividad térmica del material y el signo menos es una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, la cual requiere que el calor fluya de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. Por otro lado, hay que tener presente que el gradiente de temperatura dT/dx indica que la temperatura T es función de x , por lo tanto, un gradiente de temperatura negativo indica que la temperatura decrece al aumentar los valores de x .

(Jiménez Carballo, 2018)

Se presenta en la tabla 15, algunas propiedades de varios metales en especial el calor específico y la conductividad térmica.

Tabla 4.1 Propiedades de los metales

Metal	Densidad (kg/m³)	Calor Específico (J/kg·K)	Conductividad térmica (W/m°C)
Aluminio	2700	880	209,3
Acero	7800	460	45
Cobre	8900	390	389,6
Latón	8500	380	85,5
Plata	10500	230	418,7

Plomo	11300	130	34,6
-------	-------	-----	------

Fuente: (Koshkin & Shirkévich, 1975)

La fórmula de Fourier a utilizar es la de transferencia de calor en superficies cilíndricas:

$$\frac{Q}{t} = k \cdot A \cdot \frac{(T_a - T_b)}{L} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Q = Transferencia de calor [kcal]

t = Tiempo [s]

k = Coeficiente de conductividad $\left[\frac{\text{kcal}}{^\circ\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{s}} \right]$

A = Área [m²]

T_a = Temperatura mayor [°C]

T_b = Temperatura menor [°C]

L = Longitud [m]

4.4. Ley de los Gases Ideales

Los gases ideales son unas sustancias hipotéticas que se constituyen en una herramienta clave para el estudio de distintos procesos y ciclos termodinámicos. Se emplea igualmente el modelo de los gases ideales en la elaboración de los balances de masa y energía involucrados en las operaciones físicas y en los procesos químicos que tienen lugar en las industrias del mismo nombre.

(Ríos & Mustafa, 2007, p.449)

$$PV = nRT \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

P = Presión [atm]

V = Volumen [L]

T = Temperatura [K]

n = Número de moles [mol]

R= Constante universal de los gases = $0.08206 \left[\frac{L \cdot atm}{mol \cdot K} \right]$

4.5. Diseño de la cámara de secado

4.5.1. Tubería

La conducción del biogás debe ser con una tubería que resista a la corrosión, altas temperaturas y presiones. Existen una diversidad de materiales, pero los principales son: acero galvanizado, cobre, neopreno, polietileno, etc.

El presente trabajo se ha enfocado en trabajar con tubería de cobre debido a que tiene una buena conductividad térmica, su costo no es muy elevado comparado con otros materiales y se encuentra en cualquier parte del país. Además, la resistencia que tiene el cobre al calor extremo es alta gracias a su punto de fusión, 1085.62 °C, por lo que las tuberías de cobre no se van a deformar ante las temperaturas muy altas que se presenten, a más de esto, también posee un excelente coeficiente de dilatación térmica.

La tubería de cobre se puede ensamblar con uniones o soldaduras, una de las grandes ventajas que tiene es que es muy flexible y se puede doblar al frío para adaptarse a casi cualquier estructura.

En el mercado generalmente la tubería de cobre se encuentra con una longitud de 6 metros con diferentes diámetros en unidad de pulgadas, y tiene tres tipos: M, L y K; la elección depende del uso, la primera sirve para la conducción de agua, la segunda para la conducción de agua y gasfitería y la tercera es para un uso industrial.

Para el diseño se utilizará una tubería de cobre con una longitud de 6 metros; con un diámetro de 4 pulgadas, es decir, en el sistema internacional 10,16 cm; de tipo L y con un espesor de 300mm para que no se disipe rápidamente la energía.

Se debe tomar en cuenta que la temperatura inicial con la que va a salir del escape del motor generador es de 356,96 °C, el coeficiente de conductividad del cobre es de 389,6 según Koshkin & Shirkévich en su libro Manual de Física Elemental (1975), siendo el cobre el mejor conductor de calor.

Se debe destacar que como aún no entra en funcionamiento el segundo motor generador de la planta de biogás, no es posible tomar la medida de la temperatura al final del escape, por lo que se considerará que el motor dos funcione a las mismas condiciones, es decir, se utilizará como dato la misma medida que en el primer escape.

Cada escape tendrá su conexión individual, es decir, existirán dos tuberías de cobre para que transfiera el calor desde el escape hasta la cámara de secado.

4.5.2 Aislante Térmico

Al transferirse el calor desde los escapes de los motores generadores hacia la cámara de secado, se debe tener en cuenta que la temperatura del ambiente puede generar pérdidas de energía, es decir, se disipará el calor con más facilidad, por lo que es necesario cubrir a las tuberías con un aislante térmico, ya que su conductividad térmica es baja.

“Los materiales aislantes se pueden definir como aquellos que presentan una elevada resistencia al paso del calor, reduciendo la transferencia de este calor a su cara opuesta, por lo tanto podemos decir que protegen del frío y del calor.

Por otro lado, sabemos que el aislamiento térmico contribuye a la eficiencia energética, que consiste en disminuir el consumo energético sin disminuir el confort.”

(Palomo, 2017)

Existe una gran variedad de aislantes térmicos, se pueden clasificar por origen sintético orgánico, origen inorgánico y origen natural orgánico. En el primer grupo su fabricación es muy costosa debido a su composición, sin embargo, poseen una conductividad térmica más baja. El segundo, son materiales ignífugos, es decir, su resistencia al calor es alta. Y el tercero son materiales con una emisión de CO₂ mucho más corta que las anteriores, sin embargo, su conductividad térmica es alta. Por esta razón, el trabajo se ha centrado en el segundo grupo, ya que deben resistir altas temperaturas, además que su costo no es tan elevado como otros materiales.

Tabla 4.2 Conductividad térmica de los aislantes térmicos de origen inorgánico

Origen Inorgánico	
Aislante	Conductividad Térmica (W/m*k)
Lana de vidrio	0,034
Lana de roca	0,036
Vidrio celular	0,048
Arcilla expandida	0,08
Vermiculita	0,05
Pelita	0,035
Hormigón celular	0,09

Fuente: Palomo, 2017

Como se puede observar en la tabla 17, el material con una conductividad térmica más baja es la lana de vidrio, además de ser una de las más asequibles en el mercado y puede llegar a resistir temperaturas entre 250 a 400 °C; por lo que se escogió para el diseño de la cámara.

4.5.3 Temperatura Final

La fórmula de Fourier que se utiliza para determinar la temperatura final, se realiza por tramos, ya que la tubería tiene una longitud de 6 metros con un diámetro de 4 pulgadas. Para la conexión se le agregan uniones a cada tubería hasta completar la longitud total de 90 metros que está previsto en el diseño, el último tramo es de 3 m.

La tabla 16 presenta los datos de la energía térmica del motor generador para encontrar un promedio en el flujo de calor o potencial calórico, estos datos fueron tomados por la empresa pública EMAC EP.

Tabla 4.3 Estimado de Energía Termal Disponible

Año	Promedio m3/hr disponible @50% CH4	Energía Térmica MJ/hr	Energía Térmica mmBTU/hr	Energía Térmica kW
2007	504	8946	8,473	2485
2008	562	9975,5	9,448	2771
2009	618	10969,5	10,389	3047,1
2010	671	11910,3	11,28	3308,4
2011	721	12797,8	12,121	3554,9
2012	770	13667,5	12,944	3796,5
2013	817	14501,8	13,734	4028,3
2014	862	15300,5	14,491	4250,1
2015	907	16099,3	15,247	4472
Promedio	714,67	12685,36	12014,11	3523,7

Fuente: Eastern Research Group & Carbon Trade, 2007

Con el promedio encontrado de la energía térmica se puede hallar la temperatura final con la que va a llegar a la cámara de secado, tomando en cuenta que la temperatura final va a ser de los dos motores generadores de biogás.

Se muestra la fórmula y el desarrollo de ella para el primer tramo de tubería.

$$\frac{Q}{t} = K * A * \frac{(T_a - T_b)}{L}$$

$$3523710 \text{ W} = 389600 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} * 1.8575 \text{ m}^2 * \frac{(459^{\circ}\text{C} - \text{Tb})}{5.8 \text{ m}}$$

$$\text{Tb} = 356.96 - \frac{3523710 * 6}{389600 * 1.8575}$$

$$\text{Tb} = 327.74^{\circ}\text{C}$$

Donde el Tb de 327,74°C es la temperatura final del primer tramo de tubería.

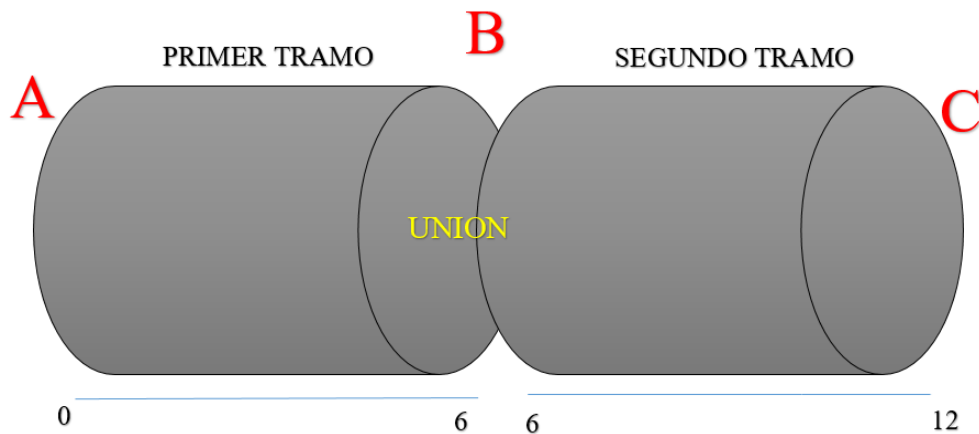


Figura 4.1 Modelo de la conexión de dos tuberías de cobre

Fuente: Autores

Las siguientes dos tablas a continuación presentan la temperatura final después de los 90 m de longitud. La temperatura inicial es de 356,96 °C como se mencionó en el capítulo anterior, ambas tablas inician con la misma temperatura debido a que el segundo motor aún no se encuentra en funcionamiento, sin embargo, como los dos motores van a trabajar con las mismas condiciones se consideró el mismo dato.

Tabla 4.4 Temperatura final al llegar a la cámara de secado del escape 1

Longitud (m)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
0 - 6	356,96	327,74
6 - 12.	327,74	313,34
12 - 18.	313,34	298,94
18 - 24	298,94	284,53

24 - 30	284,53	270,13
30 - 36	270,13	255,72
36 - 42	255,72	241,32
42 - 48	241,32	226,92
48 - 54	226,92	212,51
54 - 60	212,51	198,11
60 - 66	198,11	183,70
66 - 72	183,70	169,30
72 - 78	169,30	154,89
78 - 84	154,89	140,49
84 - 90	140,49	126,09

Fuente: Autores

Tabla 4.5 Temperatura final al llegar a la cámara de secado del escape 2

Longitud (m)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
0 - 6	356,96	327,74
6 - 12.	327,74	313,34
12 - 18.	313,34	298,94
18 - 24	298,94	284,53
24 - 30	284,53	270,13
30 - 36	270,13	255,72
36 - 42	255,72	241,32
42 - 48	241,32	226,92
48 - 54	226,92	212,51
54 - 60	212,51	198,11
60 - 66	198,11	183,70
66 - 72	183,70	169,30
72 - 78	169,30	154,89
78 - 84	154,89	140,49
84 - 90	140,49	126,09

Fuente: Autores

Después de utilizar la fórmula de Fourier y analizar la sección por tramos, se puede concluir que la temperatura final con la que llega a la cámara de secado, con una longitud de 90 metros es de 126,09 grados centígrados por cada tubería.

Para determinar la temperatura total en la cámara de secado, en primer lugar se debe calcular la presión en el escape del motor generador para esto se utiliza la fórmula de la Ley General de los Gases Ideales y se despeja la variable de presión.

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Conociendo que el flujo al ingresar al motor es de 394,8333 m³/h y asumiendo que el flujo que entra es igual al flujo que sale, se puede decir que el volumen en el escape es de 394,8333 m³.

Para calcular n se sabe que,

$$n = \frac{m}{M} [mol] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde,

m = masa [g]

M = Masa molar [g/mol]

La masa se determina a través de la fórmula de la densidad,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde,

ρ = densidad [g/m³]

Al combustionar el metano en los motores generadores, al final de la reacción emite dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O). Por lo tanto primero se calcula el número de moles del gas 1 y después del gas 2.

La densidad del dióxido de carbono es 1870 g/m^3 y su masa molar o peso molecular es $44,01 \text{ g/mol}$ (San Martín, 2013). Por lo tanto,

$$m_1 = \rho_1 * V$$

$$m_1 = 1870 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} * 394,8333 \text{ m}^3$$

$$m_1 = 738338,271 \text{ g}$$

$$n_1 = \frac{m_1}{M_1}$$

$$n_1 = \frac{738338,271 \text{ g}}{44,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$n_1 = 16776,6024 \text{ mol}$$

La densidad del vapor de agua es 600 g/m^3 y su masa molar es $18,02 \text{ g/mol}$ (Universidad de Sevilla, 2018). Por lo tanto,

$$m_2 = \rho_2 * V$$

$$m_2 = 600 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} * 394,8333 \text{ m}^3$$

$$m_2 = 236899,98 \text{ g}$$

$$n_2 = \frac{m_2}{M_2}$$

$$n_2 = \frac{236899,98 \text{ g}}{18,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$n_2 = 13146,5028 \text{ mol}$$

Para calcular la presión total, se utiliza la ley de los gases ideales, sumando sus moles.

$$P = \frac{(n_1 + n_2) \cdot R \cdot T}{V}$$

$$P = \frac{(16776,6024 \text{ mol} + 13146,5028 \text{ mol}) \cdot 0,08206 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 399,09 \text{ K}}{394833,3 \text{ L}}$$

$$P = 2,482 \text{ atm}$$

Obteniendo la presión total de la cámara y suponiendo que su volumen es de 450 m³, se calcula la temperatura total, no obstante al tener el diseño completo se volverá a recalcular con el volumen real.

$$T = \frac{PV}{nR}$$

$$T = \frac{4,964 \text{ atm} * 450000 \text{ L}}{29926,5495 \text{ mol} * 0,08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * \text{K}}}$$

$$T = 454,85 \text{ K}$$

$$T = 181,85 \text{ °C}$$

La temperatura total de la cámara de secado es de 181,85 °C, sin embargo pueden existir más pérdidas adentro de la cámara, ya que sus paredes pueden calentarse y así esta pérdida energía.

4.5.4 Tornillo sin fin

Para el transporte de los lodos residuales hacia el horno de secado se utilizará un tornillo sin fin para que le vaya moviendo a los lodos hasta depositarlos en las bandas transportadoras y estos inicien su recorrido en el horno. Se utiliza un tornillo para que eleve a los lodos desde el suelo hasta la abertura de la cámara.

4.5.5 Sistema de ventilación

La función de los sistemas de ventilación es conseguir que el clima que se desarrolla dentro de la cámara sea uniforme, de esta manera circula el gas caliente proveniente de los escapes de los motores generadores por todo el lugar.

4.5.6 Ensayos de laboratorio

El comportamiento de los lodos residuales ante el calor, se realiza mediante ensayos de laboratorio, colocando a los fangos a diferentes temperaturas con varios espesores. Mediante la medición de su peso a diferentes intervalos de tiempo se puede definir cuánta humedad ha perdido hasta que contenga el 0% de agua.

Los tres primeros ensayos se realizan colocando dos bandejas de lodos por ensayo, cada uno con espesor de 2 cm y 4 cm respectivamente. El ensayo 1 está a una temperatura de 140°C, el ensayo 2 a 160°C y el ensayo 3 a 180°C.

Luego se realizan dos ensayos más, igual con espesores de 2 cm y 4 cm, pero el ensayo 4 está a una temperatura de 200°C y el ensayo 5 a una temperatura de 220°C

A continuación se presentan las tablas 20, 21 y 22 de los ensayos 1, 2 y 3; y las tablas 23 y 24 de los ensayos 4 y 5 mostrando cuánta humedad ha perdido los lodos residuales a diferentes horas.

Tabla 4.6 Ensayo 1 con temperatura a 140°C

140°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
1	4	259	1177,66
2	2	264,63	862,21
0,5 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
1	1164,19		1,47
2	846,74		2,59
1,5 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %

1	1138,11	4,31
2	818,47	7,32
17,5 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	806,07	40,45
2	636,42	37,78
18,5 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%
1	806,1	40,45
2	636,52	37,77
19,5 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	806,4	40,41
2	636,35	37,80
22,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	805,75	40,48
2	636,38	37,79

Fuente: Autores

Tabla 4.7 Ensayo 2 con temperatura a 160°C

160°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
3	4	247,59	1345
4	2	260	794,14
0,5 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%	
3	1326,7	1,67	
4	778,28	2,97	
1,5 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %	
3	1294,5	4,60	

4	753,12	7,68
17,5 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
3	1006,75	30,82
4	596	37,10
18,5 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%
3	1006,74	30,82
4	595,85	37,12
19,5 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
3	1004,96	30,99
4	591,91	37,86
22,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
3	1004,66	31,01
4	591,81	37,88

Fuente: Autores

Tabla 4.8 Ensayo 3 con temperatura a 180°C

180°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
5	4	256,26	960,94
6	2	273,81	650,78
0,5 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%	
5	929,83	4,41	
6	614,90	9,52	
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %	
5	899,34	8,74	
6	590,75	15,92	

2,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
5	868,71	13,09
6	566,30	22,41
4,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
5	693,85	37,90
6	469,57	48,07
5,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
5	667,88	41,59
6	469,15	48,18
6,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
5	636,32	46,07
6	468,44	48,37
7,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
5	622,67	48,00
6	468,10	48,46
24,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
5	603,60	50,71
6	458,26	51,07

Fuente: Autores

Tabla 4.9 Ensayo 4 con una temperatura de 200°C

200°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
7	4	247,65	1094,6
8	2	260,27	668,29
1,0 horas			

Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%
7	1016,58	9,21
8	586,65	20,01
4,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
7	729,25	43,14
8	478,87	46,42
5,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
7	715,37	44,78
8	478,72	46,46
6,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%
7	688,47	47,95
8	478,35	46,55
7,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
7	680,01	48,95
8	478,11	46,61
24,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
7	667,72	50,40
8	475,45	47,26

Fuente: Autores

Tabla 4.10 Ensayo 5 con una temperatura de 220°C

220°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
9	4	260,92	1100,48
10	2	252,9	697,91
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%	

9	983,56	983,56	13,93
10	587,75	587,75	24,75
4,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
9	738,87	738,87	43,07
10	488,93	488,93	46,96
5,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
9	736,34	736,34	43,37
10	488,97	488,97	46,95
6,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
9	728,14	728,14	44,35
10	488,7	488,7	47,01
7,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
9	725,62	725,62	44,65
10	487,46	487,46	47,29
24,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
9	717,9	717,9	45,57
10	484	484	48,07

Fuente: Autores

A continuación, se muestran las curvas de cada tabla para tener una idea más clara de cuánta humedad han perdido los lodos residuales.

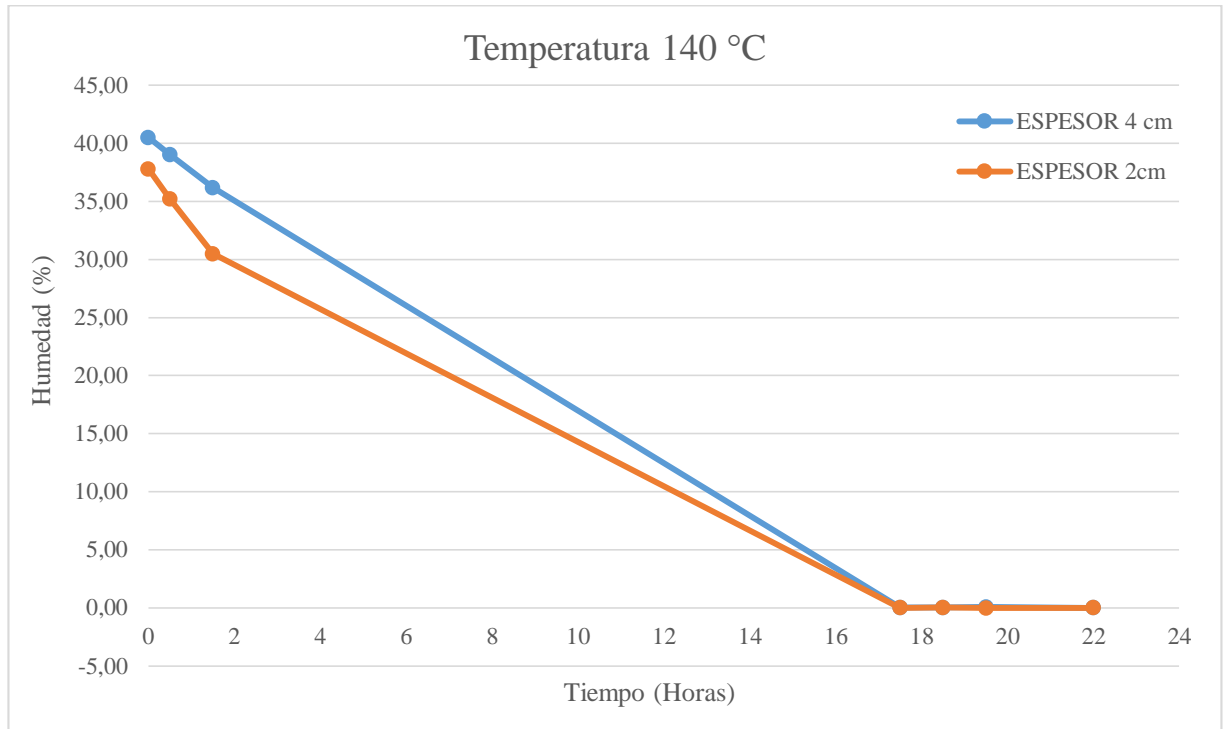


Figura 4.2 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 140°C

Fuente: Autores

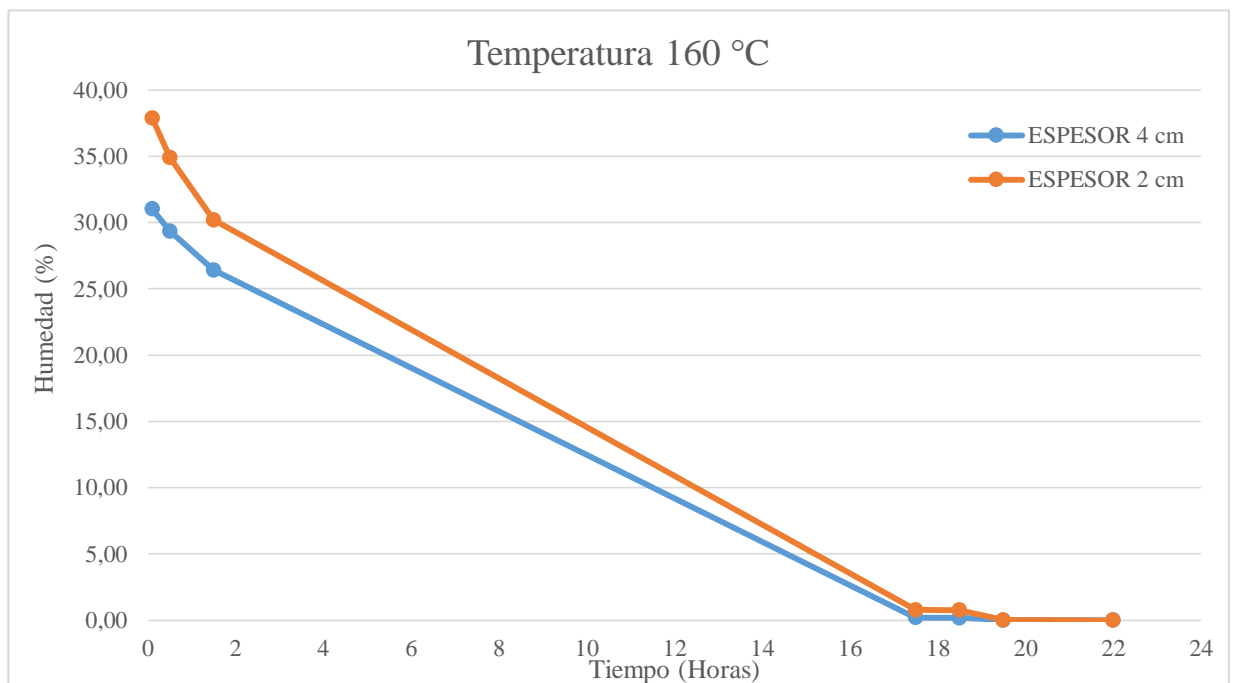


Figura 4.3 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 160°C

Fuente: Autores

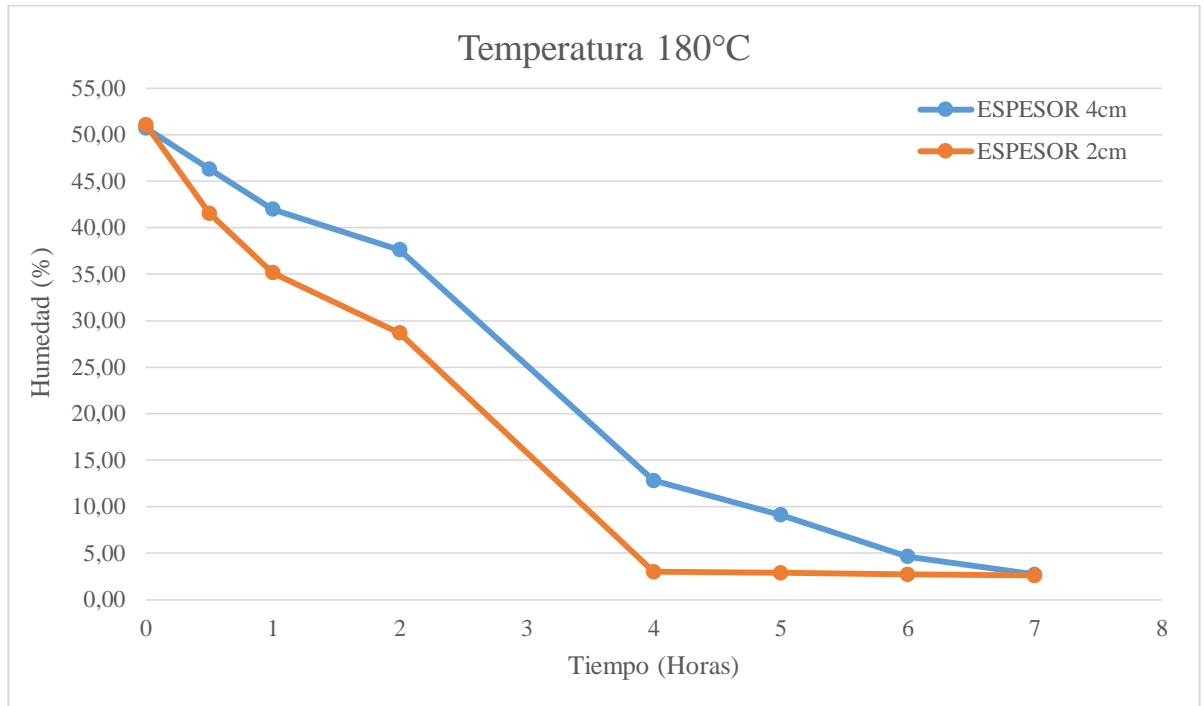


Figura 4.4 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 180°C

Fuente: Autores

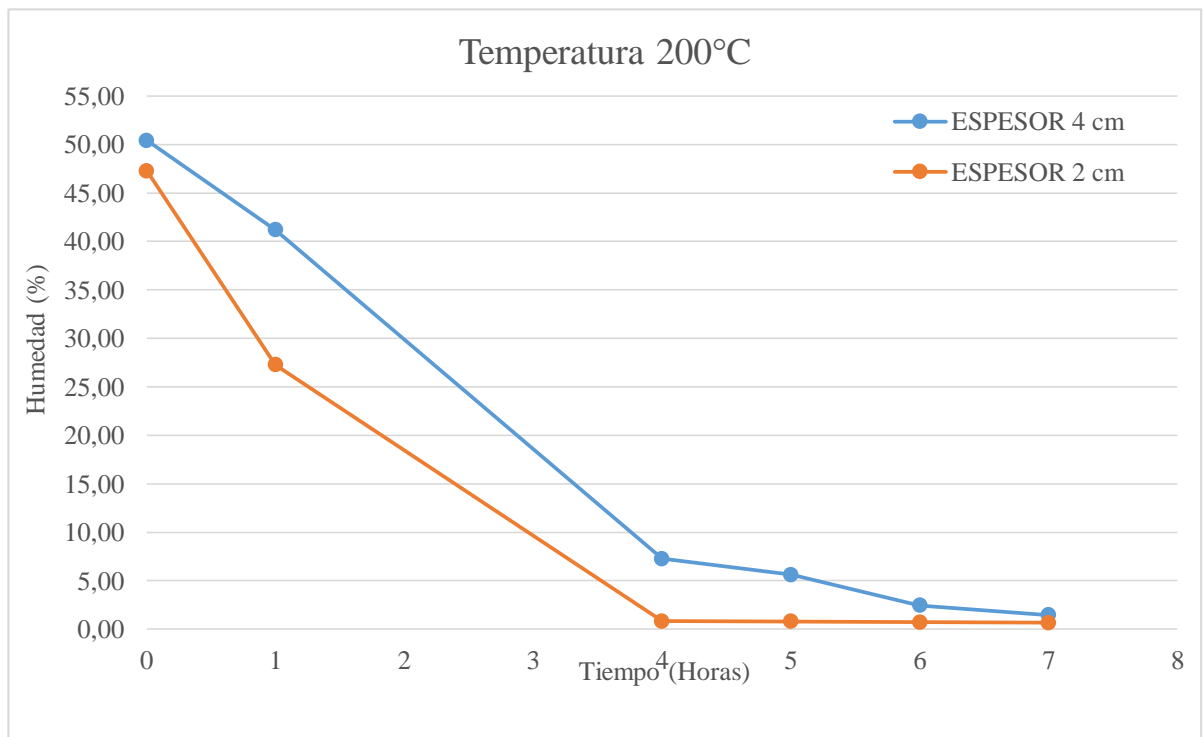


Figura 4.5 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 200°C

Fuente: Autores

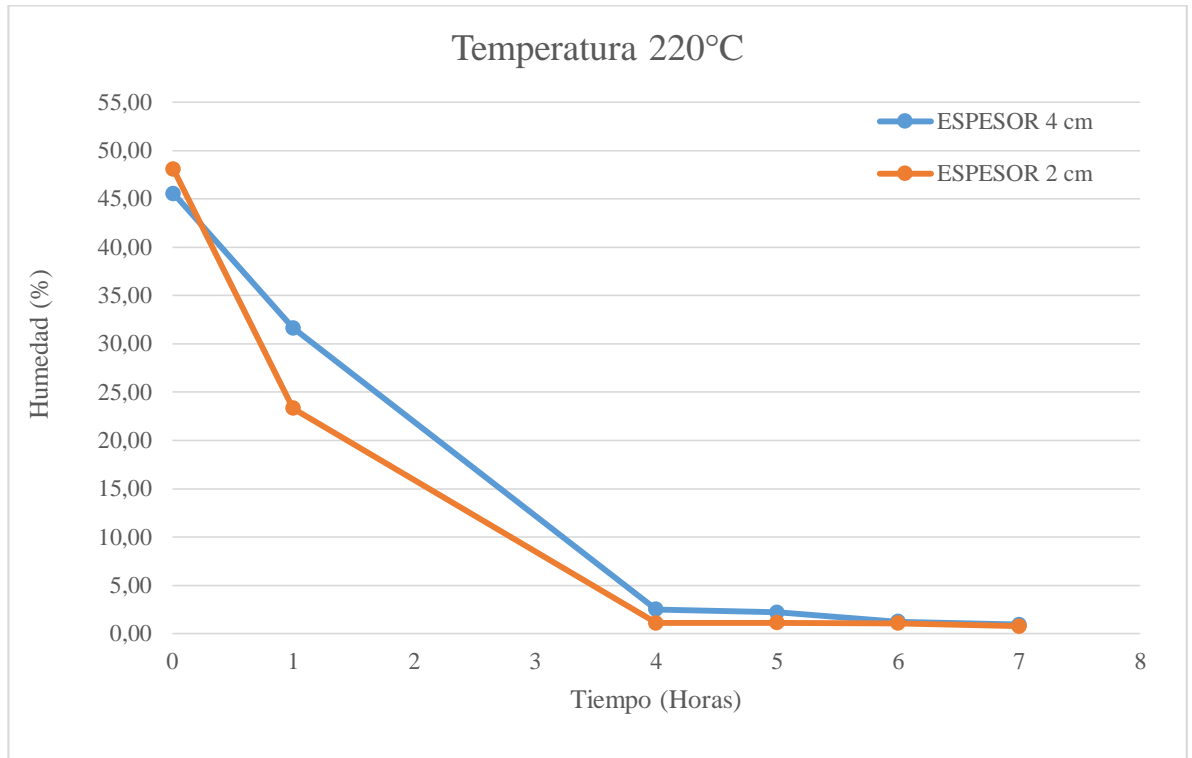


Figura 4.6 Curva de la humedad vs tiempo de los lodos residuales a una temperatura de 220°C

Fuente: Autores

Como se puede observar en las curvas, en las primeras horas se pierde agua rápidamente pero después de cierto tiempo se estabiliza y su pérdida es muy pequeña, es decir, las curvas están en forma de J invertida.

Por lo tanto, se puede decir que no es factible colocar a los lodos en una cámara de secado durante prolongadas horas ya que pasado un tiempo la pérdida de humedad no es significativa.

Además, se puede divisar que entre mayor temperatura exista, más rápido los lodos residuales se secan en las primeras horas.

En la siguiente figura se puede apreciar los lodos residuales en las bandejas colocados en el horno a una temperatura de 180°C después de 4 horas de estar ingresados.



Figura 4.7 Los lodos residuales colocados en bandeja para su secado térmico

Fuente: Autores

Luego de analizar como el lodo reacciona a diferentes temperaturas, se realizan las pruebas finales; como se mencionó anteriormente la temperatura final de cada tubería conectado al escape del motor es de $126,09^{\circ}\text{C}$ y la global es de $181,85^{\circ}\text{C}$. Para ser conservadores, ya que la cámara puede perder energía que no se previó, se utilizan en los ensayos finales temperaturas de 150°C y 130°C , con un espesor de 2 y 4 cm.

Debido a que las curvas anteriormente mostradas no estuvieron con intervalos de tiempo iguales no se pudo apreciar de una manera más detallada los lodos, por lo que estos ensayos van a tomarse a cada hora durante 8 horas, que sería el tiempo máximo que pudieran estar los fangos dentro de la cámara de secado para que pueda ser factible. Se repetirán tres veces las pruebas para verificar que no exista alguna variación.

Además, cabe destacar que se tomará como referencia la humedad a las 24 horas, según el método del secado al horno o método gravimétrico, colocando pequeñas muestras en el horno a 110°C .

Por último, hay que mencionar que se considera una humedad ideal para el ingreso al relleno sanitario sin que afecte al mismo, es decir, que no produzca desestabilidad al talud, es entre el 10 al 15%.

4.5.6.1 Prueba 1

Tabla 4.11 Humedad a las 24 horas de la prueba 1

Humedad de la Prueba 1				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,27	65,11	47,95	49,25
2	30,69	75,93	55,23	45,76
3	30,7	69,19	50,23	49,26
4	29,96	70,99	49,65	52,01
5	30,3	79,95	53,01	54,26
PROMEDIO				50,11

Fuente: Autores

Tabla 4.12 Prueba 1 con temperatura de 150°C

150°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
1	4	258,99	1041,04
2	2	251,65	756,39
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
1	995,59		5,81
2	700,95		10,98
2,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	921,60		15,27
2	640,61		22,94
3,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %

1	861,90	22,91
2	595,87	31,80
4,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida%
1	808,48	29,74
2	563,41	38,23
5,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	764,00	35,42
2	551,55	40,58
6,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	728,50	39,96
2	549,67	40,96
7,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	699,15	43,72
2	549,02	41,08
8,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	678,68	46,33
2	548,76	41,14

Fuente: Autores

Tabla 4.13 Prueba 1 con temperatura de 130°C

130°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
1	4	264,59	1026,42
2	2	276,29	790,42
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
1	996,70		3,90

2	761,60	5,61
2,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	941,46	11,15
2	717,23	14,24
3,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	896,77	17,02
2	675,98	22,26
4,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	856,10	22,36
2	640,51	29,16
5,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	820,19	27,07
2	611,57	34,79
6,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	789,01	31,16
2	590,20	38,94
7,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	757,98	35,24
2	574,62	41,97
8,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	733,03	38,51
2	562,44	44,34

Fuente: Autores

En la gráfica 4.8 se puede observar que las dos curvas se cruzan aproximadamente en la sexta hora, con una humedad entre el 9% y 10 %, a una temperatura de 150°C.

Además, en la curva con el espesor de 2 cm destaca que a partir de la quinta hora pierde muy poca humedad, por lo que necesitará mucho más tiempo que la curva con espesor de 4 cm para que llegue a 0% de humedad.

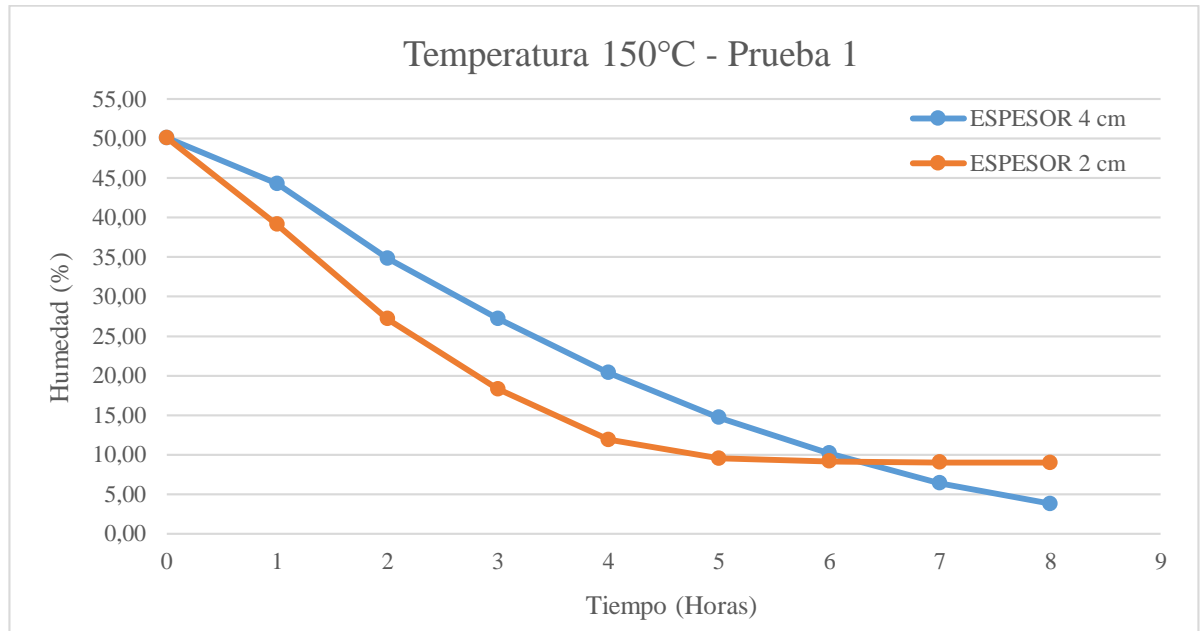


Figura 4.8 Curva del tiempo vs. Humedad de los lodos residuales a una temperatura de 150°C de la prueba 1

Fuente: Autores

En la siguiente gráfica se puede apreciar que aún no llegan a cruzarse las curvas debido a que la temperatura es más baja a la anterior. También se puede ver que con un espesor de 2 cm puede llegar a una humedad de 15% a 11% entre la quinta y sexta hora; y para un espesor de 4 cm entre la hora 7 y 8 se puede alcanzar el mismo resultado.

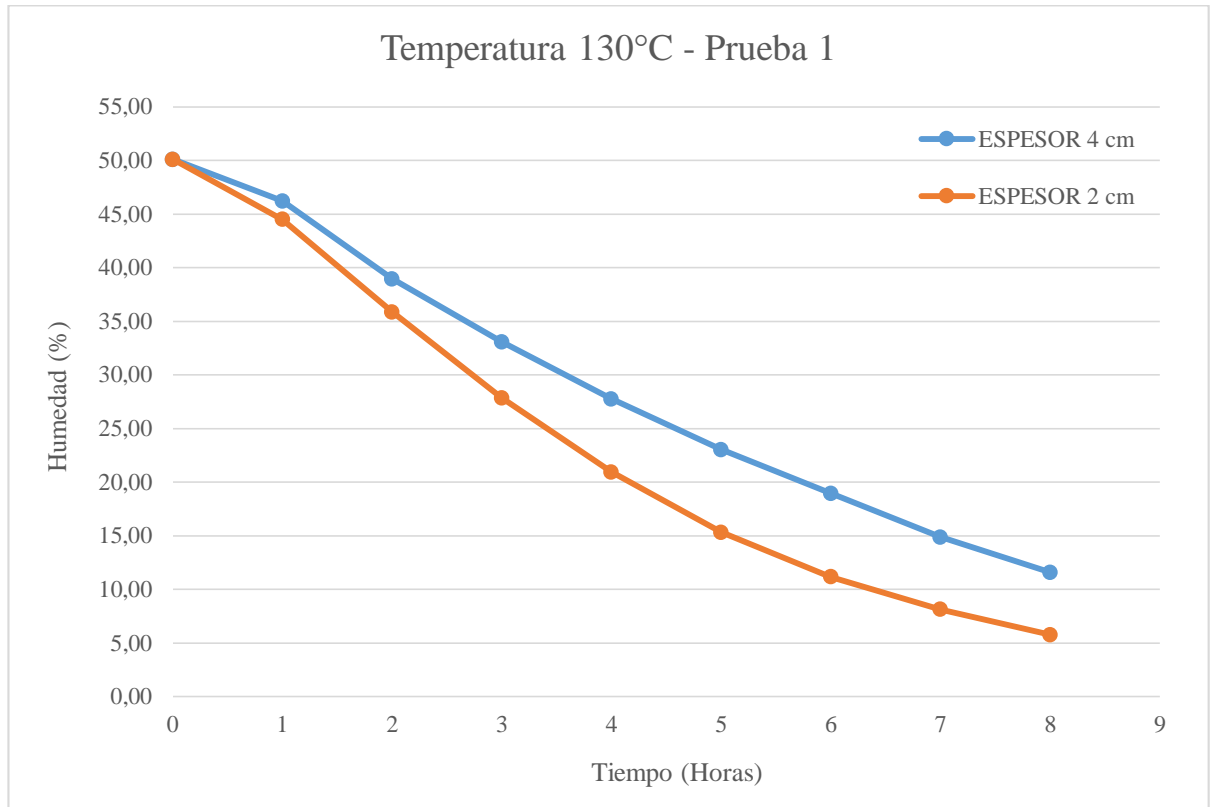


Figura 4.9 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 130°C de la prueba 1

Fuente: Autores

4.5.6.2 Prueba 2

Tabla 4.14 Humedad a las 24 horas de la prueba 2

Humedad de la Prueba 2				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,27	72,49	55,36	40,57
2	30,71	67,41	45,56	59,54
3	30,73	65,98	48,6	49,30
4	29,96	70,49	49,36	52,13
5	30,3	69,07	42,14	69,46
PROMEDIO				54,20

Fuente: Autores

Tabla 4.15 Prueba 2 con temperatura de 150°C

150°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
1	4	276,31	978,47
2	2	264,57	663,45
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
1	929,44		6,98
2	600,76		15,72
2,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	857,23		17,27
2	541,57		30,56
3,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	784,75		27,59
2	486,4		44,39
4,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	726,65		35,86
2	463,26		50,19
5,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	673,20		43,48
2	459,76		51,07
6,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	633,27		49,16
2	459,48		51,14
7,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	613,95		51,91

2	459,18	51,21
8,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	609,38	52,56
2	459,00	51,26

Fuente: Autores

Tabla 4.16 Prueba 2 con temperatura de 130°C

130°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
1	4	251,64	1038,11
2	2	258,96	759,32
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
1	1010,51		3,51
2	723,19		7,22
2,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	965,68		9,21
2	681,64		15,52
3,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	911,50		16,10
2	636,80		24,49
4,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	865,33		21,97
2	601,40		31,56
5,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	820,69		27,65
2	568,50		38,14

6,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	782,46	32,51
2	541,12	43,61
7,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	748,14	36,87
2	521,08	47,61
8,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	721,17	40,30
2	512,12	49,40

Fuente: Autores

La gráfica 4.10 se puede observar que las curvas se cruzan llegando a la séptima hora, teniendo una humedad del 3% aproximadamente. Al comparar con la prueba 1, se puede apreciar que en la tercera hora se puede obtener el mismo resultado, con un espesor de 2cm.

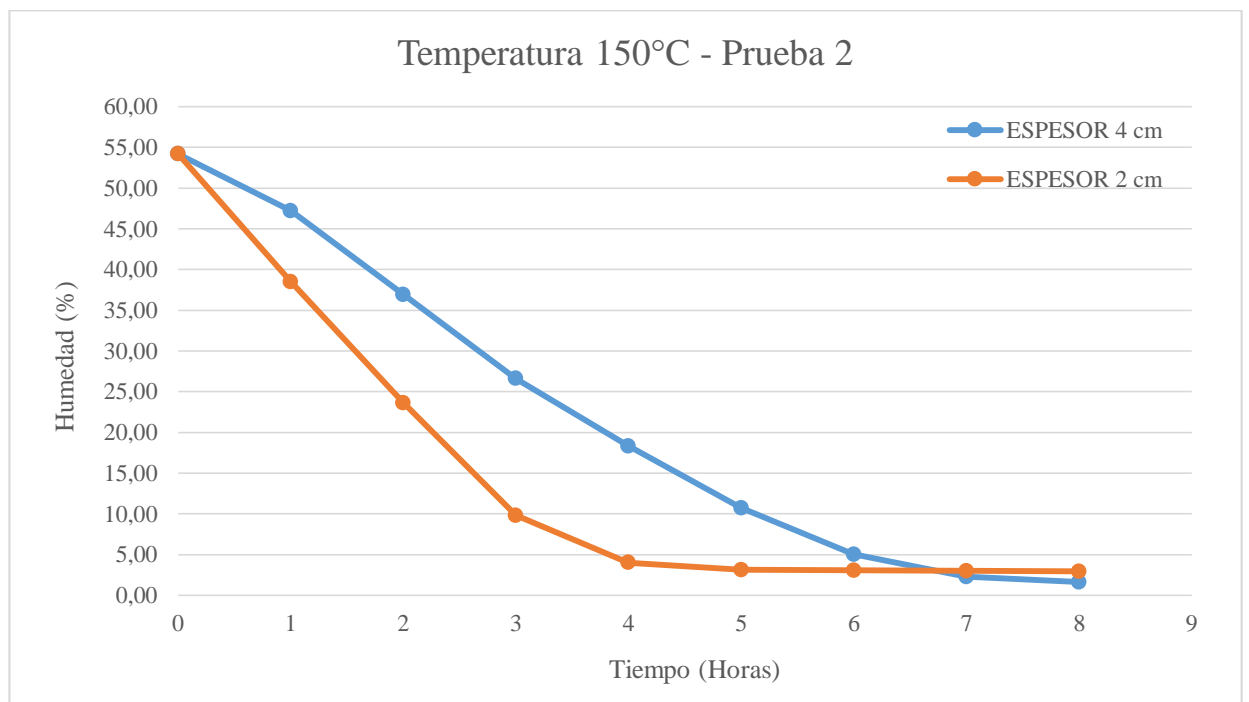


Figura 4.10 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 150°C de la prueba 2

Fuente: Autores

Para la gráfica 4.11 se obtiene el mismo resultado que la prueba 1, es decir, entre la quinta y sexta hora con un espesor de 2 cm se puede llegar a una temperatura hasta el 15% al 10%.

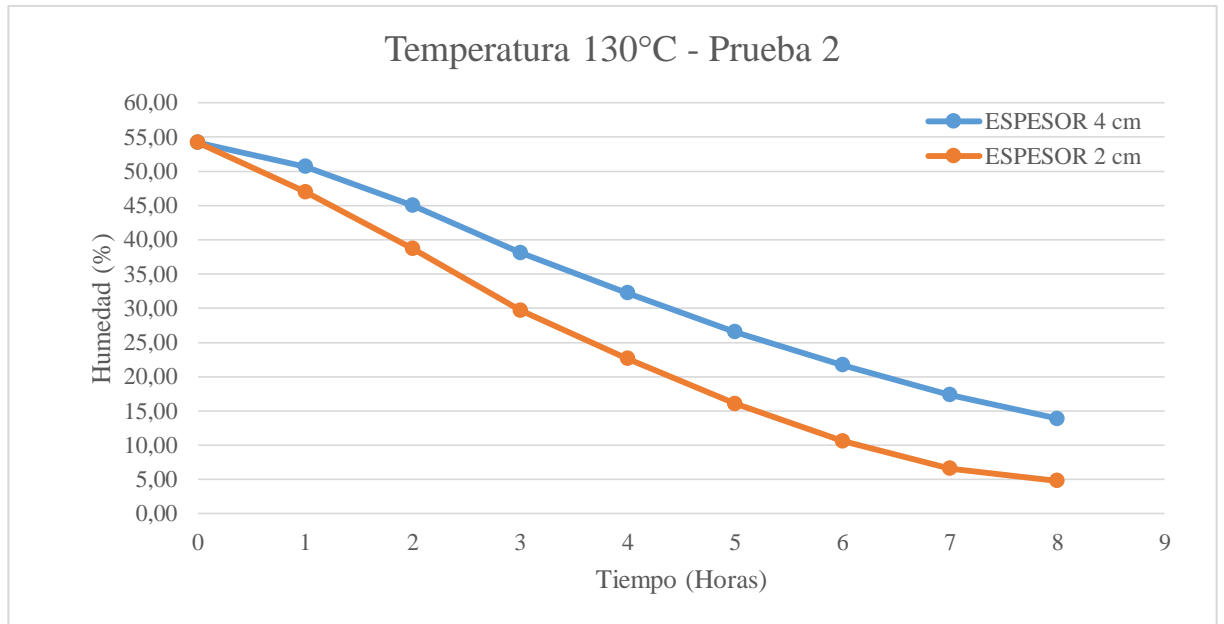


Figura 4.11 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 130°C de la prueba 2

Fuente: Autores

4.5.6.3 Prueba 3

Tabla 4.17 Humedad a las 24 horas de la prueba 3

Humedad de la Prueba 3				
Número	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad %
1	30,27	61,26	48,99	39,59
2	30,71	61,43	49,58	38,57
3	30,73	54,82	40,46	59,61
4	29,96	58,59	42,56	55,99
5	30,3	50,96	36,39	70,52

PROMEDIO	52,86
-----------------	--------------

Fuente: Autores

Tabla 4.18 Prueba 3 con temperatura de 150°C

150°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
1	4	251,84	956,68
2	2	259,19	645,31
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
1	918,70		5,39
2	602,83		11,00
2,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	866,65		12,77
2	557,46		22,75
3,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	811,89		20,54
2	520,91		32,22
4,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	761,6		27,68
2	500,95		37,39
5,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	716,84		34,03
2	492,76		39,51
6,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	686,06		38,39
2	492,07		39,69

7,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	664,02	41,52
2	491,75	39,77
8,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	649,59	43,57
2	491,13	39,93

Fuente: Autores

Tabla 4.19 Prueba 3 con temperatura de 130°C

130°C			
Número	Espesor (cm)	Peso Tarro (gr)	Peso Tarro + Muestra Húmeda (gr)
1	4	276,38	941,03
2	2	264,68	565,93
1,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida%
1	918,36		3,41
2	541,29		8,18
2,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	879,58		9,25
2	506,34		19,78
3,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	837,44		15,59
2	480,47		28,37
4,0 horas			
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)		Humedad Perdida %
1	799,13		21,35
2	460,36		35,04
5,0 horas			

Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	760,94	27,10
2	444,55	40,29
6,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	730,36	31,70
2	431,66	44,57
7,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	710,45	34,69
2	421,36	47,99
8,0 horas		
Número	Peso Tarro + Muestra Seca (gr)	Humedad Perdida %
1	697,32	36,67
2	416,36	49,65

Fuente: Autores

La figura 4.12 muestra que para llegar a humedades del 15% al 10%, con un espesor de 2 cm se necesita un tiempo de 5 horas; y si se utiliza un espesor de 4 cm se llega con 6 horas.

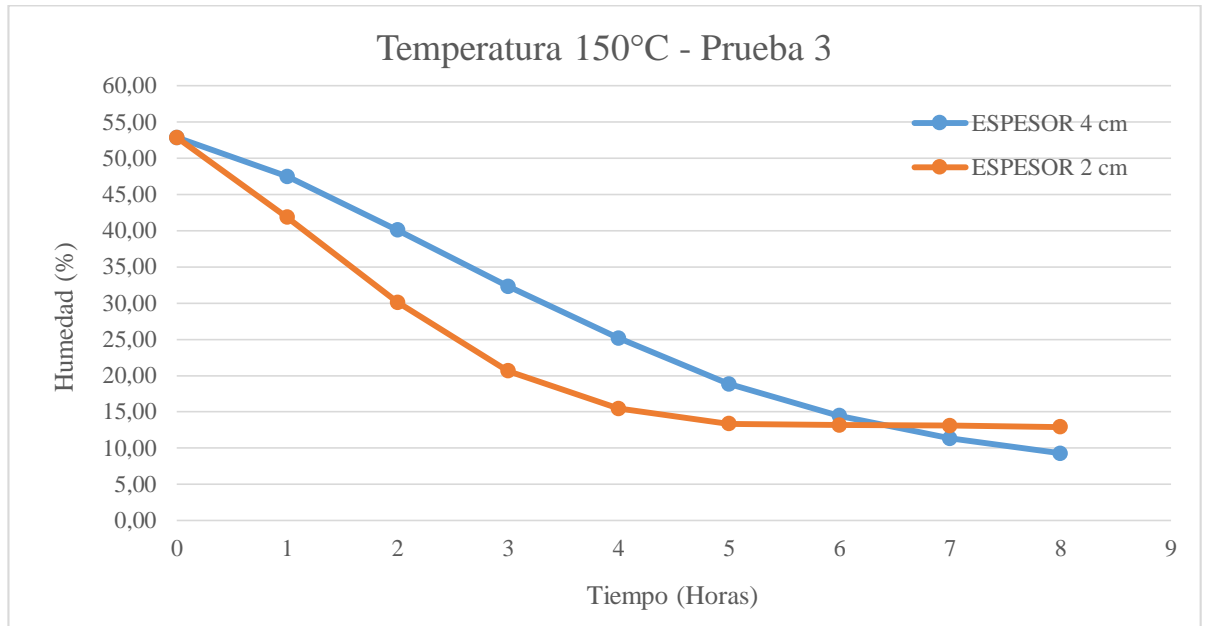


Figura 4.12 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 150°C de la prueba 3

Fuente: Autores.

Por último, la figura 4.13 indica que con espesor de 2 cm se necesita un tiempo de 5 horas para humedades del 15% al 10%, y con un espesor de 4 cm se necesita más de 8 horas.

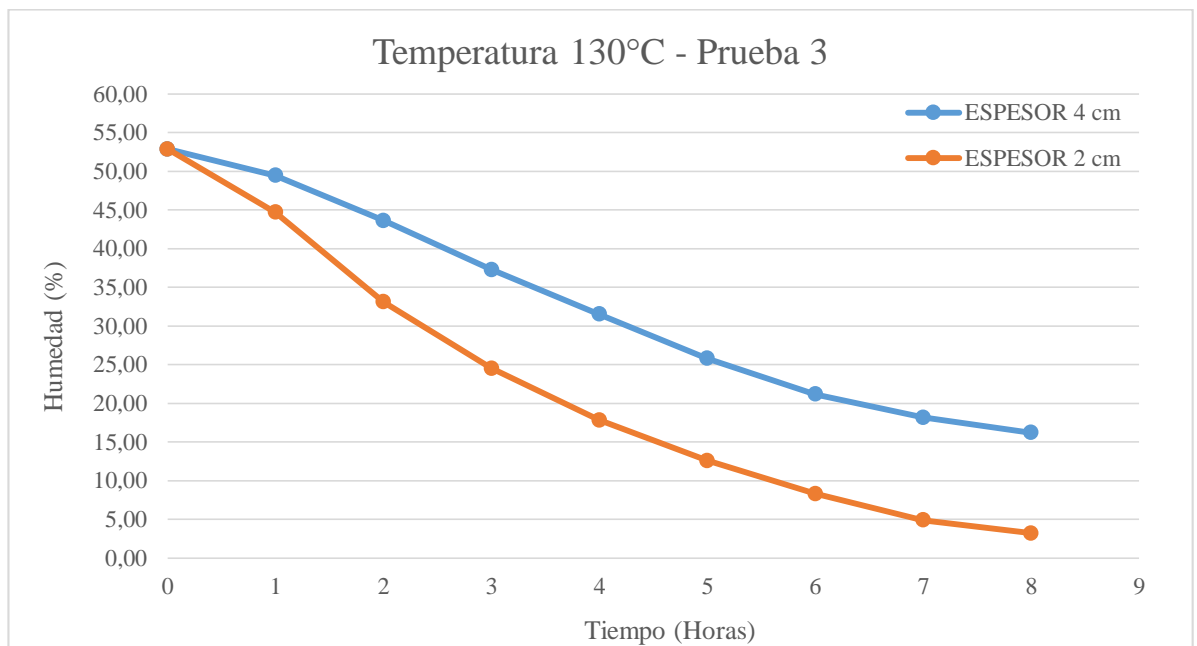


Figura 4.13 Curva del tiempo vs. humedad de los lodos residuales a una temperatura de 130°C de la prueba 3

Fuente: Autores.

Como se pudo evidenciar en las 6 curvas presentadas anteriormente, no es necesario colocar temperaturas altas a los lodos residuales, ya que después de 5 horas empieza a estabilizarse y se ralentiza su secado.

Para poder comprobar si los lodos residuales se comportaron de igual forma los tres días, se presenta a continuación un análisis comparativo de las tres pruebas.

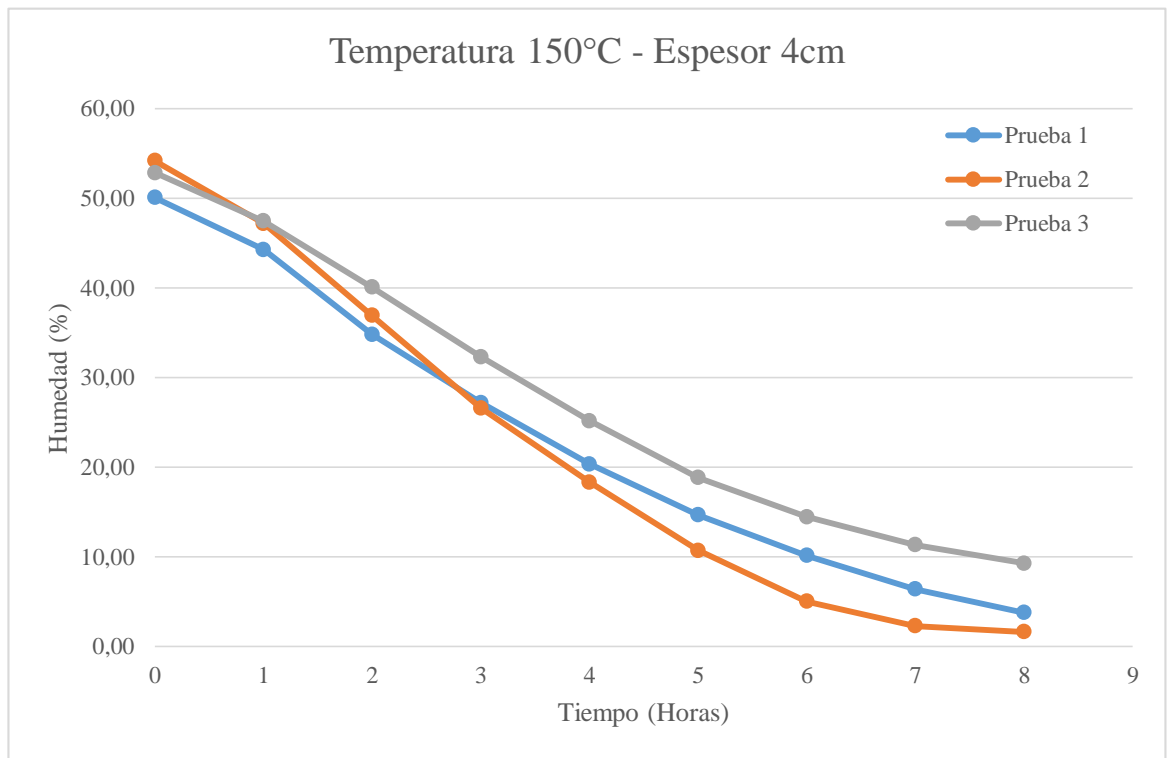


Figura 4.14 Curva comparativa con temperatura de 150°C y espesor 4 cm

Fuente: Autores

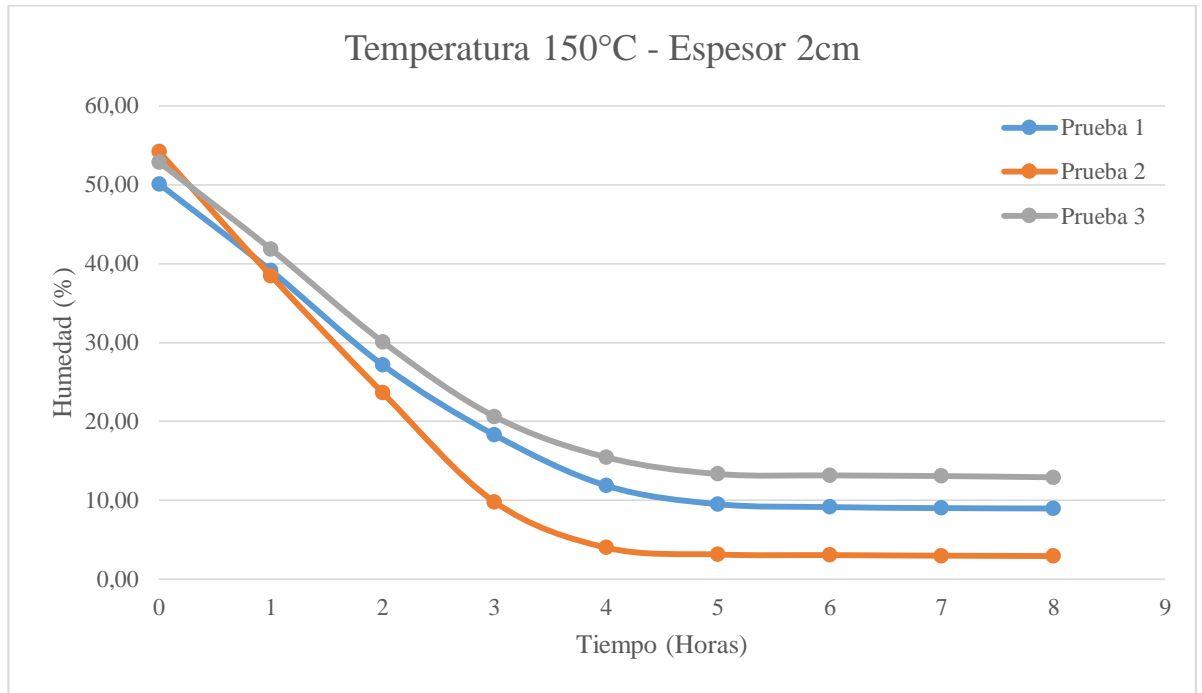


Figura 4.15 Curva comparativa con temperatura de 150°C y espesor 2 cm

Fuente: Autores

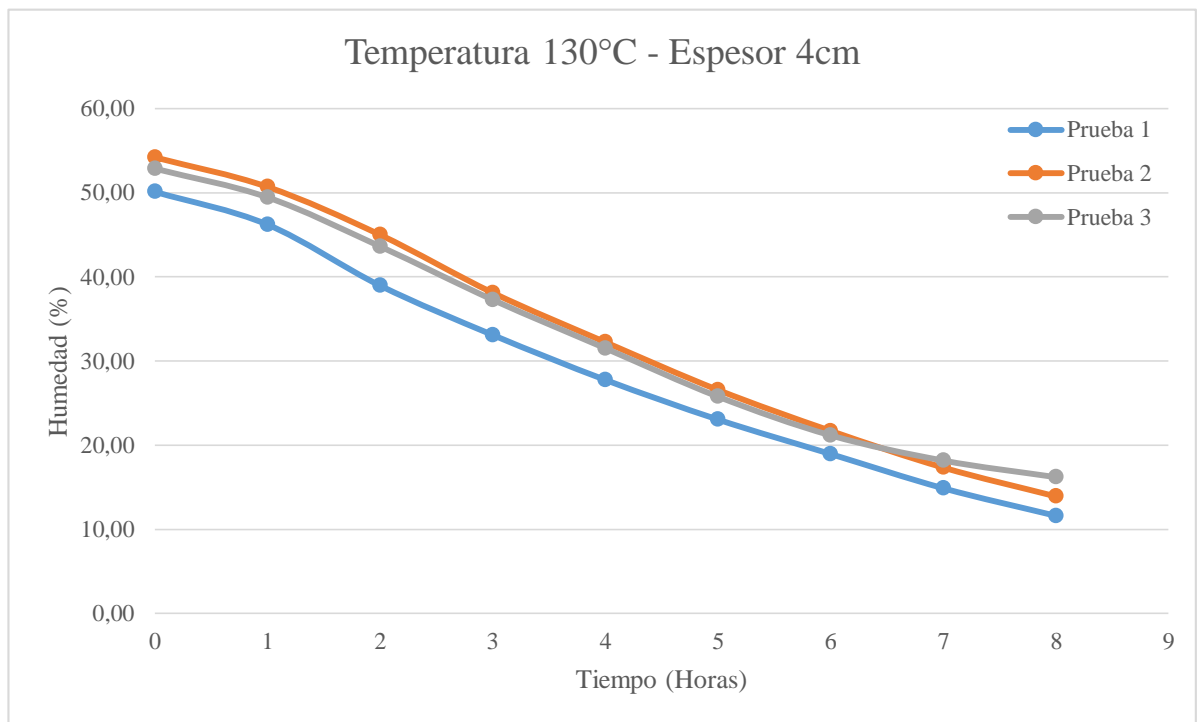


Figura 4.16 Curva comparativa con temperatura de 130°C y espesor 2 cm

Fuente: Autores

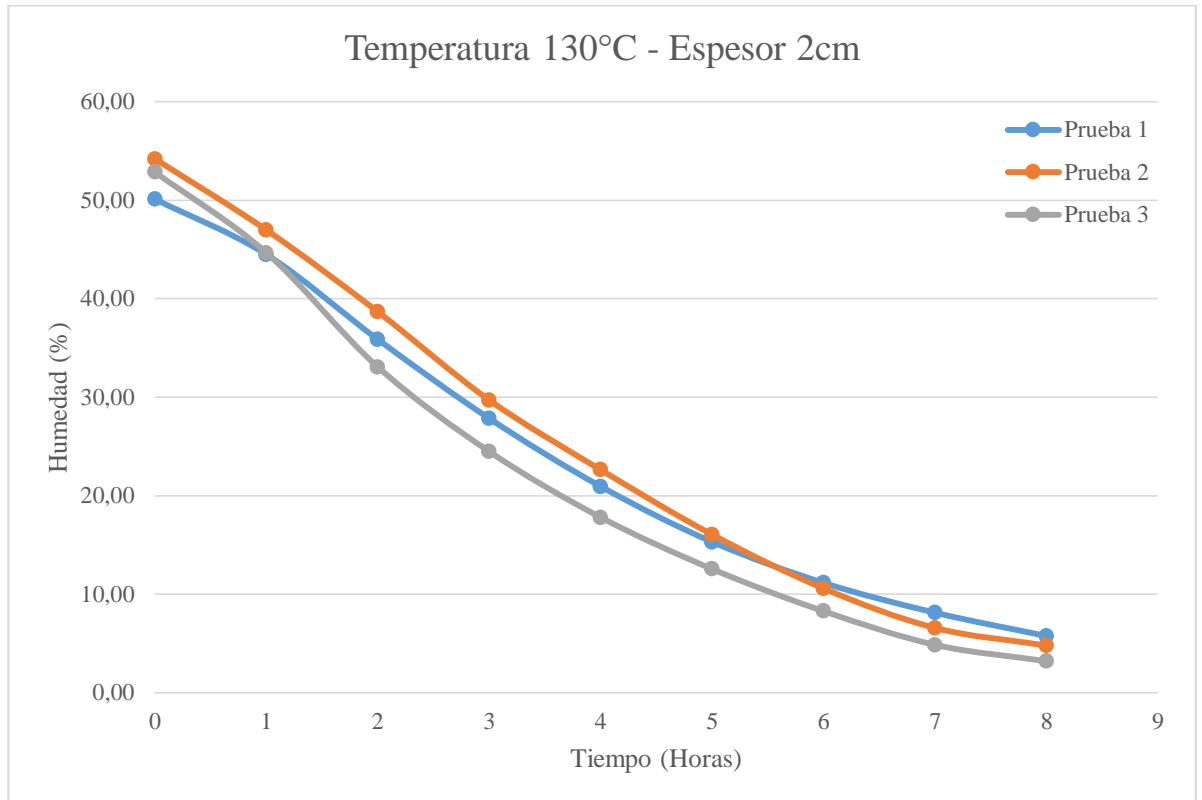


Figura 4.17 Curva comparativa con temperatura de 130°C y espesor 2 cm

Fuente: Autores

Se puede observar que la prueba 2 varía a comparación de las pruebas 1 y 2 en la gráfica 4.36, por lo que no se utilizará como dato para elegir la temperatura óptima ya que puede afectar considerablemente el resultado.

Se realiza una media de las tres pruebas y se gráfica a continuación para escoger la temperatura y el espesor más apto para que ingrese a la cámara de secado.

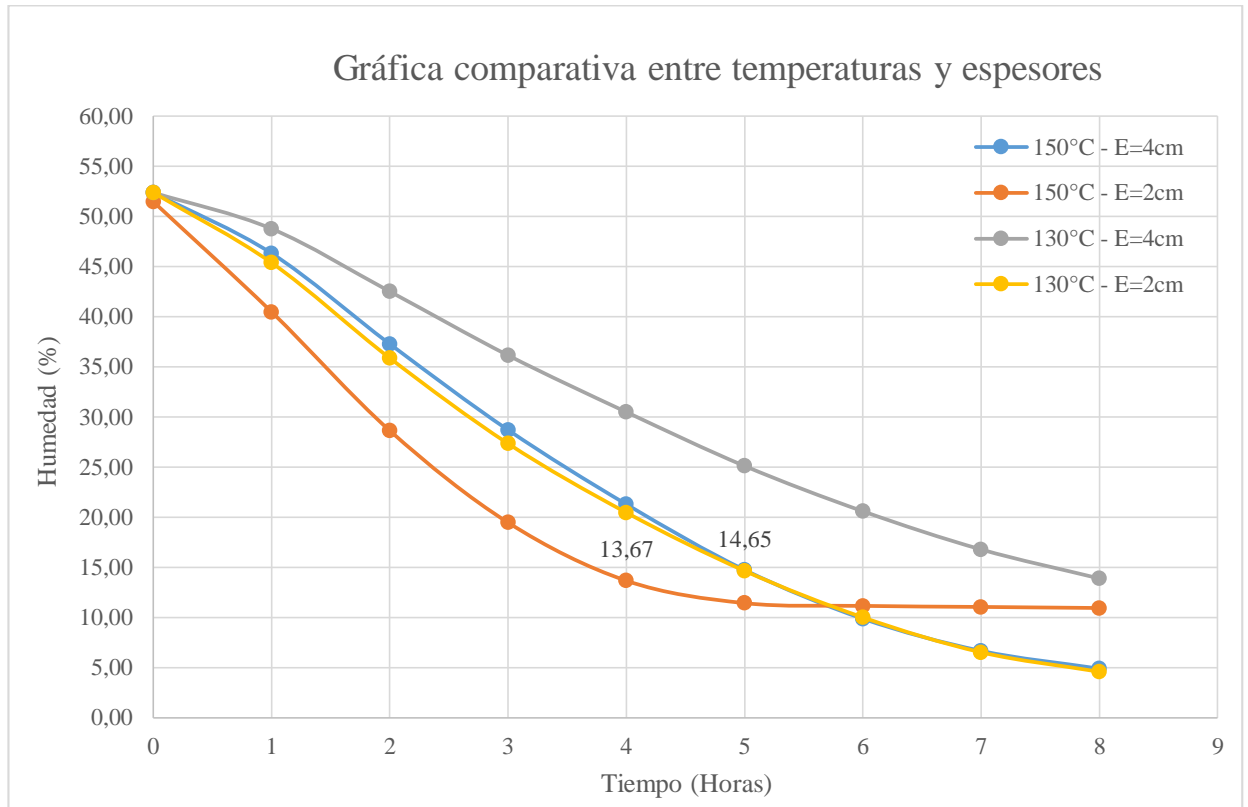


Figura 4.18 Curvas humedad vs tiempo con temperatura de 150°C, 130°C y espesores de 4 cm y 2 cm

Fuente: Autores

Gracias a la gráfica se puede observar que entre más calor se aplique a los lodos residuales y menos espesor tenga puede secarse rápidamente las primeras horas, sin embargo a partir de la quinta hora se necesita mucho más tiempo para reducir su humedad. Si se emplea 150°C con un espesor de 4 cm o 130°C con 2 cm de espesor, las curvas son semejantes, se puede ver que su forma es aproximadamente una línea recta, puede reducir su humedad al 5% en 8 horas.

Para la elección se debe destacar que lo principal ante todo es que los lodos residuales estén el menor tiempo posible en la cámara para que el volumen de secado sea el máximo.

Por lo tanto, con base a todas las gráficas vistas anteriormente la opción más apta para aplicar en la cámara de secado es una temperatura de 150°C, con un espesor de 2cm. El tiempo que los lodos se encuentren en la cámara será de 4 horas, para obtener una humedad del 13,67% aproximadamente.

4.5.7 Cámara

Las cámaras de secado con espacios cerrados, el cual tiene dos funciones: proteger materiales delicados de la humedad exterior, es decir, el aire debe tener una humedad baja; o disminuir la humedad que posee el material.

Generalmente los materiales que se utilizan para la cámara de secado son el adobe cocido, los ladrillos de arcilla quemada, y demás materiales de mampostería. Además, en estos últimos años han empleado estructuras metálicas como es: el aluminio, el acero galvanizado, entre otros. (Arbeláez Gomez & Feria Hoyos, 2003)

Las cámaras que son construidas con elementos metálicos y resistentes a la corrosión como es el aluminio, no van a requerir un mantenimiento periódico como las cámaras que son construidas de mampostería, concreto, bloque, etc.

Por lo tanto, para el proyecto la utilización de acero galvanizado no es el ideal, debido a que el gas está compuesto en un gran porcentaje de metano, por lo que no soportaría la corrosión. Por lo que se utilizará paneles de aluminio, pero este no será puro, ya que para resistir altas temperaturas es mejor aleaciones de aluminio que contienen resinas de silicona, el cuál es una de las propiedades más importantes que se debe velar en este trabajo.

Se presentan algunas características del aluminio que lo hacen ideal para el armado de una cámara de secado:

- Se calientan en poco tiempo
- Resisten altas temperaturas
- Se instalan fácilmente
- Fáciles de trasladar
- Tiene un buen aislamiento

Además, para la protección de la cámara de secado es necesario una pequeña construcción tipo bodega, los materiales a usar serán de bloque o ladrillo, así el calor del aire no le afectará significativamente a la cámara de secado.

4.5.8 Bandas Transportadoras

Existen dos métodos para emplear las bandas transportadoras: se puede utilizar colocando los lodos residuales en las bandas transportadoras y esta avance a una velocidad determinada para que cumpla un recorrido de 4 a 5 horas; o se puede colocar el lodo y este permanecer estático hasta que haya terminado su tiempo y luego recorrer el lodo nuevo.

El material de la cinta debe resistir altas temperaturas, estos pueden ser el caucho, la fibra de vidrio, entre otros. Debido a que además debe soportar grandes pesos la fibra de vidrio no soportaría grandes magnitudes, por lo que la banda será de caucho. Varias empresas del Ecuador como también en el mundo aseguran poder resistir hasta 200°C continuamente.

Para el diseño de las bandas, se debe tener en cuenta un ancho mínimo el cuál es 5,5 veces el tamaño prominente del agregado a utilizar; sin embargo, los lodos residuales no es a granel por lo que no es posible utilizar la fórmula, no obstante se dejará 10 cm libres a cada lado.

4.5.9 Opciones de Diseño

Una vez concluido todos los estudios que se realizaron a diferentes temperaturas y luego de haber determinado el sistema de conducción para el gas, se pasa a mostrar las opciones de diseño de la cámara de secado.

Las opciones incluirán dos bandas en las cuales va a llegar las dos tuberías que vienen desde los escapes del motor generador de biogás, con una temperatura final de 126.58°C por cada tubería.

Se toma en cuenta que el lodo ingresará 6 veces al día a la cámara, ya que cada 4 horas ingresa un nuevo fango; como se mencionó anteriormente las bandas transportadoras pueden programarse a una velocidad determinada para que el lodo pase por 4 horas por la cámara o se puede colocar todo el volumen de lodo y esperar 4 horas hasta que esté con una humedad del 15%.

A continuación, se puede observar los 3 tipos de diseño para la cámara de secado, aplicando todos los datos que se obtuvieron anteriormente, con la finalidad de seleccionar la mejor opción y la más óptima.

4.5.9.1 Opción 1

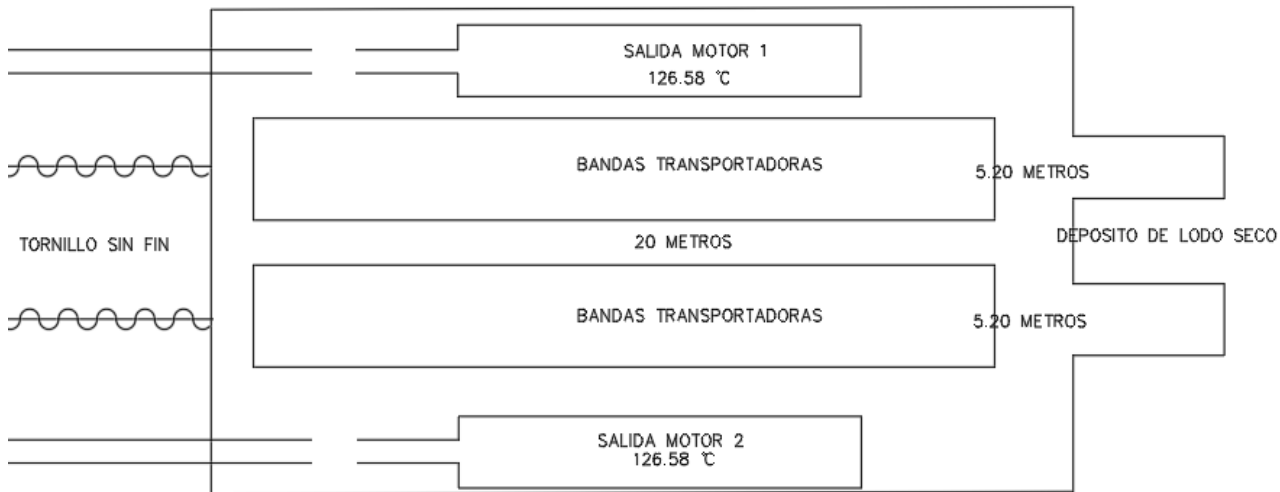


Figura 4.19 Opción 1 de cámara de secado, vista en planta.

Fuente: Autores

En esta cámara de secado, se tiene una vista en planta en donde se puede observar dos bandas paralelas de 20 metros de largo por 5,2 metros de ancho. Igual cuenta con dos tornillos sin fin para mezclar y subir el lodo hasta la abertura.

El volumen a secar es de 24 m³/día, debido a que el volumen de lodo a ingresar es de 4 m³ cada 4 horas.

El volumen de la cámara de secado va a ser de 286 m³, tomando en cuenta que el largo va a ser de 22 m por 13 m de ancho y 1 m de alto.

$$T = \frac{PV}{nR}$$

$$T = \frac{4,964 \text{ atm} * 286000 \text{ L}}{29926,5495 \text{ mol} * 0,08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * ^\circ\text{K}}}$$

$$T = 578,17 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T = 16,08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como se tiene una temperatura mucho menor a la deseada, este diseño tampoco se puede utilizar como cámara de secado.

4.5.9.2 Opción 2

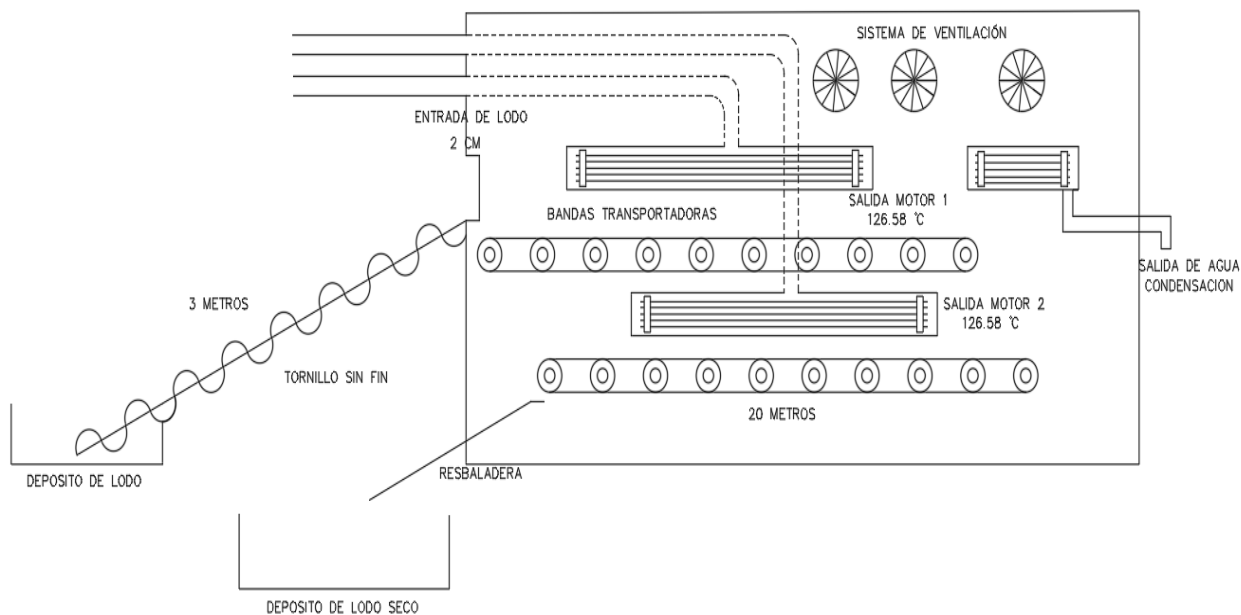


Figura 4.20 Opción 2 de cámara de secado, vista frontal

Fuente: Autores

Esta cámara de secado tiene dos bandas como se observa en el gráfico, la longitud de las bandas es de 20 metros por 5,2 metros de ancho.

Teniendo un volumen de secado de $24 \text{ m}^3/\text{día}$, con un volumen de lodo residual de 4 m^3 cada 4 horas.

El volumen de la cámara va a ser de $241,5 \text{ m}^3$, siendo la longitud de 23 metros por 7 metros de ancho y 1,5 metros de alto.

El sistema de esta cámara es la misma que la opción 1, solo que se agrandó la cámara de secado para poder sacar el mayor volumen posible.

$$T = \frac{PV}{nR}$$

$$T = \frac{4,964 \text{ atm} * 241500 \text{ L}}{29926,5495 \text{ mol} * 0,08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * ^\circ\text{K}}}$$

$$T = 254,71 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T = -18,28 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 0^\circ\text{C}$$

La opción 2 tampoco es viable debido a que el volumen es bajo y la temperatura de la cámara sería de 0°C.

4.5.9.3 Opción 3

Vista frontal

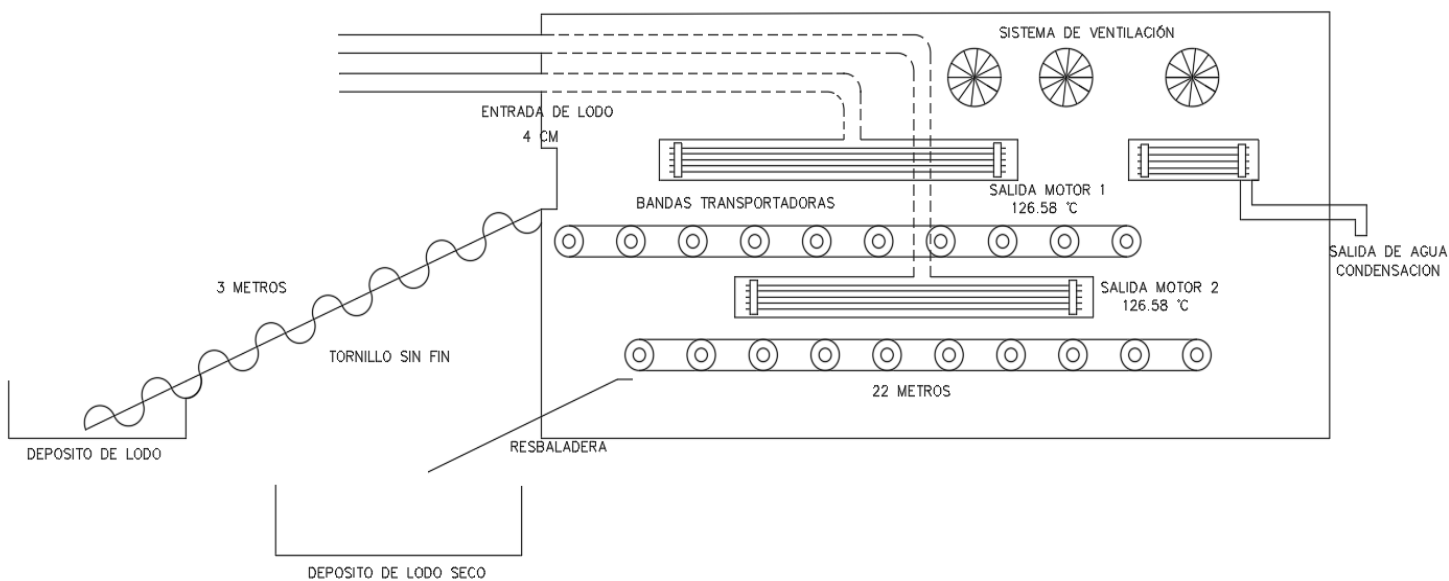


Figura 4.21 Opción 3 de cámara de secado, vista frontal

Fuente: Autores

Vista en planta

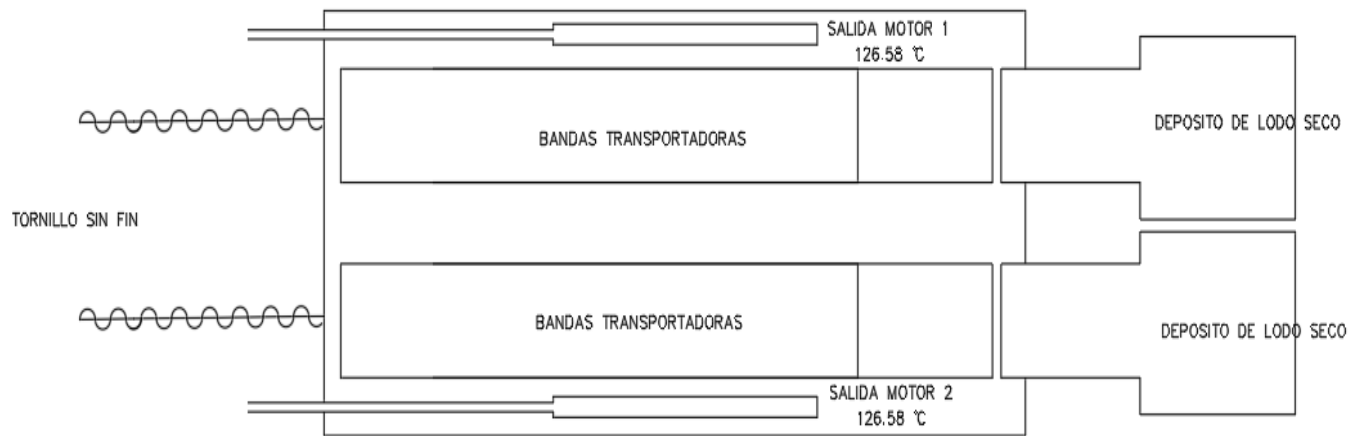


Figura 4.22 Opción 3 de cámara de secado, vista en planta

Fuente: Autores

Esta cámara de secado tiene cuatro bandas como se observa en la vista de planta, la longitud de las bandas es de 22 metros por 5,2 metros de ancho. Se diseñó esta cámara para abarcar todo el lodo que llega al relleno sanitario.

Teniendo un volumen de secado de 52.8 m³/día, con un volumen de lodo residual de 8.8 m³ cada 4 horas.

El volumen de la cámara va a ser de 448.5 m³, siendo la longitud de 23 metros por 13 metros de ancho y 1,5 metros de alto.

El sistema de esta cámara es la misma que la opción 1 y 3, solo que se agrandó la cámara de secado y se optó por poner 4 bandas en total para poder sacar el mayor volumen posible.

$$T = \frac{PV}{nR}$$

$$T = \frac{4,964 \text{ atm} * 448500 \text{ L}}{29926,5495 \text{ mol} * 0,08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * ^\circ\text{K}}}$$

$$T = 453,34 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T = 180,34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este diseño si se puede utilizar, en primer lugar por la temperatura a la que se puede llegar y en segundo lugar debido al volumen diario que puede secarse.

4.6 Análisis Técnico

Analizando las opciones anteriores, la primera cámara tiene un volumen de 286 m³ con un volumen de secado de 24 m³/día, la segunda cámara tiene un volumen de 241,5 m³ para secar 24 m³ por día, y la cámara número 3 tiene un volumen de 448,5 m³ y puede secar un volumen de 52,8 m³/s. Además las dos primeras cámaras con el volumen que poseen no pueden generar la temperatura necesaria para secar los lodos residuales.

Con estos resultados, el sistema más ideal sería el tres, considerando que puede secar el 100% de los lodos que llegan al relleno sanitario, además de poder tener la temperatura ideal para secar a los lodos residuales; ya que como la Ley de Charles establece, la temperatura es directamente proporcional al volumen, es decir, a mayor volumen mayor temperatura.

4.7 Análisis Ambiental

La cámara de secado en el tema ambiental no producirá efectos significativos en el medio ambiente en el momento de su construcción, en primer lugar porque la cimentación no será profunda al no necesitar que soporte grandes pesos por lo que existirá poco movimiento de tierras, además de que el sitio en donde se va a localizar no contiene ninguna fauna y solo se encuentra césped en su lugar.

El ruido no será ningún problema ya que las bandas transportadoras no ocasionan fuertes sonidos, sin embargo el olor que se generará al secar los lodos será importante dentro de la cámara de secado ya que cuando se realizaron las pruebas de laboratorio producía olores no tan agradables para las personas.

4.8 Análisis Económico

A continuación, se muestra un análisis global económico de la construcción de la cámara de secado, tomando en cuenta desde los materiales que van a transportar el calor desde el motor generador de energía hasta nuestra cámara de seca, los precios que se presentan son cotizados con varias empresas del Ecuador como: Mega Hierro, Continental, Frank Ferretería, Dismaconcobre, Ludepa, entre otras.

Tabla 4.20 Costo total de la cámara de secado

Ítem	Descripción	Unidad	Valor Unitario	Cantidad	Valor total
1	Estructura	c/u	7000	1	7000
2	Tubería de cobre de 4" x 6 metros	m	605	30	18150
3	Uniones de cobre para 4"	c/u	30.58	32	978.56
4	Fibra de vidrio	c/u	44	6	264
5	Bandas de caucho	c/u	900	4	3600
6	Bomba Eléctrica	c/u	350	4	1400
7	Tornillo sin fin	c/u	900	2	1800
8	Ventiladores	c/u	425	2	850
9	Planchas de aluminio	m ²	98.56	100	9856
10	Varios	c/u	500	1	500
TOTAL					44398.56

Fuente: Autores

Aproximadamente el costo total de una cámara de secado con la conexión de tubería desde el escape de los motores generadores está es 44398,56 dólares americanos, sin incluir el IVA.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

- Mediante la ley de Fourier, fórmula de la transferencia de calor por convección, se llegó a determinar la temperatura final que va a tener cada tubería de cobre, desde el escape de los motores generadores ubicados en la planta de biogás de EBE BGP Energy hasta la cámara de secado, situado a una distancia de 90 metros, de $126,09^{\circ}\text{C}$ por cada tubería. Y gracias a la ley de los gases ideales se calculó la temperatura total en la cámara de secado, de $180,34^{\circ}\text{C}$. Sin embargo la cámara puede perder calor por las paredes o alguna otra variable que no se tomó en consideración, por esta razón se realizó el secado de lodos en el laboratorio a temperaturas de 150°C y 130°C .
- Para el secado térmico de los lodos residuales las dos variables principales que se deben tomar en cuenta son el espesor y la cantidad de energía a aplicar. Esto se refleja en las gráficas que se obtuvieron al secar los fangos en el horno industrial, mientras más alta es la temperatura y menos espesor tenga, más rápido es el secado las primeras horas, en el caso de la temperatura de 150°C es a las primeras 4 horas; sin embargo a partir de ese momento para perder más humedad se necesita una cantidad mayor de horas. Mientras que si se disminuye la temperatura y se aumenta su espesor, el secado de los lodos residuales no es tan violento en las primeras horas; sin embargo en la octava hora el lodo tuvo el 5% de humedad cuando la temperatura fue de 130°C con $E=2\text{ cm}$ o 150°C con $E=4\text{ cm}$, esto significa que no es necesario emplear altas temperaturas o espesores pequeños si se quiere llegar a porcentajes bajos de humedad.
- La forma de las curvas humedad vs tiempo que presentan los lodos, se determina que es en forma de J invertida. En las gráficas con mayor temperatura y menor espesor se pudo apreciar de mejor manera, ya que el secado fue mucho más rápido, mientras que en el resto de figuras se observó que la curva era similar a una línea recta, por lo que en el tiempo de 8 horas la pendiente aún no disminuía.

- Para este proyecto, la temperatura ideal que se debe usar para el secado térmico de los lodos residuales a partir del gas caliente que emana por los escapes de los motores generadores de biogás es de 150°C, y que su espesor sea de 2cm, para así reducir su humedad hasta un 13,67% aproximadamente.
- Con la cámara de secado diseñada, el volumen de fango a secarse va a ser de 52,8 metros cúbicos por día, trabajando las 24 horas; por lo que se podrá secar el 100% del volumen de lodo residual que llega al Relleno Sanitario de Pichacay. Por lo tanto, si es factible el aprovechamiento del calor remanente de los generadores de energía para secar térmicamente los lodos residuales provenientes de las plantas de aguas residuales de ETAPA EP, el volumen total de lodo diario podrá ser destinado como combustible sustituto a las cementeras o ingresado al relleno sanitario.

RECOMENDACIONES:

- Se debe realizar un análisis más a profundidad de la cámara de secado, tomando en cuenta que la cámara al ser un lugar amplio puede perder energía por las paredes, ya que su material es de aluminio y su índice de conductividad térmica es alto.
- En los ensayos de laboratorio para la toma del porcentaje de humedad, la muestra fue extraída del horno industrial para ser pesada, por lo que se recomienda realizar un muestreo en el que el lodo residual no sufra un choque térmico, al salir del horno se expone a la temperatura del aire, por lo que los resultados pudieron verse afectados.
- Estudiar la granulometría del lodo residual luego de haber sido secado térmicamente, debido a que al disminuir su humedad el material se fracciona por lo que contiene partículas gruesas, mientras que cuando mantenía humedades altas el fango tenía únicamente partículas en suspensión por lo que no se podía realizar un ensayo granulométrico. Para verificar si es viable como combustible sustituto en las cementeras.
- Seguir investigando en el secado térmico de los lodos residuales aprovechando el calor remanente de los motores generadores, ya que es un proyecto innovador y ecológico, que en nuestro país como en muchas partes de Latinoamérica no es muy conocido y menos usado.

BIBLIOGRAFÍA

- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(132), 347-356.
- Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. En *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Colombia*.
- Baethgen, W., & Martino, D. (2000). Cambio climático, gases de efecto invernadero e implicancias en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay. *Resúmenes del Taller sobre el Protocolo de Kyoto. Ministerio de Vivienda, ordenamiento territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Uruguay*.
- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Información tecnológica*, 23(1), 163-176.
- Juliarena, P. (2013, 22 de Abril). *Gases de efecto invernadero ¿Por qué estudiar el metano?* UNICEN. <https://www.unicen.edu.ar/content/gases-de-efecto-invernadero-%C2%BFpor-qu%C3%A9-estudiar-el-metano#:~:text=Cuando%20se%20quema%2C%20es%20decir,energ%C3%ADa%20en%20forma%20de%20calor.&text=Como%20veremos%2C%20ser%20mucho%20peor%20dejar%20escapar%20>
- Cornejo Arteaga, P. M. de L. (2015). Aplicaciones del metano. *Con-Ciencia Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 3*, 2(4). Recuperado a partir de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/article/view/1703>
- EMISON. (2014, 14 de noviembre). *La función de la antorcha quemadora de biogás en la estación depuradora de aguas residuales*. AGUASRESIDUALES.INFO. <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/la-funcion-de-la-antorcha-quemadora-de-biogas-en-la-estacion-depuradora-de-aguas-residuales>

Dresser-Rand. (2015). *DRESSER-RAND Guascor engines & gensets*.

Dirección Nacional de Regulación Técnica. (2019). *PROYECTO DE REGULACIÓN: GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS MUNICIPALES*. Quito.

Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, 1(1), 8-15.

ETAPA. (s.f.). *Etapa*. Obtenido de <https://www.etapa.net.ec/Informaci%C3%B3n/Saneamiento/Plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales>

ETAPA EP. (2017). *Etapa*. Obtenido de <https://www.etapa.net.ec/informacion/saneamiento/plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-ucubamba>

Durazno, G. & Díaz J. (2009) *Modelo de gestión para el manejo del sistema de extracción, deshidratación y disposición final de lodos de lagunas de estabilización* (Tesis de maestría). Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.

Ortiz Hernández, M. L., Gutiérrez Ruiz, M. E., & Sánchez Salinas, E. (1995). Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 11(2), 105-115.

Ministerio del Ambiente. (2015). *Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, Libro VI*. Quito.

Interempresas. (21 de 06 de 2016). *Nova Ágora*. Obtenido de Solia Mix, el secado solar de lodos de última generación de Veolia Water Technologies: <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/158557-Solia-Mix-el-secado-solar-de-lodos-de-ultima-generacion-de-Veolia-Water-Technologies.html>

Canal de Isabel II. (20 de Noviembre de 2018). *Canal de Isabel II*. Obtenido de Canal de Isabel II genera 80.000 megavarios hora en su secado térmico de lodos en

Loeches : <https://www.canaldeisabelsegunda.es/-/canal-de-isabel-ii-genera-80-000-megavatios-hora-en-su-secado-termico-de-lodos-en-loeches>

Das, B. M., & González, S. R. C. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson International.

Galarza, B., Parra, P., & Vásquez, P. (2013). Relleno Sanitario de Pichacay. *Revista Galileo*, 160-166.

Astudillo Córdova, F. L., & Bermeo Barros, L. F. (2011). *Diseño de un sistema automatizado de secado, almacenamiento y despacho de lodos deshidratados de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Sustag y simulación mediante un software especializado* (Tesis de Grado).

Salinero Gervaso, M. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante guide de Matlab* (Tesis de Grado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.

Pastor, D. (2019) *Diseño y construcción de una cinta transportadora para el transporte de masa de pan* (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Landín, P. (12 de Febrero de 2018). *Tornillo sin fin: descripción y aplicaciones*. Pelandintecno - Tecnología Eso. <http://pelandintecno.blogspot.com/2018/02/tornillo-sinfin-descripcion-y.html>

Arauzo, I., & Permuy Vila, D. (2008). La gestión de lodos y el protocolo de Kyoto. El secado térmico y la valorización en cementera. *VII Coloquios de Directores Y Técnicos de Fábricas de Cemento: “Desarrollo, Innovación Y Sostenibilidad: Los Tres Pilares de La Industria Cementera, 12*.

TecnoAqua. (2016, 13 de Abril). *Infoedita Comunicación Profesional S.L.* TecnoAqua. <https://www.tecnoaqua.es/productos/20160413/suez-advanced-solutions-aqualogy-secado-termico-lodos#.X1ZYDSKhPb>

- Raytek Corporation. (2005). *Raytek*. Raytek-Direct.com. <https://www.raytek-direct.com/pdfs/cache/www.raytek-direct.com/raymt6u/datasheet/raymt6u-datasheet.pdf>
- Halcon Data. (2020). *Monitoreo de caudal de biogas de planta de producción de Pichacay*. Cuenca.
- Humboldt Mfg. Co. (2020). *Humboldt Mfg. Co. - Materials Testing Equipment*. <https://www.humboldtmfg.com/laboratory-ovens-gravity-convection.html>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinamica*. México: McGRAW-HILL.
- Jiménez Carballo, C. A. (2018). *Trasferencia de calor*.
- Koshkin, N. I., Shirkevich, M. G. (1975). *Elementary physics guide*, Moscow: “Nauka”
- Palomo, M. (2017) *Aislantes térmicos. Criterios de selección por requisitos energéticos* (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Arbeláez Gomez, J. F., & Feria Hoyos, V. R. (2003). *Diseño y construcción de una cámara para el secado de la madera*. Cartagena de indias.
- García Posada, J. M., Amell Arrieta, A., & Burbano Martínez, H. J. (2011). Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 20(20), 19-34.
- Ríos A. L., & Mustafa Izay Y. (2007). *Gases ideales: Diagramas Termodinámicos*. *Scientia Et Technica*, 1(35).
- Martines, E., & Lira, L. (2008). Cálculo de la Temperatura de Punto de Rocío a Diferentes Valores de Presión. In *Simposio de Metrología*. Santiago de Querétaro, México (Vol. 22).

San Martín Monsalve, C. (2013). *Estudios de corrosión y degradación de monoetanolamina en planta productora de dióxido de carbono* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Universidad de Sevilla. (2018, 13 febrero). *Propiedades del agua*. Departamento de Física Aplicada III: Universidad de Sevilla.

http://laplace.us.es/wiki/index.php/Propiedades_del_agua#:~:text=Puesto%20que%20el%20vapor%20es,producirse%20el%20cambio%20de%20fase.

Eastern Research Group, Inc. & Carbon Trade, Ltd. (2007, 7 octubre). *Estudio de Prefactibilidad del Potencial del Biogás: Relleno Pichacay*. Cuenca, Ecuador.

EBE BGP Energy. (2019). *Red de Distribución de Pozos del Relleno Sanitario de Pichacay*. Cuenca, Ecuador.

ANEXOS

Anexo 1. Ensayo de contenido de humedad, por el método de secado al horno según (NTE, Mecánica de suelos, 1982) o método gravimétrico

Norma referencial: INEN 690.

Muestra

La muestra que se utiliza para el ensayo de laboratorio son lodos residuales, que se encuentran en el Relleno Sanitario de Pichacay, se recoge cierta cantidad de volumen para ser llevada al laboratorio que nos proporciona la Universidad.

Equipo

- Horno de secado: Debe ser regulado termostáticamente para mantener una temperatura de 110 °C por 24 horas.
- Balanzas: Se necesita solo una balanza para pesar las muestras secas y húmedas.
- Recipiente: Estos recipientes son de tamaño adecuado, son de material resistentes a la corrosión, no alteran su masa por el fenómeno repetitivo del calentado y enfriado. Cada recipiente tiene su número para ser ubicado.



Equipo utilizado para el ensayo de humedad

Fuente: Autores

Procedimiento

Se debe determinar el peso del recipiente (g) siempre y cuando el recipiente se encuentre seco y limpio para luego ser colocada la muestra de lodo cuidadosamente en el recipiente, cuidando que el exterior no exista partículas adheridas, se procede a pesar la muestra con el recipiente (g).

Se coloca el recipiente con la muestra húmeda en el horno de secado, manteniendo una temperatura de 110 °C. Se lo deja en el horno por 24 horas y después se lo saca del horno y se lo vuelve a pesar para poder determinar su humedad.

Cálculos

El contenido de humedad se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\% W = \frac{(B - A) - (C - A)}{(B - A)} * 100$$

Donde,

W = Humedad en %

A = Peso del tarro en g

B = Peso del tarro + muestra del suelo húmeda en g

C = Peso del tarro + muestra del suelo seca en g

Anexo 2. Determinación de la temperatura final mediante la fórmula de Fourier

Equipo.

Se utilizó un pirómetro para calcular la cantidad de calor que está saliendo por el escape del motor generador de energía.



Equipo utilizado para recolectar datos del escape del motor

Fuente: Autores

Procedimiento

Se midieron los datos de la temperatura inicial mediante un pirómetro por tres días diferentes en tres intervalos de tiempo, en este caso fueron en la mañana, en la tarde y en la noche.

Cálculos

La temperatura final se obtuvo mediante la fórmula:

$$Q_t = \frac{K \cdot A \cdot (T_a - T_b)}{L}$$

Donde:

Q = transferencia de calor (kilocalorías)

t = tiempo (horas/minutos/segundos)

k = coeficiente de conductividad

A = área en m^2

T_a = temperatura mayor en $^{\circ}C$

T_b = temperatura menor en $^{\circ}C$

L = longitud en m

Anexo 3. Convenio entre EMAC EP y ETAPA EP



CONVENIO DE COOPERACIÓN INTERINSTITUCIONAL ENTRE LA EMPRESA PUBLICA MUNICIPAL DE TELECOMUNICACIONES, AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DE CUENCA "ETAPA EP" Y LA EMPRESA PUBLICA MUNICIPAL DE ASEO DE CUENCA "EMAC EP", PARA LA "DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS DESHIDRATADOS DE LAS PLANTAS POTABILIZADORAS Y DEPURADORAS DE ETAPA" Y PARA "EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO"

En la ciudad de Cuenca a 02 días de enero de 2014, concurren para la celebración del presente convenio, por una parte la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca EMAC EP, representada por la Ing. Valeria Villavicencio Vega, en su calidad de Gerente General; y por otra, la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA EP representada por el Dr. Oswaldo Tamariz Valdivieso, en su calidad de Gerente General, con el objeto de suscribir el presente convenio, al tenor de las siguientes cláusulas:

CLAUSULA PRIMERA: ANTECEDENTES

1.01.- La Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca "EMAC EP" es una Empresa Municipal de servicio a la ciudadanía, constituida mediante Ordenanza Municipal de fecha 05 de marzo de 2010, como una persona jurídica de derecho público, con patrimonio propio, dotada de autonomía presupuestaria, financiera, económica, administrativa y de gestión, que opera sobre bases comerciales y cuyo objetivo es la prestación de servicios públicos de barrido, limpieza, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos no peligrosos y peligrosos, así como del mantenimiento, recuperación, readecuación y administración de áreas verdes y parques en el cantón Cuenca incluyendo el equipamiento en ellas construidas o instaladas, sus servicios complementarios, conexos y afines que pudieren ser considerados de interés colectivo.

Como resultado de la disposición final de desechos sólidos en el Relleno Sanitario de Pichacay, la descomposición de los mismos en los cubetos del relleno y la infiltración de agua lluvia se genera gran cantidad de lixiviados, desecho líquido al que se le debe dar un adecuado tratamiento y disposición final para lo cual se ha visto la necesidad de que los mismos sean descargados en el sistema de recolección e intercepción, y tratados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba conforme se lo ha venido realizando desde el año 2001, esto es a partir del inicio mismo de operación del relleno sanitario de la ciudad de Cuenca.

En el Art. 4.2.2.2 del "LIBRO VI, ANEXO 1 NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA" del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria – TULAS -, se establece que "El proveedor del servicio de tratamiento de la ciudad podrá solicitar a la Entidad Ambiental



de Control, la autorización necesaria para que los regulados, de manera parcial o total descarguen al sistema de alcantarillado efluentes, cuya calidad se encuentre por encima de los estándares para descarga a un sistema de alcantarillado, establecidos en la presente norma.

El proveedor del servicio de tratamiento de la ciudad deberá cumplir con los parámetros de descarga hacia un cuerpo de agua, establecidos en esta Norma.”

1.02.- Por su parte la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento –ETAPA EP es una empresa que tiene entre unos de sus principales objetivos, la prestación del servicio público de agua potable, alcantarillado, tratamiento de lixiviados, telecomunicaciones (telefonía fija, internet, transmisión de datos entre otros) y sus servicios complementarios y conexos. Para cumplir con sus servicios de saneamiento ambiental cuenta con el Proyecto de Mejoramiento Integral del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, siendo uno de sus dos componentes principales la extracción y deshidratación de lodos acumulados en el complejo de Lagunas de Estabilización.

Entre el 16 de diciembre de 2005 y el 28 de febrero de 2007, ETAPA EP llevó adelante el estudio para la “SELECCIÓN DEL SITIO PARA EL RELLENO SANITARIO DE LODOS DE LAS PLANTAS POTABILIZADORAS Y DEPURADORA DE ETAPA”, en el mismo que se concluyó que el relleno sanitario de EMAC, era la mejor alternativa para disposición final de los lodos, conclusión que se sustentó en la evaluación y análisis de aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales; el estudio fue efectuado mediante convenio entre EMAC y ETAPA.

El 14 de diciembre del 2012, ETAPA inauguró el Proyecto del Mejoramiento Integral del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, siendo uno de sus dos componentes principales la extracción y deshidratación de lodos acumulados en el complejo de Lagunas de Estabilización; en la actualidad el sistema se encuentra en operación, motivo por el cual es necesario efectuar la disposición final de los lodos deshidratados de una forma ambientalmente segura, y en cumplimiento del exhaustivo análisis efectuado años atrás.

En el Art. 4.12.12 del “LIBRO VI, ANEXO 6 NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA EL MANEJO Y DISPOSICIÓN FINAL DE DESECHOS SÓLIDOS NO PELIGROSOS” del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria – TULAS -, se establece que “En el relleno sanitario mecanizado se podrá disponer, además de desechos sólidos no peligrosos, también desechos semi-sólidos no peligrosos”.

1.03.- Los servicios públicos prestados por las dos Empresas comparecientes son mutuamente requeridos de manera diaria para el cumplimiento de los objetivos empresariales de cada una de ellas.



CLAUSULA SEGUNDA: OBJETO

Con los antecedentes expuestos, las partes, con apego a lo dispuesto en el Art. 226 de la Constitución de la República que dispone como deber de todas las instituciones del Estado, coordinar acciones para el cumplimiento de sus fines y hacer efectivo el goce y ejercicio de los derechos reconocidos en la Constitución, acuerdan suscribir el presente convenio con la finalidad de garantizar una adecuada disposición final tanto de los lodos deshidratados generados por las operaciones de ETAPA EP así como de los lixiviados generados como consecuencia de la operación del Relleno Sanitario por parte de EMAC EP.

CLAUSULA TERCERA: COMPROMISO DE LAS PARTES

Para el cabal cumplimiento de los objetivos antes detallados, las Instituciones comparecientes adquieren los siguientes compromisos y obligaciones:

COMPROMISOS DE ETAPA EP

- a) Entregar en el Relleno Sanitario de Pichacay los volúmenes de lodos deshidratados en las cantidades aproximadas que se encuentran establecidos en el estudio efectuado en el 2007 y, respetando la relación lodo-desechos sólidos contemplada en la bibliografía especializada, y establecida para la práctica de la co-disposición;
- b) Dar estricto cumplimiento a lo establecido en el TULAS respecto del contenido de sólidos en el lodo deshidratado a ser dispuesto en el Relleno Sanitario de Pichacay. En cada uno de los viajes se verificará el contenido de sólidos y se llevará un registro, el mismo que se remitirá mensualmente a EMAC EP, o cuando así sea requerido;
- c) Efectuar el transporte de lodos deshidratados respetando las normas de tránsito y en vehículos con las debidas seguridades, de tal forma de evitar derrames y rehidratación en su traslado. Cualquier inconveniente que se presente por esta causa, será ETAPA EP quien ejecute las actividades y soluciones que se requieran;
- d) Efectuar la descarga de lodos en el relleno sanitario, en el sitio y en los horarios establecidos por EMAC EP;
- e) Reportar a EMAC EP los resultados de la calidad físico-químico y biológica del lodo deshidratado;
- f) Efectuar análisis en las dos muestras de lixiviados que EMAC EP entregue quincenalmente, y en 14 muestras que entregue trimestralmente; los parámetros de análisis serán los que han sido determinados hasta el presente en los Laboratorios de Saneamiento de ETAPA EP;
- g) Receptar en el sistema público de alcantarillado los lixiviados generados en el Relleno Sanitario, y tratarlos en las estaciones depuradoras de Ucubamba y/o Guangarcucho; el sitio para la descarga será en la Planta de



EMAC
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE ASEO



Operaciones de EMAC EP y en el área previamente acondicionada por EMAC EP en el sector de Hormíazuay, o en otro sitio que podría ser determinado de mutuo acuerdo entre las partes y que se encuentre en el área de influencia del sistema de interceptores;

- h) Reportar a EMAC EP de forma oportuna cualquier variación significativa en las labores de desalojo de lodo deshidratado, ya sea en cantidad cuanto en su composición.

COMPROMISOS DE EMAC EP

- a) Recibir y efectuar la disposición final de los lodos deshidratados provenientes de las plantas potabilizadoras y depuradoras de ETAPA EP;
- b) Reportar a ETAPA EP el peso de lodos dispuestos en el relleno sanitario;
- c) Efectuar la descarga de lixiviados al sistema público de alcantarillado de acuerdo al procedimiento que se establezca para el efecto;
- d) Descargar los lixiviados con ausencia de sólidos flotantes;
- e) Reportar los resultados de la calidad físico-químico y biológica del lixiviado;
- f) Reportar a ETAPA EP de forma oportuna cualquier variación significativa en la calidad y cantidad de lixiviados para su tratamiento.

CLAUSULA CUARTA: VIGENCIA Y PLAZO

El presente convenio entrará en vigencia a partir de su suscripción, y tendrá el carácter de indefinido.

CLAUSULA QUINTA: CONTROVERSIAS.-

Basándose en la buena voluntad como base fundamental para la ejecución de este Convenio Marco de Cooperación, para el caso de controversias derivadas de su ejecución, las partes aceptan solucionarlas de manera directa a través de las máximas autoridades de las instituciones comparecientes. Caso contrario, de persistir las diferencias, estas se someterán a mediación siendo competente para conocer el caso el Centro de Mediación de la Procuraduría General del Estado, con sede en la ciudad de Cuenca.

CLAUSULA SEXTA: CAUSAS DE TERMINACIÓN.-

El presente Convenio terminará por las siguientes causas:

- Incumplimiento de las obligaciones establecidas en el presente Convenio;
- Por acuerdo mutuo de las partes; y,
- Por causas de fuerza mayor o caso fortuito de conformidad con la Ley, que hicieran imposible continuar con la ejecución del presente Convenio.



CLAUSULA SÉPTIMA: SUPERVISIÓN, CONTROL, COORDINACIÓN Y SEGUIMIENTO.-

Las partes a través de sus delegados designados, realizarán la supervisión, control, coordinación y seguimiento de las actividades determinadas para efectos del presente convenio y que regirán los compromisos adquiridos, para lo cual en un plazo no mayor de 5 días de suscrito el presente instrumento, se designará el delegado respectivo por cada institución, quienes de manera inmediata mantendrán la primera reunión con la finalidad de establecer la coordinación y los aspectos de avance para el cumplimiento de este convenio.

Los delegados obligatoriamente coordinarán conferencias telefónicas o electrónicas en forma semanal, sin perjuicio de reunirse personalmente en cualquier momento, para verificar el cumplimiento y avance del convenio e informarán sobre los particulares que se susciten a las autoridades suscriptoras del mismo.

CLAUSULA OCTAVA: ACEPTACIÓN.-

Las partes declaran estar de acuerdo con todas y cada una de las cláusulas que anteceden. Para constancia de lo expresado suscriben en cuatro ejemplares de igual tenor y valor.



Dr. Oswaldo Tamariz Valdivieso
GERENTE GENERAL ETAPA EP



Ing. Valeria Villavicencio Vega
GERENTE GENERAL EMAC EP