

TRATAMIENTO ANAEROBIO DE RESIDUOS SÓLIDOS DOSA – 2022 (2a parte)

Docente: Dr. Ing. Mauricio Passeggi
Departamento de Ingeniería de Reactores
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República



**BIOTECNOLOGÍA
DE PROCESOS
PARA EL AMBIENTE**

DISEÑO y OPERACIÓN DE DIGESTORES

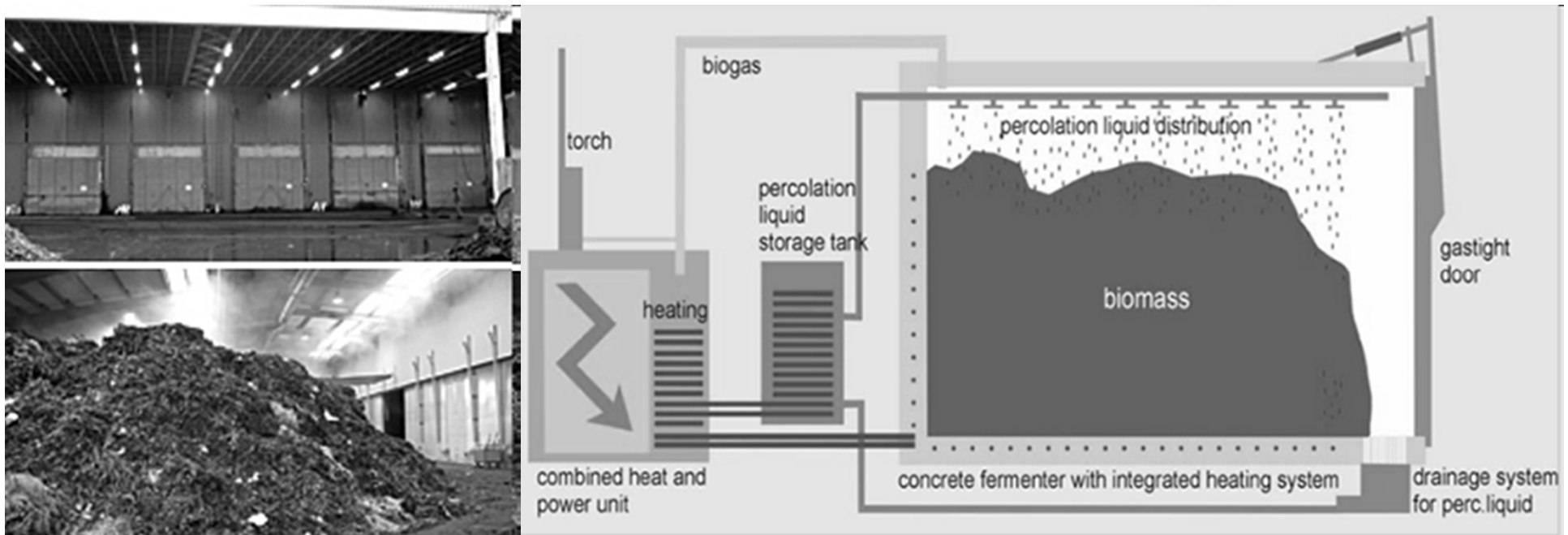
1. Clasificación de Digestores Anaerobios
2. Pretratamientos
3. Concentración de Sólidos
4. Tiempo de Residencia
5. Mezcla y agitación
6. Calefacción
7. Parámetros de seguimiento
8. Tratamientos y usos del biogás
9. Tratamientos y usos del digestado
10. Balance Energético

1.- CLASIFICACIÓN DE DIGESTORES ANAEROBIOS

5 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN BINARIOS, $2^5 = 32$ CASOS

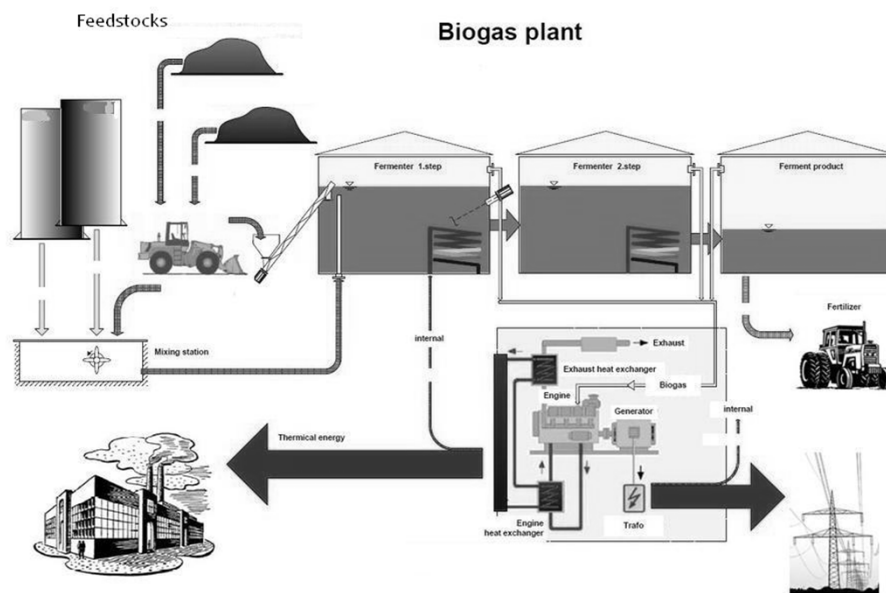
ALIMENTACIÓN	DISCONTINUO	(Semi)CONTINUO
TEMPERATURA	MESOFÍLICO	TERMOFÍLICO
CONTENIDO DE HUMEDAD	DIGESTIÓN SECA	DIGESTIÓN HÚMEDA
DIVERSIDAD DE RESIDUOS	SUSTRATO ÚNICO	CODIGESTIÓN
FASES	UNA FASE	DOS FASES

1.1.- Discontinuo vs. (Semi)Continuo



Discontinuo
Ej. SEBAC

1.1.- Discontinuo vs. (Semi)Continuo



(Semi)Continuo

1.1.-Discontinuo vs. (Semi)Continuo

Aspecto	Discontinuo	(Semi)Continuo
Inóculo	En cada lote o con lixiviado de un módulo maduro	Solo al inicio en RCA y con recirculación en PTFP
Alimentación y descarga	Al inicio y al final	Al menos varias veces x semana
Operación y control	Simple	Más compleja
Mano de obra	Concentrada al inicio y al final	Con la frecuencia de la alimentación
Producción de gas	Variable	más estable
Tiempo de residencia	mayor	menor
Generación de residuo	Mejor para generación estacional	Mejor para generación continua

1.2.- Mesofílico vs. Termofílico

El digestor se debe mantener dentro de uno de los rangos óptimos (temofílico o mesofílico) para procesar altas cargas en forma estable.

Digestión	Mesofílica	Termofílica
Temperatura	30-40°C	50-60°C
Velocidad degradación	Menor	Mayor
Rendimiento Celular (Y)	Mayor	Menor
Remoción de patógenos	Menor	Mayor
Sensibilidad a variaciones de T	Menor	Mayor.
Sensibilidad a inhibidores	Menor	Mayor
Energía de calefacción	Menor	Mayor

1.2.- Mesofílico vs. Termofílico

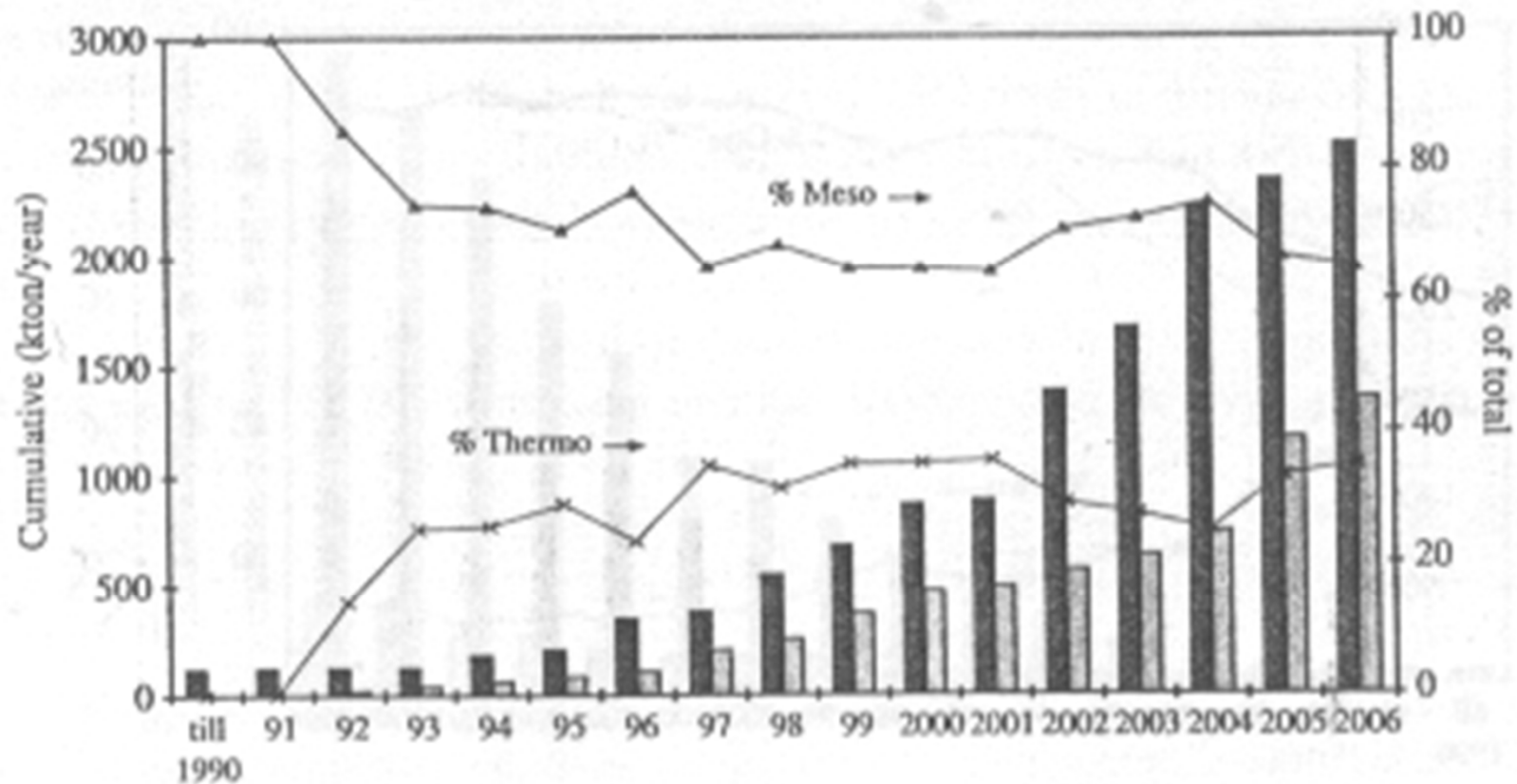


Figure 3 Mesophilic ■ (and %mesophilic) versus thermophilic operation ▨ (and %thermophilic)

Digestores instalados para RSU

1.3.- Digestión Húmeda vs Seca

Digestión	Húmeda	Seca
ST	<15%	>20%
Resistencia a la Transferencia de masa	baja	alta
Residuo	Fluido	Sólido
Modelo de Flujo	Generalmente RCA	Pistón c/dispersción y recirculación o batch
Agitación	Mecánica o recirculación del contenido o de gas	Recirculación del lodos.(ej.Dranco) Reciclo de biogas (ej.Valorga) Mecánica radial (ej.Kompogas)
Volumen a gestionar (consumo de agua)	Mayor	Menor
Energía de calefacción	Mayor	Menor
Sedimentos y flotantes	Posible problema	No
Residuo al que se adapta mejor	Residuos con alto contenido de agua	FORSU y residuos animales (si se hace limpieza en seco)

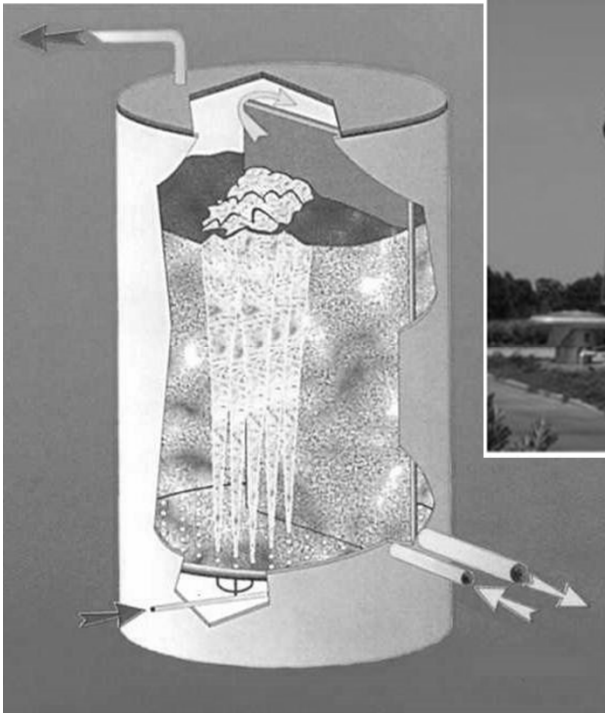
1.3.- Digestión Húmeda vs Seca

Ejemplos de Digestión Seca:

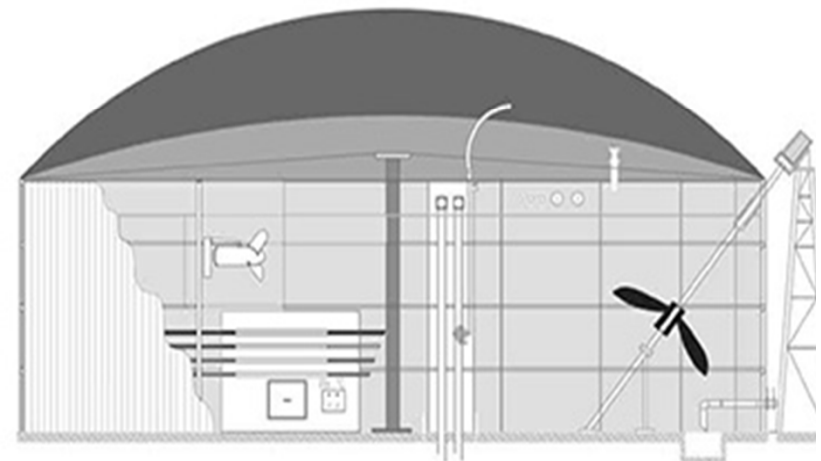
Dranco :



Valorga:

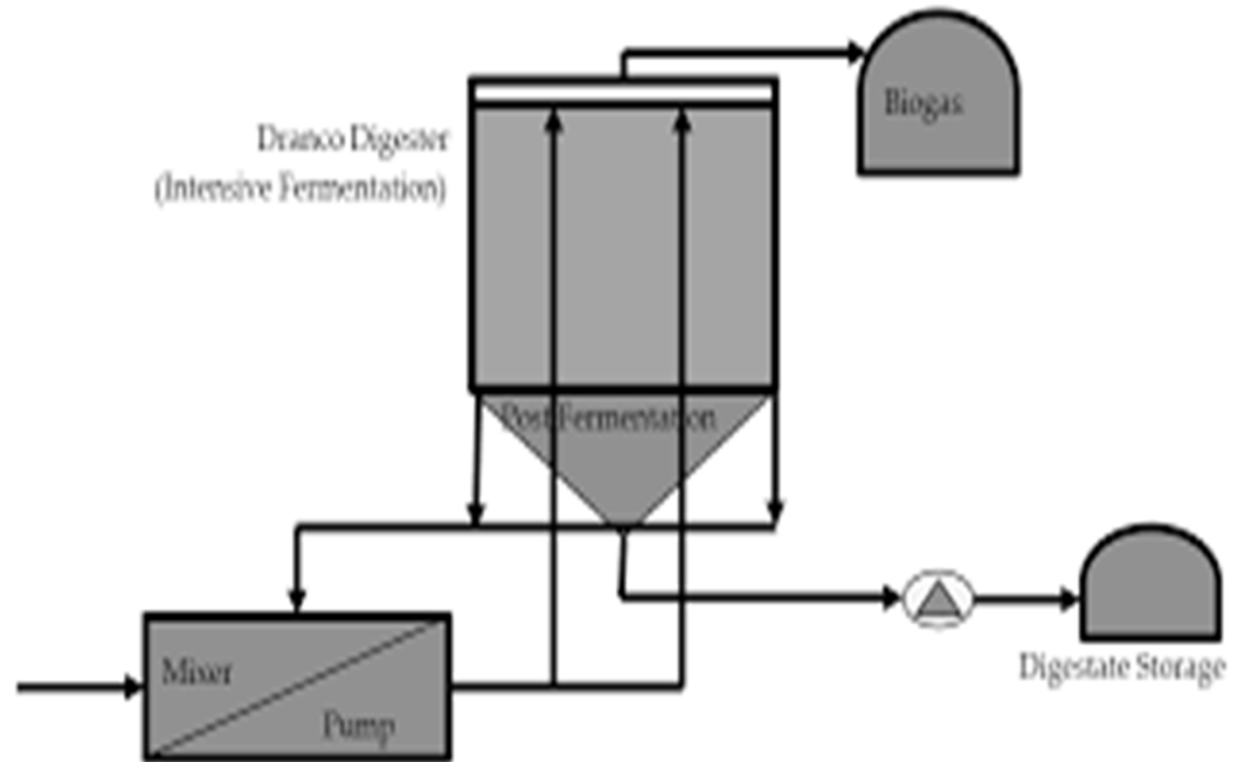


Ejemplo de Digestión Húmeda:



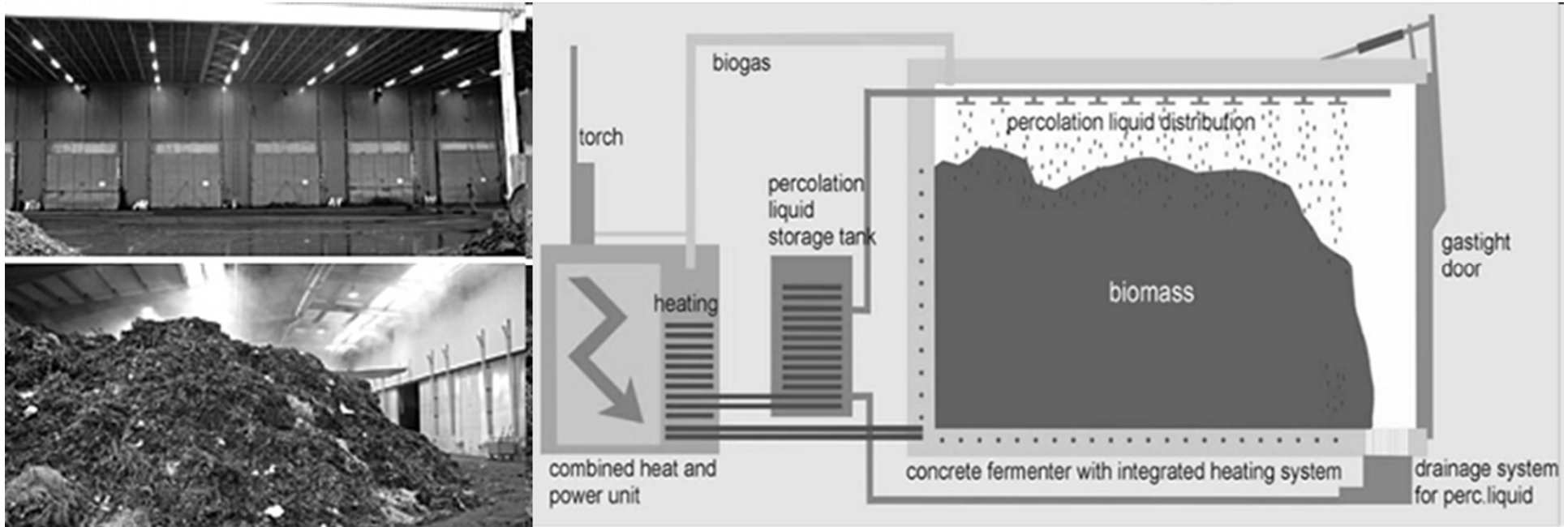
1.3.- Digestión Húmeda vs Seca

Ejemplos de Digestión Seca Semicontinua: Dranco



1.3.- Digestión Húmeda vs Seca

Ejemplos de Digestión Seca en Batch : SEBAC (Secuencial Batch Composting):



1.3.- Digestión Húmeda vs Seca

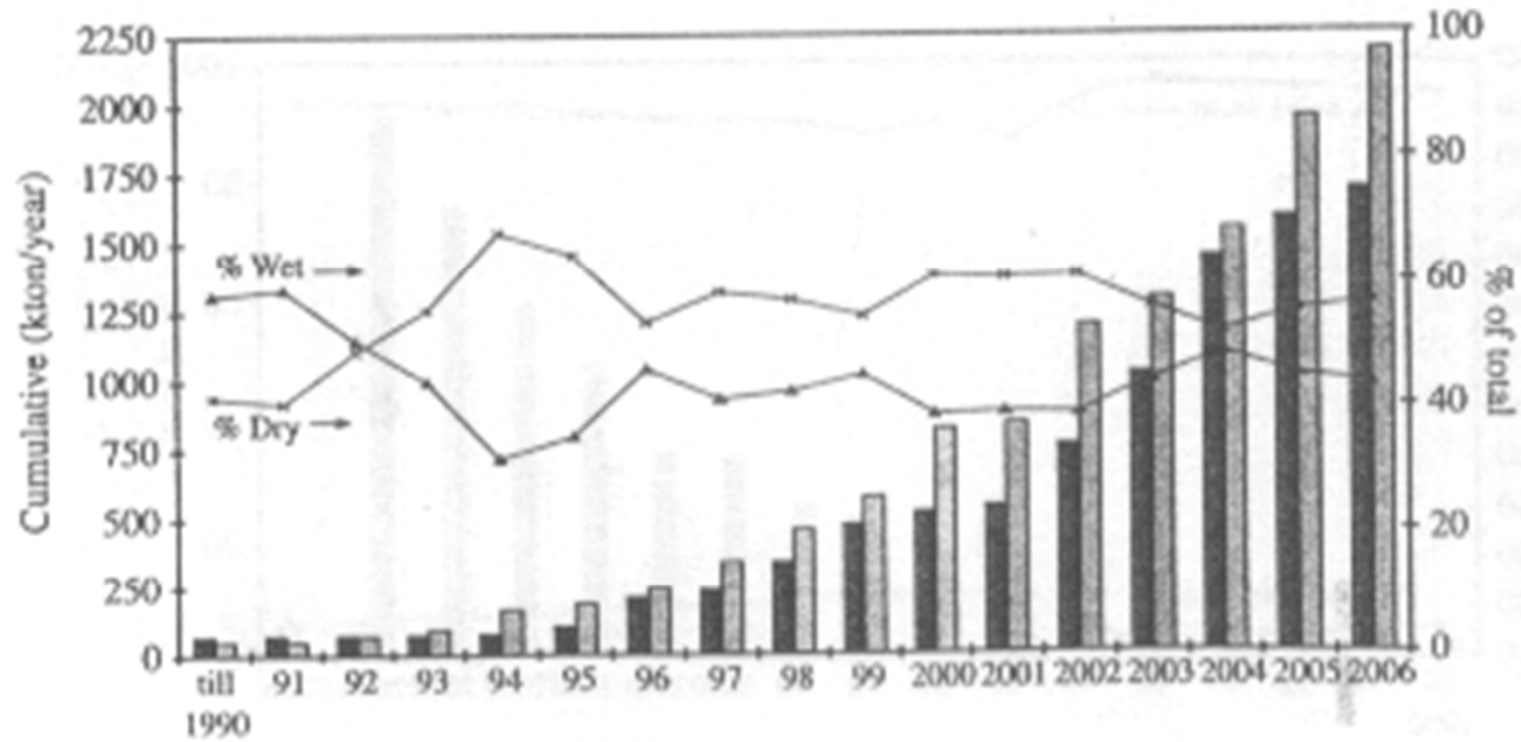


Figure 4 Wet (and % wet) versus dry operation (and % dry)

Digestores instalados para RSU

1.4.- Sustrato único vs. Codigestión

	Sustrato único	Codigestión
Micronutrientes	Posible problema	Posible complementación
Inhibición	Posible problema	Posible dilución
Escala	Menor	Mayor
Logística	Sencilla	Compleja
Característica del Biosólido	Calidad relativamente constante	Variabilidad asociada a composición de la alimentación

1.4.- Sustrato único vs. Codigestión

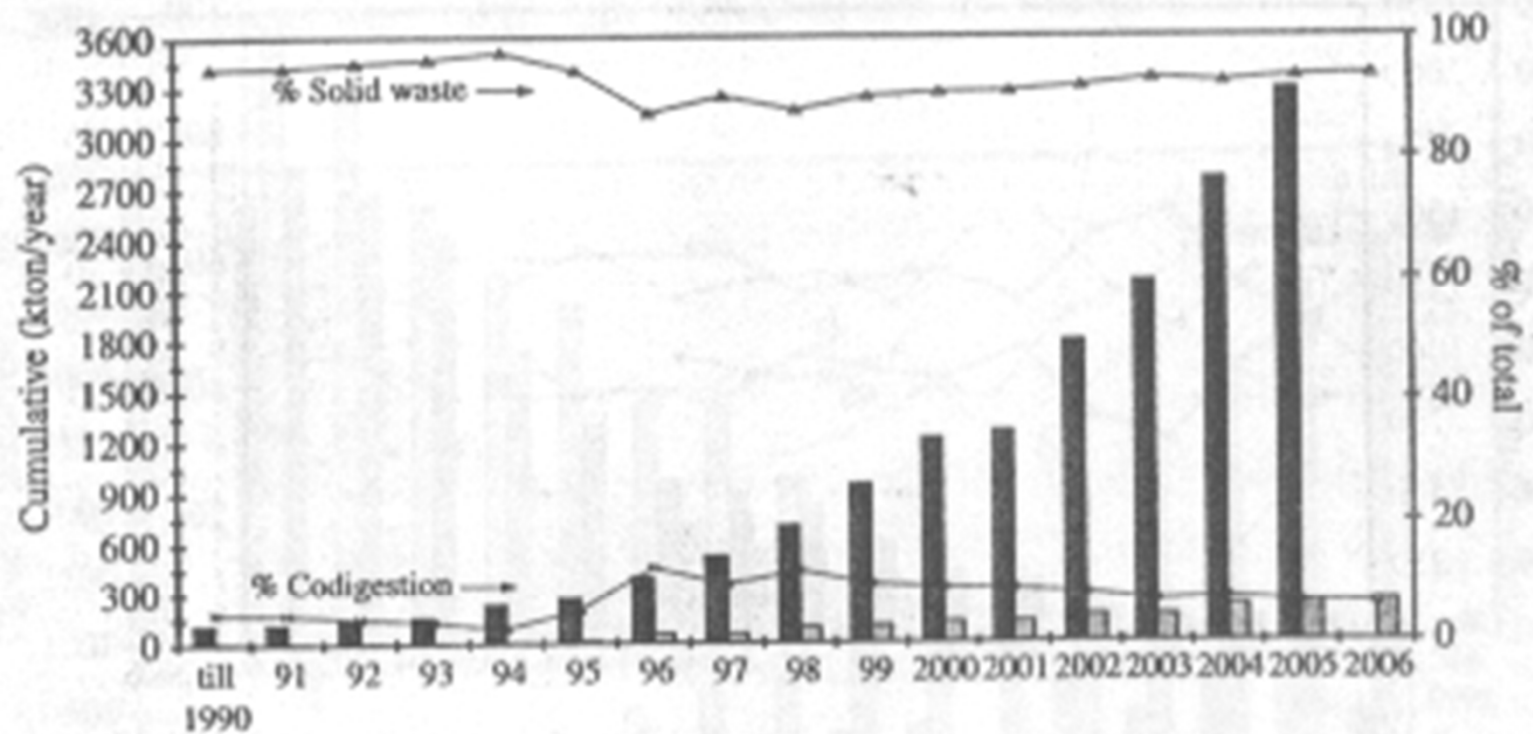


Figure 6 Single feedstock ■ (and % single) versus codigestion □ (and % codigestion)

Digestores instalados para RSU

1.5.- Separación de fases

Objetivo:

Evitar el riesgo de inhibición de la fase metanogénica mediante la separación de la misma a un segundo reactor.

Implementación:

Extracción de sobrenadante del reactor hidrolítico y pasaje por un reactor metanogénico para líquidos con posible recirculación.

Ventajas:

Evita la sobrecarga de las metanogénicas cuando los residuos son fácilmente hidrolizables, ya que el reactor hidrolítico amortigua y en el reactor de líquidos se desacoplan el τ de microorganismos y residuo.

Dificultades:

Separación de líquido y sólidos puede ser muy costosa.

Es necesario operar y controlar dos unidades de tratamiento.

Si no se recircula el líquido hay mayor costo de calefacción.

1.5.- Separación de fases

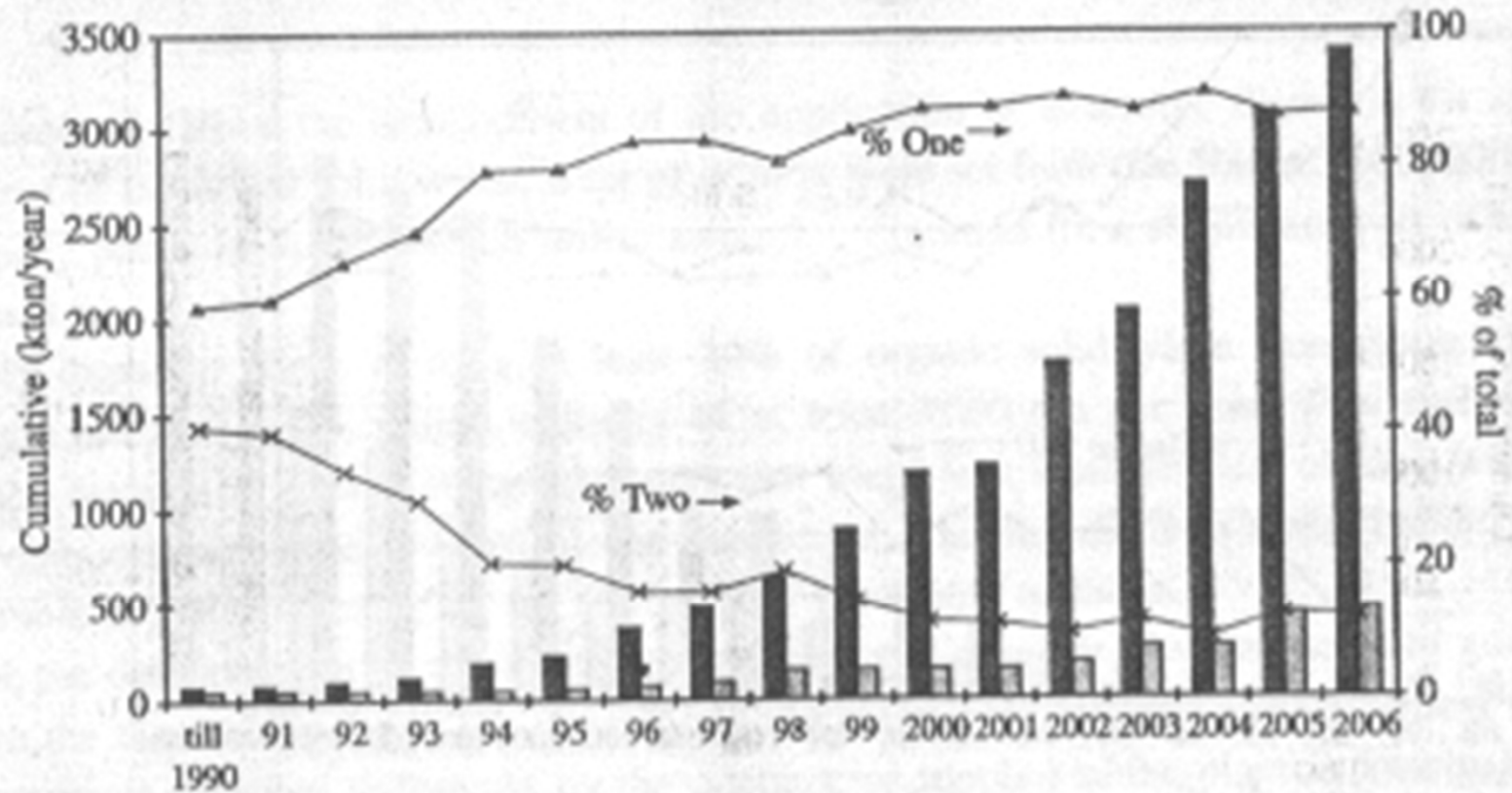


Figure 5 One-phase (and % 1-phase) versus two-phase process (and % 2-phase)

Digestores instalados para RSU

2.- Pretratamientos

Objetivo:

Aumentar la biodisponibilidad de los sustratos y la velocidad de hidrólisis, mediante el incremento de la superficie disponible para la acción enzimática.

Aplicable especialmente a:

- Materiales voluminosos, para reducir el tamaño y favorecer la colonización microbiana.
- Materiales lignocelulósicos, para alterar la estructura y de ese modo facilitar la hidrólisis de la celulosa.
- Lodos de purga de PTE aerobias, para lisar la pared celular de modo de liberar su contenido y así facilitar la hidrólisis.

2.1- Pretratamientos Físicos

Los que no implican el agregado de químicos ni de microorganismos.

➤ Mecánicos: Cortado, Trituración y Extrusión.

El costo energético aumenta sensiblemente con la reducción de tamaño, pero el beneficio es cada vez menor.

Vulnerables al ingreso de contaminantes metálicos y pétreos.

➤ Térmicos: Explosión de vapor e Hidrólisis térmica con agua caliente

Es crítica la gestión de la energía térmica.

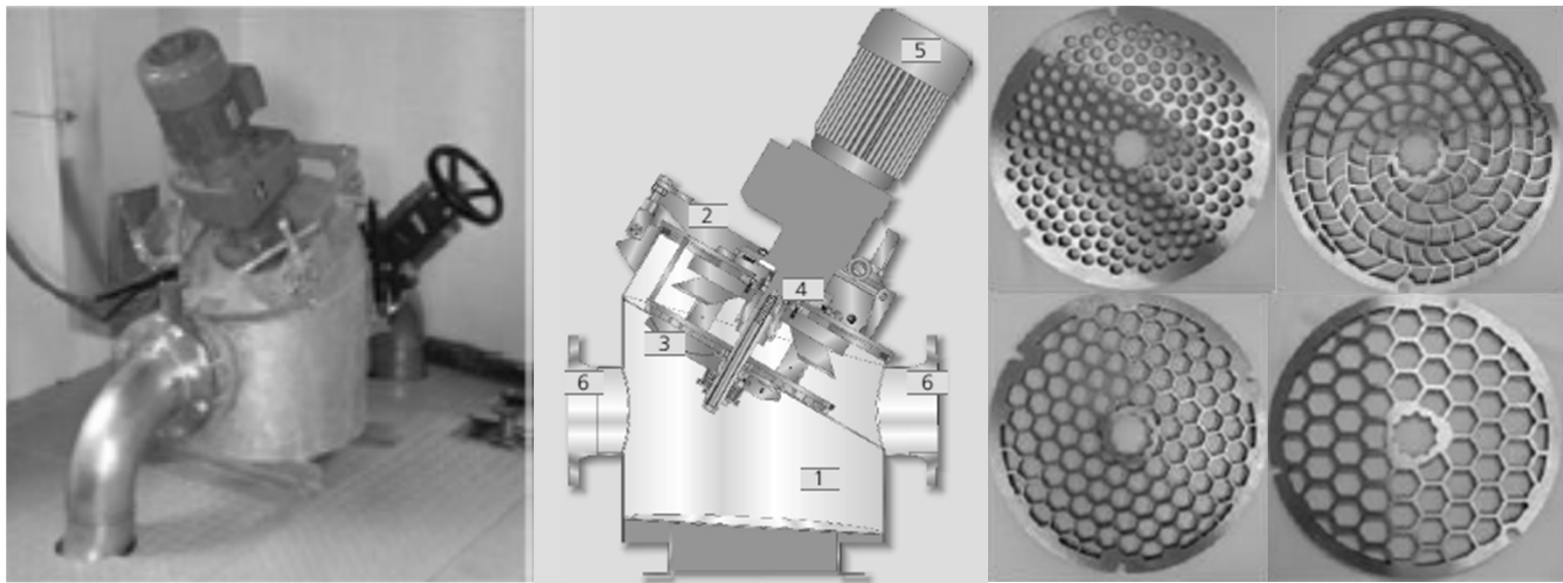
Puede generar inhibidores producto de la ruptura de la lignina y posterior formación de nuevos compuestos fenólicos

➤ Por Irradiación: Microondas y Ultrasonido

Tecnologías inmaduras con problemas de escalado.

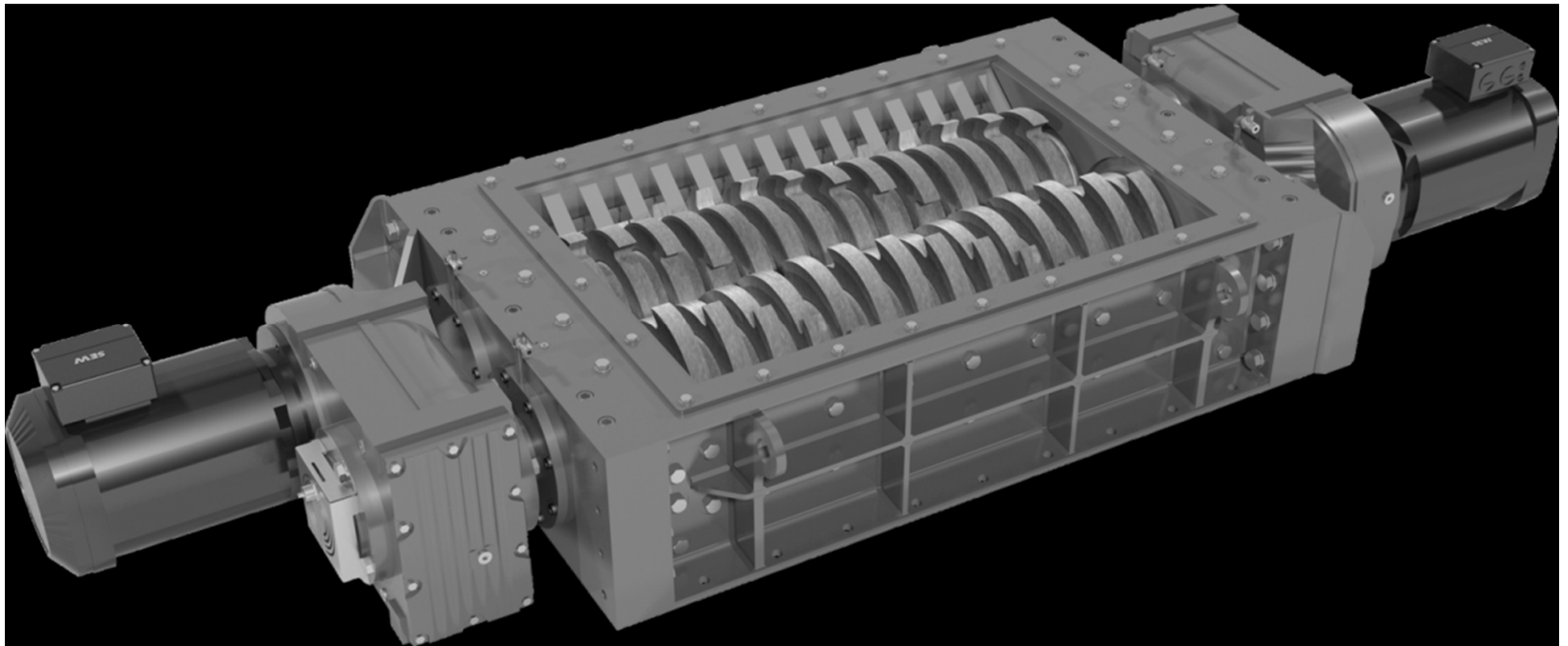
2.1- Pretratamientos Físicos

Cortadora en línea para sólidos en suspensión



2.1- Pretratamientos Físicos

Trituradora de dos ejes aplicable a residuos sólidos



2.1- Pretratamientos Físicos

Steam explosion



Planta piloto de la Universidad de Valladolid:
8bar y 170°C por 90min: Digestión de lodo secundario produce 60% más metano

2.2- Pretratamientos Químicos

➤ Pretratamiento alcalino:

Mediante soluciones de NaOH, KOH, CaOH, CaO o NH₃

Alto costo de reactivos.

Efectivo en materiales con alta concentración de lignina

➤ Pretratamiento ácido:

Mediante ácidos minerales u orgánicos: H₂SO₄, HNO₃, HCl, HAc.

En lignocelulósicos actúa fundamentalmente sobre la hemicelulosa.

Ácidos diluidos en caliente o diluidos en frío.

Necesidad de neutralización antes de la DA

Problemas de corrosión y alto costo

➤ Pretratamiento con líquidos iónicos.

Proceso comercial Lyocell empleado en la producción de fibras de celulosa.

Permite la solubilización de la celulosa que luego precipita en estructuras amorfas y porosas de mayor biodegradabilidad.

El más utilizado es el NMMO, que se recicla casi en más de un 99% y no tiene efecto tóxico.

2.3- Pretratamientos Biológicos

➤ Pretratamiento con hongos:

Permite degradar la lignina y la hemicelulosa, con mínimo consumo de celulosa.
Demanda altos tiempos de estadía (varias semanas).

➤ Pretratamiento con consorcios microbianos:

Atacan hemicelulosa y celulosa.

Adelantan la etapa de hidrólisis y acidificación.

Requieren tiempo de residencia de varios días.

Normalmente el reactor es colonizado por otros organismos más competitivos

➤ Pretratamiento con preparados enzimáticos:

Se utilizan celulasas y hemicelulasas.

Es necesario agregar continuamente las enzimas porque se degradan.

2.- Pretratamientos

Evaluar:

- Impacto en la cinética y en el BMP

- Generación neta de energía

- Costo de inversión y operación

- Posible generación de inhibidores.

- Riesgo de acidificación al acelerar la hidrólisis.

El efecto de cada pretratamiento depende de las características propias de cada residuos, por lo que las condiciones deben ajustarse y evaluarse caso a caso.

(Los resultados reportados en la bibliografía tienen una gran dispersión)

3.- Concentración de sólidos

Esta condicionado por el contenido de agua del material a digerir

Determina:

- el tipo de reactor a emplear
- el sistema de alimentación y descarga
- el equipamiento para la mezcla

Incide

- en la cinética del proceso
- en el tiempo de residencia
- en el volumen del reactor
- en el balance de energía

4.- Tiempo de residencia

Varía normalmente entre 15 y 60 días

Depende de la velocidad de degradación y del grado de estabilización requerido

Bajos TR.

Mayor producción de biogás por m^3 de reactor pero baja estabilización

Puede limitar la metanogénesis.

Posible combinación con compostaje.

Alto TR.

Menor producción de biogás por m^3 de reactor pero mayor estabilización y mayor producción de biogás por kg de residuo.

(cultivos para energía)

5.- Mezcla y agitación

Objetivos de la mezcla y la agitación:

Eliminar volumen muerto (costras y sedimentos).

Homogenizar temperatura y concentraciones.

Reducir resistencia a la transferencia de masa.

Sistemas:

Mecánico (alta y baja velocidad)

Recirculación de lodo

Recirculación de gas.

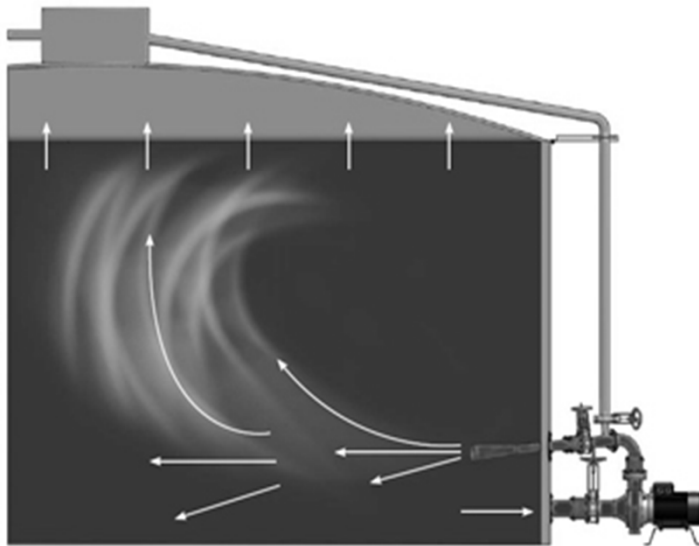
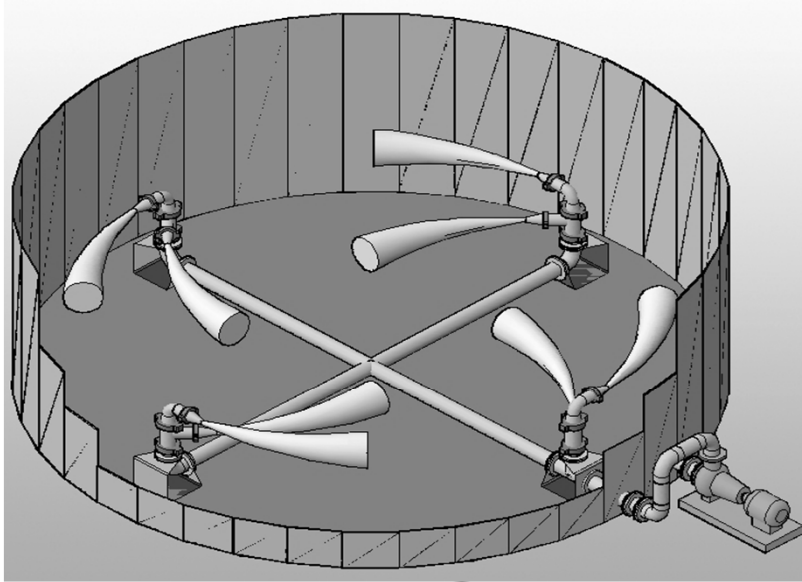
Recirculación de lixiviado.

Inyección de vapor.

Mezcla en el exterior entre inóculo y sustrato

La mezcla determina el modelo de flujo

Sistemas de Mezcla y Agitación



Mezcla con lodos de descarga

Permite una rápida colonización del residuo mediante una mezcla intensa en un volumen pequeño



Es una etapa muy importante cuando la mezcla dentro del reactor es escasa

5.- Mezcla: Determina el modelo de flujo

Aspecto	Reactor de mezcla completa	Pistón con dispersión (y reactor discontinuo)
Inóculo	Solo en el arranque	Al arranque y con recirculación (puede ser solo en el arranque)
pH	Uniforme en todo el reactor	Perfil de pH a lo largo del reactor (a lo largo del tiempo)
Inhibición por sustratos e intermediarios	Menos probable	Más probable
Inhibición por productos	Más probable	Probable cerca de la salida (al final del batch)
Remoción de patógenos	Menos eficiente	Más eficiente
Disponibilidad de Nutrientes	Alta e igual en todo el reactor	Variable a lo largo del reactor (a lo largo del tiempo)
Homogeneidad del digestado	Pobre por distribución de tiempos de estadía, pero constante en el tiempo	Alta si no hay perturbaciones en el proceso o variaciones en la alimentación

6.- Calefacción

Objetivos:

Mantener la temperatura del reactor en un valor estable y próximo al óptimo mesofílico o termofílico

Sistemas:

Calefacción de la alimentación

Calefacción de la recirculación

Calefacción con serpentín o chaqueta

Calefacción con inyección de vapor



6.- Calefacción

Aspectos relevantes de la calefacción:

- Rango de operación (mesofílico o termofílico)
- Equipo de transferencia de calor (externo, interno o previo).
- Pérdidas al ambiente (S/V del digestor, aislamiento)
- Gradientes de temperatura y agitación.
- Efecto de la concentración en el balance térmico
- Eficiencia de aprovechamiento del biogás

7.- Parámetros de seguimiento

Durante la operación deben controlarse los siguientes parámetros:

1. Producción de metano en relación al BMP o remoción de SV en relación a la Biodegradabilidad.
2. pH, AGV y Alcalinidad.
3. Temperatura.
4. Eficacia del mezclado

8.- Tratamientos y usos del biogás

Uso térmico:

- No requiere mayor tratamiento (a lo sumo remoción de H₂S).
- PCI: 8530 kcal/m³CH₄ a PTN (0°C, 1 atm)

Generación eléctrica o cogeneración

- Motogeneradores:

En general requiere remover:

Humedad: por condensación.

H₂S: por tratamiento biológico o químico.

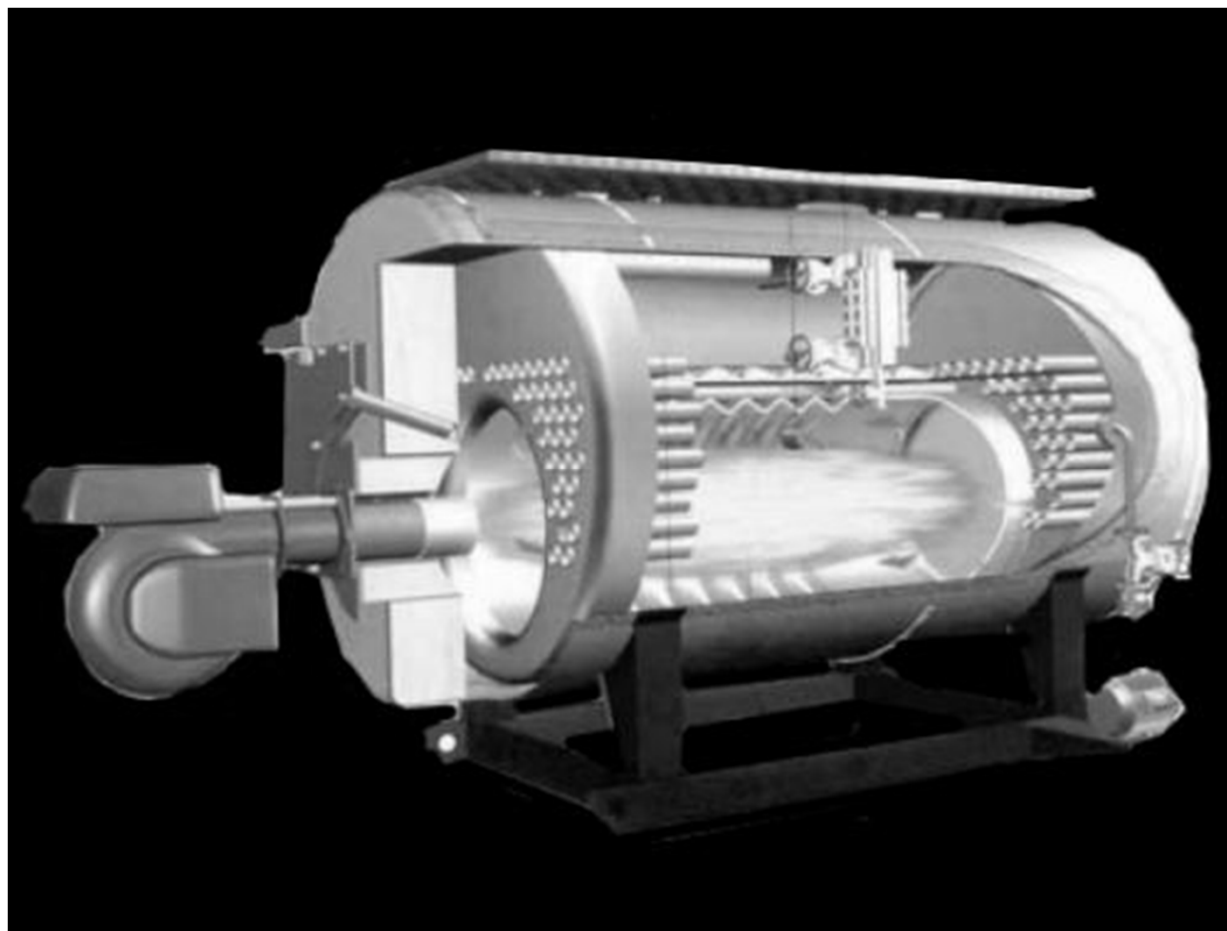
- Turbinas:

Toleran altas concentraciones de H₂S

Muy poco mantenimiento (un solo elemento móvil)

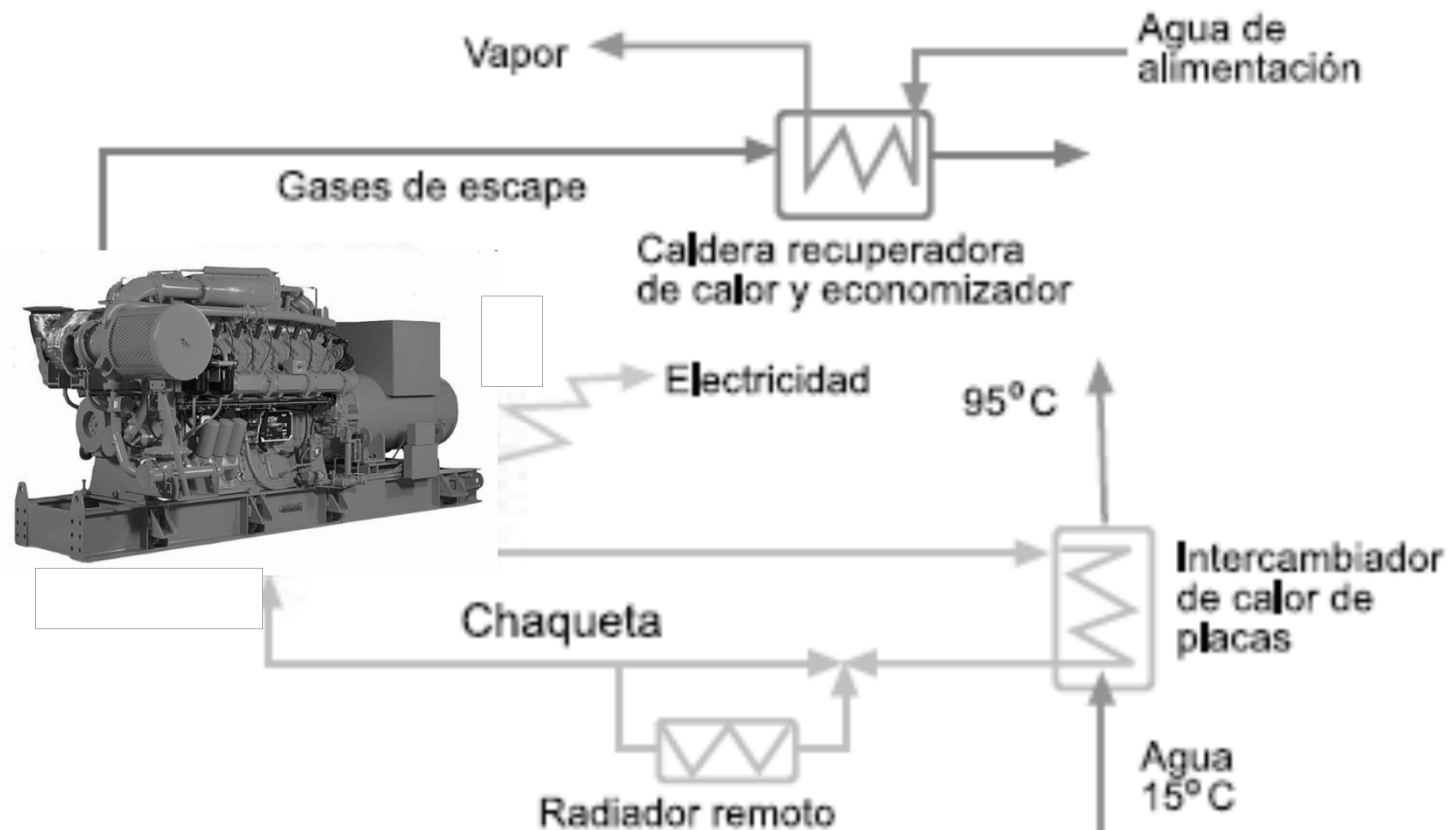
Son más caras.

Caldereta alimentada a biogás



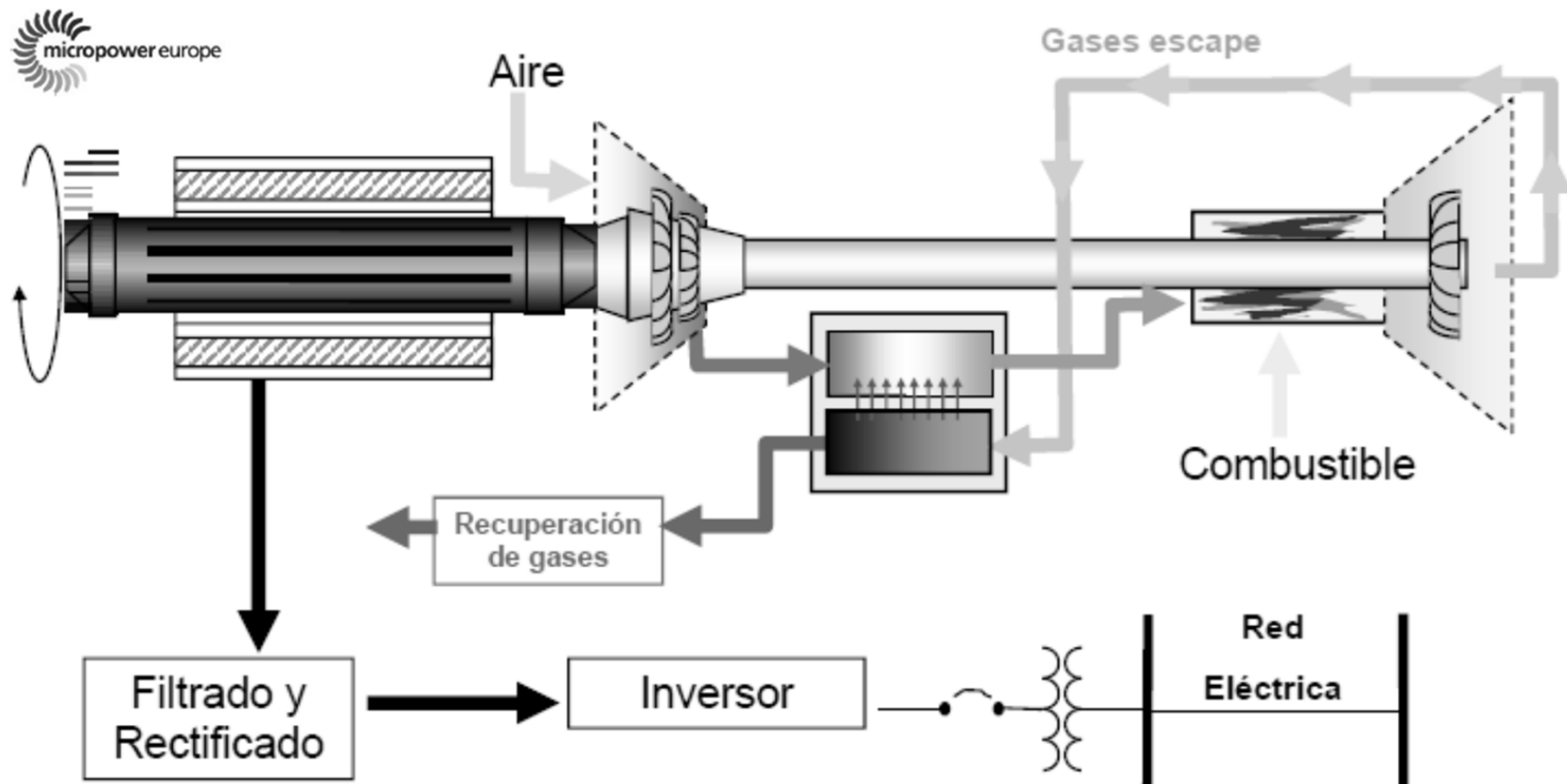
Eficiencia térmica del 70% al 90%

Cogeneración mediante motogenerador



Eficiencias aproximadas:
Térmica 50% Eléctrica: 35%

Cogeneración mediante turbina a biogás



Eficiencias aproximadas:
Térmica 50% Eléctrica: 30%

Microgeneración

Oportunidad para amortizar inversiones mediante el intercambio de energía eléctrica con UTE

■ Decreto de Microgeneración (Nº174/2010)

Autoriza a clientes conectados en baja tensión (230-400V) a generar con una potencia máxima igual a la potencia contratada, y corriente máxima de 16 A o 25 A según el tipo de conexión, y a intercambiar energía con la red de UTE, cobrando la energía entregada en función de la tarifa contratada.

Habilita a la UTE a firmar contrato con microgeneradores con mayores potencias a las correspondientes a los amperajes indicados.

Microgeneración

Oportunidad para amortizar inversiones mediante el intercambio de energía eléctrica con UTE

■ Resolución MIEM N°42/2017:

La energía entregada a la red de UTE a la largo del año no puede ser mayor a la energía consumida en el mismo período.

■ Resolución de la UTE:

Potencia Autorizada máxima de microgeneración

Para trifásica 230 V	100 kW
Para trifásica 400 V	150 kW

¿Cómo maximizar el retorno de la inversión?

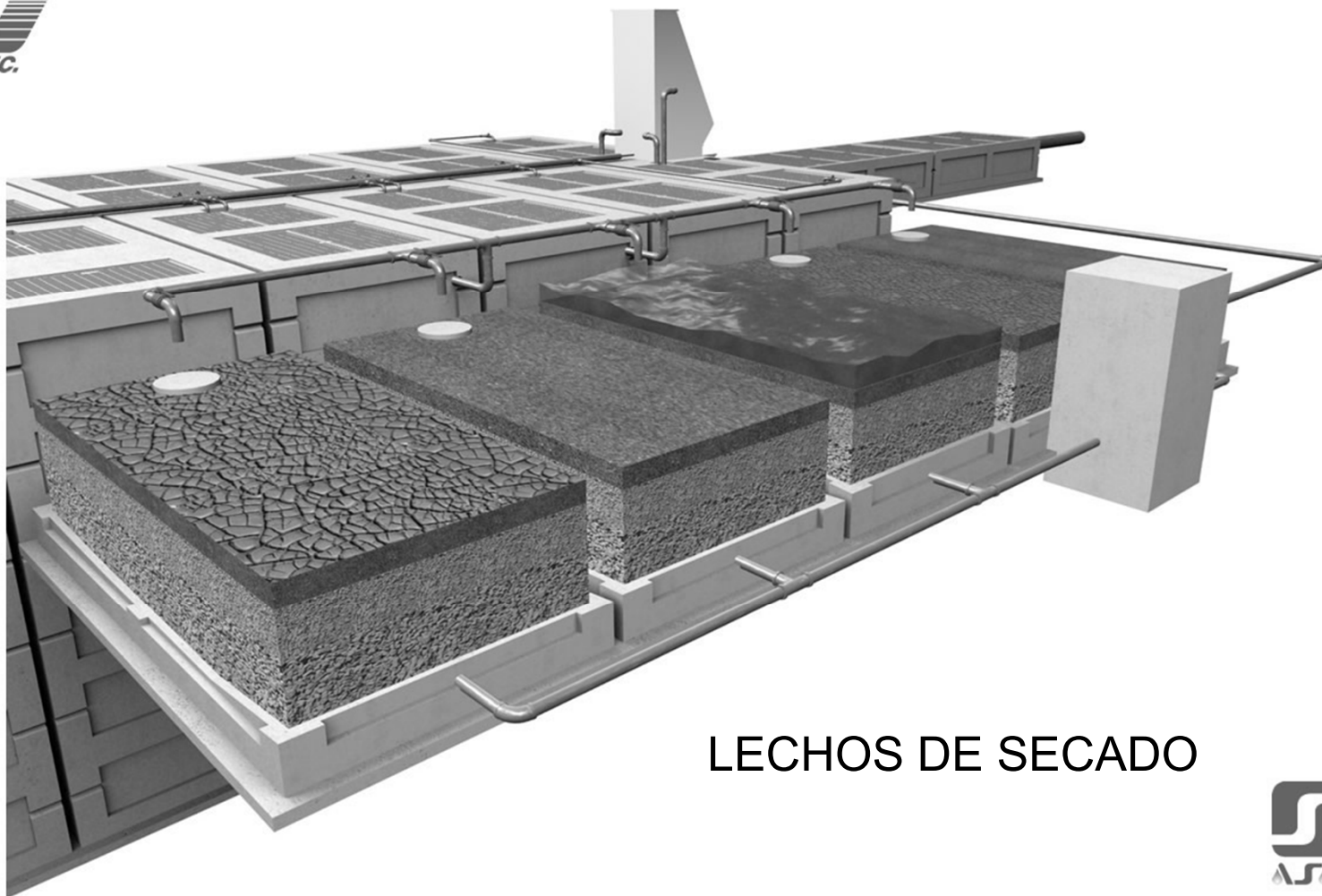
9.- Tratamientos y usos del digestado

El residuo tratado puede tener alto contenido de agua.
Para su transporte y utilización puede convenir separarla

Principales Tecnología disponible:

- Lecho de secado
- Tornillo prensa
- Decanter (separador centrífugo)
- Filtro de bandas

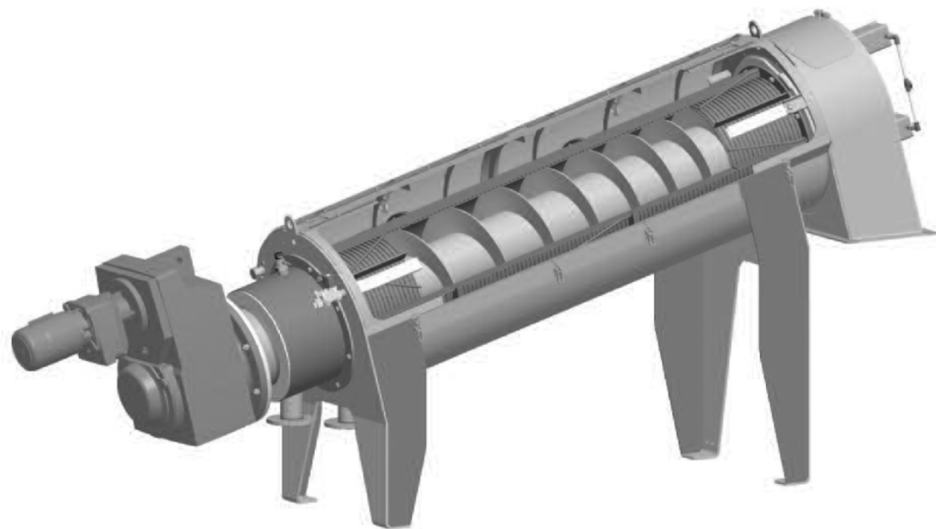
Lecho de secado



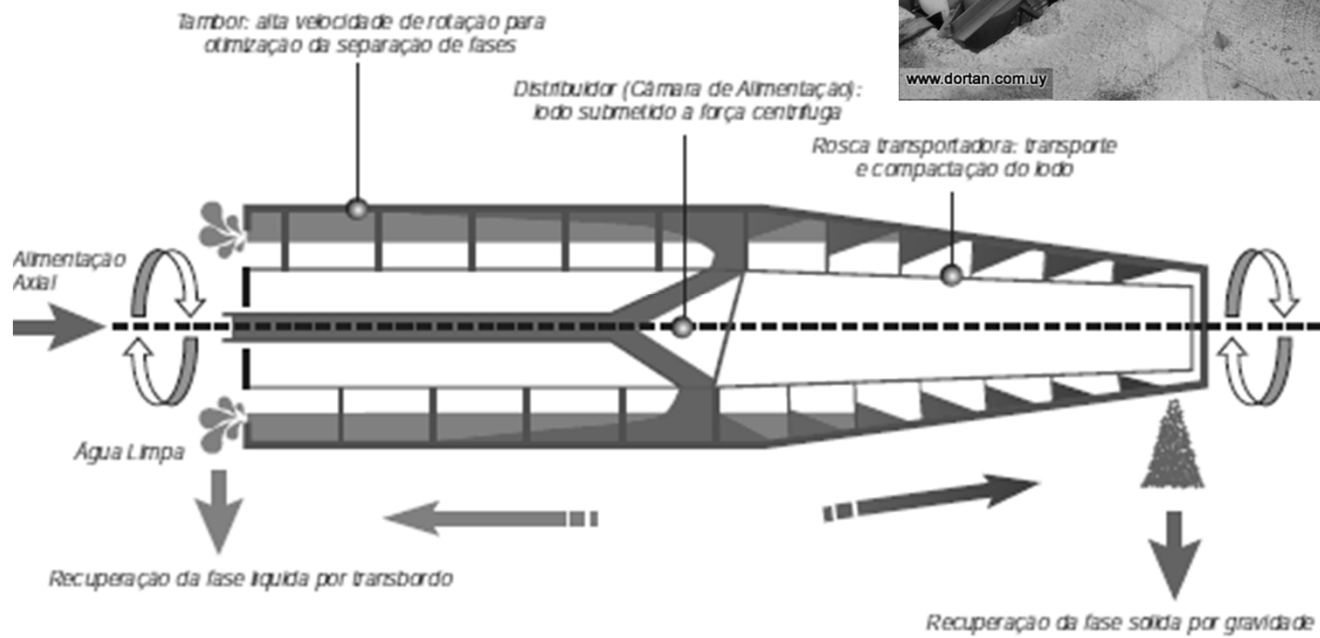
LECHOS DE SECADO



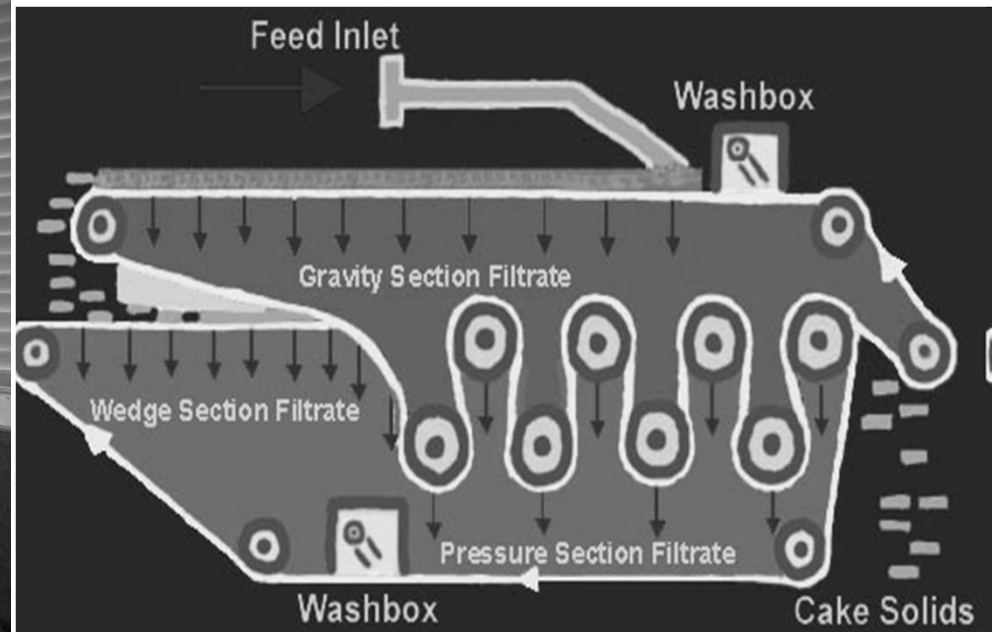
Tornillo prensa



Espesador centrífugo



Filtro de bandas



Aplicación del digestado

Si el digestado tiene buenas propiedades agronómicas, puede aplicarse a cultivos o usarse en la recuperación de suelos degradados.

El sobrenadante tiene normalmente un alto contenido de materia orgánica y nutrientes. Si se separa del sólido, debe gestionarse adecuadamente.

Alternativas:

- Tratamiento para vertido como cualquier efluente.
- Uso en riego, si satisface una demanda.



10.- Balance Energético

La digestión anaerobia permite obtener energía, pero también la consume para:

- mantener la temperatura del digestor
- agitar los residuos
- acondicionarlos antes de alimentarlos
- acondicionar el digestado para su uso

El consumo energético varía según la escala, la tecnología el y tipo de residuo, pero normalmente se encuentra entre el 10% y el 40% de la energía producida.

Problema

- Con el objetivo de estabilizar los lodos de una planta de tratamiento aerobia de efluentes domésticos, se propone el uso de tecnología anaerobia.
- Se producen $20\text{m}^3/\text{d}$ de lodo espesado con 10% de sólidos totales de los cuales el 80% son volátiles.
- Operando el digestor a 35°C con una carga de $2.4\text{kgSV}/(\text{m}^3.\text{d})$ se obtienen $250 \text{ LCH}_4\text{PTN}/\text{kgSV}$ alimentado.
- En las mismas condiciones, pero sometiendo el lodo a un pretratamiento térmico, el rendimiento de metano asciende a $325 \text{ LCH}_4\text{PTN}/\text{kgSV}$ alimentado. Este pretratamiento tiene un consumo de $50\text{kcal}/\text{kg}$ de lodo, y entrega el lodo a 42°C

Datos adicionales:

Consumo específico para agitación: $20\text{W}/\text{m}^3$ para lodo sin pretratamiento y $10\text{W}/\text{m}^3$ para lodo con pretratamiento

Coeficientes de pérdida de calor 0.5, 0.7 y $0.8 \text{ kcal}/(\text{m}^2.\text{°C}.\text{h})$ para fondo, techo y pared, respectivamente (geometría del reactor: cilíndrica con $h/D=1$ y cámara de gas despreciable)

PCI del metano: $8530\text{kcal}/\text{m}^3$ a PTN

Calor específico del lodo: $1000\text{kcal}/(\text{m}^3.\text{°C})$

$T_{\text{ambiente}} = 15^\circ\text{C}$

- 1.- Determine el consumo de energía para agitación en cada alternativa.
- 2.- Determine la demanda de calor de cada alternativa.
- 3.- Asumiendo que el calor se obtiene del biogás con un 70% de eficiencia, y que el biogás remanente se destina a la generación eléctrica, estime la potencia de generación en cada caso si la eficiencia del generador es del 25%.
- 4.- Asumiendo que se emplea cogeneración con 25% de eficiencia eléctrica y 35% de eficiencia térmica, estime la potencia eléctrica neta que se podría entregar a la red de UTE, con y sin pretratamiento.

Preguntas abiertas:

¿Lagunas cubiertas o reactores?

¿Codigestión con cultivos energéticos?

¿En qué condiciones es rentable aplicar DA?

¿Producción de biometanol a partir de biomasa?