



# Interreg

## España - Portugal

### 0029\_SECASOL\_5\_E



UNIÃO EUROPEIA  
UNIÓN EUROPEA

Fondo Europeo de Desarrollo Regional  
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

# Producto del Proyecto nº 2 (PP2) Soluciones técnicas de secado utilizando energía solar térmica de concentración en la depuración de aguas residuales y en el tratamiento de residuos domésticos

POCTEP 2014-2020 / Proyecto nº : 0029\_SECASOL\_5\_E  
Inicio del proyecto: 01/12/2017  
Duración del proyecto: 25 meses

<b>PROYECTO SECASOL</b>	
Fomento de tecnologías innovadoras para la mejora de la eficiencia en el proceso de secado de los lodos de Aguas Residuales y de secado de Residuos Sólidos Urbanos mediante el uso de Tecnologías Solares en Andalucía-Algarve-Alentejo	
Fecha de entrega	15/02/2019
Socio responsable	LNEG
Persona responsable	Pedro Azevedo (LNEG)
Autores	Victor Mantilla (LNEG), Miguel Miranda (LNEG), David Loureiro (LNEG), Gonzalo Lobo (CENTA), Carlos Aragón (CENTA)
Revisado por	
Tipo de documento	Público

## Índice General

Índice General.....	2
Índice de Figuras.....	4
Índice de Tablas.....	6
1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 ENCUADRE DEL PROYECTO SECASOL.....	9
1.2 PROCESOS DE SECADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	10
1.3 PROCESOS DE SECADO EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS DOMÉSTICOS.....	12
2 TECNOLOGÍAS PARA EL SECADO DE LODOS DE EDAR Y DE PRODUCTOS RESULTANTES DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS DOMÉSTICOS.....	14
2.1 MÉTODOS DE SECADO TÉRMICO.....	17
2.2 FAMILIA DE SECADORES INDUSTRIALES.....	21
2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO TÉRMICO.....	22
2.4 SECADORES INDUSTRIALES MÁS ADECUADOS EN LA INTEGRACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.....	24
2.5 Secadores instantáneos (Flash Dryers).....	25
2.6 Secadores de Spray.....	26
2.7 Secadores de tambor rotativo.....	27
2.8 Secadores de lecho fluidizado.....	28
2.9 Secadores de impacto.....	29
2.10 Secadores “Through”.....	30
2.11 Secadores de transporte.....	30
2.12 Secadores de bandeja.....	31
2.13 Secador solar tipo invernadero.....	32
2.14 CONDICIONES DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS.....	34
2.15 Valorización agrícola de los lodos de EDAR.....	35
3 TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN PARA PROCESOS DE SECADO .....	38
3.1 COLECTORES SOLARES PLANOS (BAJA TEMPERATURA).....	39
3.2 COLECTORES DE TUBO AL VACÍO (BAJA-MÉDIA TEMPERATURA).....	41
3.3 COLECTORES CON CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO - CPC (BAJA- MÉDIA TEMPERATURA).....	42
3.4 COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS (MÉDIA TEMPERATURA).....	44
3.5 COLECTORES CON REFLECTORES LINEALES DE FRESNEL (MÉDIA TEMPERATURA).....	46
4 INTEGRACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR DE CONCENTRACIÓN EN LOS PROCESOS DE SECADO.....	48

4.1 POSIBLES ESQUEMAS DE INTEGRACIÓN.....	50
5 CONCLUSIONES.....	54
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
3. ANEXOS.....	60
3.1. ANEXO I - EJEMPLOS DE SECADORES COMERCIALES.....	60
3.2. ANEXO II - POSIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN/SECADO A TRAVÉS DE LECHOS DE MACRÓFITAS EN EDAR DE PEQUEÑA DIMENSIÓN.....	79
3.3. ANEXO III - EJEMPLOS DE PROCESOS DE SECADO INTEGRADOS CON TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR TÉRMICA.....	87
3.4. ANEXO IV – EJEMPLOS DE SECADORES TIPO-ESTUFA.....	88

## Índice de Figuras

Figura 1 - Curva típica de secado de lodos (Bennamoun and Arlabosse, 2013).....	15
Figura 2 - Identificación de la tecnología de concentración solar térmica más adecuada para la integración en procesos de secado. Adaptado de (Crema y Horta, 2014).....	25
Figura 3 - Diagrama de procesos de los secadores instantáneos. Adaptado de (GEA, n.d.).....	26
Figura 4 - Diagrama del equipamiento y del proceso de secado con secador de Spray. Adaptado de (Sosnik and Seremeta, 2015).....	27
Figura 5 - Proceso de secado con secador de tambor rotativo. Adaptado de (TN-ORIENT, n.d.).....	27
Figura 6 - Concepto de secado con lecho fluidizado. Adaptado de (Murthy and Joshi, 2007).....	28
Figura 7 - Esquema de la boca del secador de impacto. Adaptado de (Chemical Process Engineers, n.d.).....	29
Figura 8 - Esquema del secado con secador "Through". Adaptado de (GLENRO, n.d.).....	30
Figura 9 - Secadores de transporte. Adaptado de (NPTEL, n.d.).....	30
Figura 10 - Principio de funcionamiento de los secadores de bandeja. Adaptado de (Pharmawiki, n.d.).....	31
Figura 11 - Secador tipo invernadero con integración de diferentes alternativas. Adaptado de (HUBER Technology, 2001).....	32
Figura 12 - Secador tipo invernadero con sistema regenerativo (HUBER Technology, 2001).....	33
Figura 13 - Configuración tipo de un colector solar plano. Fuente: LNEG.....	40
Figura 14 - Colector solar plano con absorsor selectivo. Fuente: LNEG.....	41
Figura 15 - Colector de tubo de vacío. (Fuente: LNEG).....	42
Figura 16 - Configuración parabólica truncada de reflector del colector tipo CPC. (Winston et al., 2005).....	42
Figura 17 - Configuración del Reflector CPC aplicado en un colector de tubos de vacío. (Fuente: CENTA).....	43
Figura 18 - Instalación de sistema solar colectivo con utilización de colector solar del tipo CPC, en la configuración de circulación forzada. (Fuente: LNEG).....	43
Figura 19 - Tecnologías de colectores solares estacionarios y con seguimiento solar, en función de la temperatura de operación y de la gama de temperatura del proceso en diferentes sectores industriales. (Horta, 2015).....	45
Figura 20 - Colectores cilindro parabólicos. (FLABEG, 2015).....	45
Figura 21 - Tecnología Fresnel Linear. (Fuente: LNEG).....	46
Figura 22 - Posibles modos de integración de energía solar térmica en procesos industriales. (Schmitt, 2016).....	49
Figura 23 - Esquema de un sistema de transferencia de calor con tecnología solar utilizando un intercambiador de calor externo. (Schmitt, 2016).....	51
Figura 24 - Esquema de geración de calor solar al vacío (Schmitt, 2016).....	51

Figura 25 - Esquema del proceso de secado utilizando aceites térmicos (sintéticos) o vapor.  
(Schmitt, 2016).....52

Figura 26 - Comportamiento de la energía en un sistema CSP utilizando almacenamiento térmico.  
Adaptado de (Ginley and Parilla, 2013).....53

## Índice de Tablas

Tabla 1 - Métodos de secado aplicados a lodos – ventajas y desventajas, consumo específico y tasa específica de secado. Adaptado de (Bennamoun et al., 2013).....	20
Tabla 2 - Análisis comparativo de los diferentes tipos de secadores.....	21
Tabla 3 - Gama de secado de lodos en función de su uso.....	22
Tabla 4 - Características técnicas de los secadores instantáneos.....	26
Tabla 5 - Características de los secadores del tipo Spray.....	27
Tabla 6 - Características de los secadores de tambor rotativo.....	28
Tabla 7 - Características de los secadores de lecho fluidizado.....	29
Tabla 8 - Características de los secadores de impacto.....	29
Tabela 9 - Características de los secadores tipo "Through".....	30
Tabela 10 - Características de los secadores con medio de transporte.....	31
Tabla 11 - Características de los secadores de bandeja.....	31
Tabla 12 – Principales características de los secadores tipo invernadero.....	33
Tabla 13 - Algunas características de las tecnologías solares, segundo o tipo.....	38
Tabla 14 - Configuraciones técnicas de colectores solares de agua. Fuente (LNEG, 2016).....	39

## Nomenclatura

COV	Compuesto orgánico volátil
CP	Colectores cilindro parabólicos
FL	Fresnel Linear
HEX	Permutador tipo HEX
HEX HTF ar	Permutador de calor tipo HEX
HTF	Heat Transfer Fluid
PL-1	Calefactor solar para calor de proceso
PL-2	Calefactor solar para equipos
PL-3	Calefactor solar con HEX interno
PL-4	Suministro de vapor solar al vacío o a baja presión
PL-6	Calefactor solar de aire
SL-1	Integración paralela (directa ou indirecta) de calor solar
SL-2	Pre calentamiento del agua de alimentación de la caldera
SL-3	Pre calentamiento del agua de alimentación
SL-4	Integración paralela (directa o indirecta) de calor solar
SL-5	Solar return flow boost
RC	Receptor central

## **1 INTRODUCCIÓN**

La creciente dificultad en la gestión de los lodos procedentes de las Estaciones depuradoras de aguas residuales (en adelante EDAR) y de los lixiviados procedentes de las estaciones de tratamiento de residuos domésticos se ha acentuado debido al aumento de las poblaciones y de las actividades económicas. Los efluentes enviados a los sistemas de tratamiento se someten a diferentes procesos físico-químicos y biológicos, dando como resultado la producción de una gran cantidad de material a tratar (lodos y lixiviados). De este modo, debido a estas cantidades generadas, así como a las características que presentan, se ve necesario secar estos productos para poder reducir considerablemente su volumen y, disminuir, consecuentemente, los costes de su posterior tratamiento, almacenamiento y transporte, así como para potenciar su utilización como producto de valor añadido.

Otros beneficios asociados a la introducción de los procesos de secado en el tratamiento de los residuos domésticos son la valorización energética en forma de Combustibles Derivados de Residuos (en adelante CDR) y la reducción del volumen a depositar en vertederos.

Respecto al aprovechamiento de la radiación solar como una fuente renovable de energía térmica, puede ser posible su uso en aplicaciones industriales que necesitan grandes cantidades de calor, no sólo en los procesos productivos, sino también en las diversas etapas de tratamiento de residuos, constituyendo un factor de desarrollo económico, social e industrial.

La energía solar térmica puede contribuir significativamente a reducir las necesidades de calor de este tipo de procesos y, de esta forma, contribuir a la sustitución de parte de los combustibles fósiles usados en la producción de calor en los procesos industriales. Los procesos que requieren temperaturas inferiores a 100 °C pueden ser alimentados por calor producido por sistemas solares térmicos no concentradores. Las necesidades de calor para niveles de temperatura superiores pueden ser suplidas adecuadamente con la implementación de las actuales tecnologías solar de concentración.

En el presente documento, se abordan los procesos de secado utilizados en los tratamientos de aguas residuales y residuos domésticos, así como las tecnologías existentes para el secado de lodos de EDAR y lixiviados procedentes de residuos domésticos, con el objetivo de reducir su humedad y favorecer los procesos siguientes en el tratamiento considerando siempre que sea posible la valorización.

Se abordan las tecnologías de secado de lodos de EDAR y residuos domésticos, con especial atención a los métodos de secado teniendo en cuenta los criterios de transferencia de calor y

masa, la tasa de secado, la influencia y eficiencia de los diferentes sistemas de secado, las ventajas y desventajas del secado térmico y los tipos de secadores utilizados.

Serán analizadas lo referente a las tecnologías solar térmica de concentración aplicada a los procesos de secado, presentando algunas consideraciones en su integración, así como las soluciones consideradas más convenientes.

## **1.1 ENCUADRE DEL PROYECTO SECASOL**

El proyecto SECASOL tiene como principal objetivo la promoción de tecnologías innovadoras para la mejora de la eficiencia en el proceso de secado de lodos de depuradora y el secado de residuos domésticos a través del uso de tecnologías solares en el espacio transfronterizo de Andalucía-Algarve-Alentejo. Sigue las directrices establecidas por la política de cohesión y crecimiento sostenible de la Unión Europea, siendo financiado por el Programa POCTEP 2014-2020 (ref 0029\_SECASOL\_5\_E: 2017-2019) a través de los mecanismos de cooperación transfronteriza España-Portugal, orientado a la prevención de riesgos y la mejora de la gestión de los recursos naturales, con incidencia en el sector del agua y en el sector de los residuos.

Se prevé que el proyecto SECASOL pueda tener un impacto muy positivo en las regiones transfronterizas, donde el marco energético, las limitaciones geográficas y las concentraciones masivas de residuos en las zonas urbanas son muy similares. Por otro lado, son también similares, los medios actuales de secado y la abundancia de recursos de energía solar, por lo que el trabajo de cooperación transfronteriza permitirá afrontar desafíos y oportunidades comunes y el compartir experiencias replicables a ambos lados del territorio.

En temporada estival, la presión en las áreas urbanas del espacio transfronterizo de Andalucía-Algarve-Alentejo se agrava, coincidiendo el aumento de población consecuencia del turismo extranjero con las vacaciones de los residentes nacionales. Estos picos estacionales provocan problemas de gestión del tratamiento de los residuos por parte de los servicios municipales y de los concesionarios y, como consecuencia del aumento del consumo de energía convencional, provoca un aumento en la contaminación en estas zonas urbanas.

El proyecto pretende así afrontar, de una forma innovadora, la problemática asociada a los procesos de secado de los lodos procedentes de EDAR y del secado de residuos domésticos. Pretende potenciar la aplicación de tecnologías solares de concentración en los procesos industriales y contribuir a superar las barreras y desventajas que habitualmente se presentan en la aplicación de energías renovables a gran escala y reducir la contaminación en esas áreas urbanas transfronterizas.

La capitalización de las potencialidades de los socios representativos de estos sectores en el espacio transfronterizo (empresariales, municipales y científicos) pretende ser un

componente estratégico determinante en la proyección de los resultados y conclusiones del proyecto SECASOL. Se busca la viabilidad técnica y económica de soluciones menos contaminantes, haciendo uso mucho más allá de la fase de laboratorio de recursos energéticos renovables.

El plan de trabajo del proyecto SECASOL incluye la elaboración de informes sobre el potencial de aplicación de la energía solar térmica de concentración (PP1), las soluciones técnicas de secado con energía solar térmica de concentración (PP2), el mapeo de las competencias para generar conocimiento en estos (PP3), así como acciones y actividades de Experimentación de prototipos en condiciones reales de aplicación (PP10) y el desarrollo de Modelo de simulación de secador solar térmica de concentración (PP11).

## 1.2 PROCESOS DE SECADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los lodos procedentes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales están compuestos por materia orgánica e inorgánica, junto con un elevado porcentaje de agua. De acuerdo con la información publicada (Chen et al., 2002; Werther and Ogada, 1999), el contenido en humedad de los lodos pueden alcanzar valores próximos de 99% (m/m) bajo la forma de agua libre (70% a 75% de contenido de agua total asociado a fenómenos de floculación) o por conexión química /intracelular (cerca de un 1% del contenido total de agua).

Dependiendo de sus características, el destino final que debe darse a los lodos procedentes de la depuración de aguas residuales puede ser variado: la incineración, la deposición en vertedero o el reciclado (esta última a través del compostaje para el aprovechamiento agrícola). En todos estos métodos, el presecado de los lodos es una necesidad por varias razones (Chai, 1997):

- ✓ Permite una reducción significativa del contenido de agua y, consecuentemente, una reducción de la masa y el volumen de lodos a tratar.
- ✓ Reducción del impacto ambiental (por ejemplo, asociado al transporte y emisión de contaminantes).
- ✓ El secado a alta temperatura, no sólo permite reducir la tasa de microorganismos patógenos existentes en los lodos, sino que también permite su estabilización en cuanto a las fermentaciones no deseadas.
- ✓ La eliminación del agua aumenta el poder calorífico de los lodos permitiendo su utilización como fuente adicional de combustible.

Una adecuada selección del modelo de secado de lodos de EDAR debe tener en cuenta el

producto final pretendido así como las condiciones técnicas y regulatorias existentes. De esta forma, el tipo de tratamiento seleccionado deberá tener en cuenta:

- ✓ Las características del producto final. Este deberá contener una cantidad mínima de polvo debido a su carácter orgánico (potencialmente explosivo). También se debe prestar especial atención a su almacenamiento (riesgos de ignición y / o incendio), así como al manejo del lodo seco o el aumento de la concentración de polvo en la atmósfera circundante (impacto negativo en la salud).
- ✓ Considerando lo expuesto en: (i) En el caso de las instalaciones andaluzas, para contenidos de materia seca superior al 90%, deberá considerarse lo expuesto en la *Orden de 6 de agosto de 2018, conjunta de la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se regula la utilización de lodos tratados de depuradora en el sector agrario* y (ii), en el caso portugués, se debe tener en cuenta lo expuesto en el Decreto Ley nº 276/2009 que establece los criterios a seguir para los lodos con un contenido en materia seca inferior al 20% y posteriormente el Despacho nº 8400 -22/07/15.

Las condiciones de operación de los procesos de secado térmico asociados al tratamiento de aguas residuales se abordaron en el informe PP1 (Potencial de aplicación de la energía solar térmica de concentración a los procesos de depuración de aguas residuales y de tratamiento de residuos sólidos urbanos) elaborado en el marco del proyecto SECASOL (Mantilla et al., 2018) por lo que no se abordarán en este documento.

Las EDAR se consideran industrias que presentan un alto riesgo de explosiones e incendios debido a la formación de los gases de digestión generados en el tratamiento de aguas residuales (mezclas explosivas de gas-aire). Los lodos secos también presentan un alto riesgo de explosión, lo que debe ser tenido en cuenta debido a las temperaturas requeridas en los diversos procesos de secado de los lodos.

De acuerdo con el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo en la Exploración de los Sistemas Públicos de Distribución de Agua y de Drenaje de Aguas Residuales, se definen como factores de riesgo específico las actividades que resultan de las siguientes situaciones:

- ✓ **Insuficiencia de oxígeno atmosférico.** Indica que la exposición de los trabajadores a atmósferas susceptibles de presentar insuficiencia de oxígeno sólo se permite cuando se garantiza un contenido volumétrico de oxígeno igual o superior al 17%, salvo en la utilización de equipo de protección adecuado (aparato de protección respiratoria autónoma).
- ✓ **Formación de gases o vapores peligrosos.** Evaluación de los riesgos de existencia y/o

formación de gases y definición de valores límite en los medios donde se desarrollan las actividades que pueden presentar atmósferas contaminadas con gases susceptibles de constituir riesgo de intoxicación, asfixia, incendio o explosión (por ejemplo, ozono, cloro, gas sulfhídrico, dióxido de carbono y metano, vapores de combustibles líquidos, vapores de disolventes orgánicos, gases combustibles y monóxido de carbono).

- ✓ **Reactivos.** Deben tomarse medidas específicas en lo que se refiere a la manipulación de reactivos con riesgo de provocar quemaduras, dermatosis, ulceraciones u otras lesiones cutáneas (por ejemplo, óxido de calcio, hidróxido de calcio, sales de aluminio, sales férricas o férricas y cloro).
- ✓ **Aguas residuales y lodos.** Su manipulación deberá realizarse con especial cuidado debido a la formación de cenizas resultantes de la incineración de los lodos (formación de sustancias peligrosas) y la existencia de microorganismos patógenos (riesgos de infección procedentes del manejo y del control analítico).
- ✓ **Aumento brusco del caudal y/o inundaciones súbitas.** Deben ser establecidos y accionados medidas de evacuación, definidas los eventuales riesgos de descargas de emergencia y los programas de exploración deben prever medidas específicas a adoptar en las situaciones de inundación súbita (p. reventamientos o de otras averías de tuberías a presión).
- ✓ **Señalización adecuada relativa a las restricciones / riesgos en el interior de las instalaciones.** Lugares visitables que presenten riesgos de ahogamiento (por ejemplo, colectores, captaciones, cámaras de aspiración de estaciones elevadoras, depósitos y órganos de estaciones de tratamiento, recuperación y almacenamiento de biogás, zonas de almacenamiento, preparación y aplicación de sustancias y zonas de equipos mecánicos y eléctricos) y, además, la identificación de la(s) zona(s) de primeros auxilios.

### 1.3 PROCESOS DE SECADO EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS DOMÉSTICOS

El secado solar es una opción ventajosa cuando se compara con los sistemas térmicos de secado mecánico convencionales, ya que utiliza una fuente de energía renovable. Este aspecto es especialmente interesante para los países con alta exposición al sol como son Portugal y España.

Los procesos de secado asociados al tratamiento de residuos domésticos se describen en el informe PP1 - *Potencial de aplicación de la energía solar térmica de concentración a los procesos de depuración de aguas residuales y de tratamiento de residuos domésticos (Mantilla et al., 2018)* por lo que no se abordarán en este documento.

Teniendo en cuenta los procesos del tratamiento de residuos domésticos, así como las condiciones operativas y las cantidades de materia a tratar, puede considerarse la utilización de tecnologías de energía solar térmica en los siguientes procesos de secado:

- a) el secado de los residuos en la salida de la unidad del tratamiento mecánico biológico (TMB);
- b) el secado de las aguas lixiviadas resultantes de la infiltración de aguas pluviales en el vertedero.

Las necesidades totales de energía térmica dependerá de la cantidad de residuos y lixiviados que se deben secar, de sus características y de las condiciones ambientales (temperatura y humedad del aire).

También es posible la utilización de energía solar térmica para la producción de aire caliente para procesos de tratamiento de la materia orgánica (compostaje). El calentamiento de este aire se puede hacer de forma integrada con la producción de calor para los procesos de secado. Se observa que típicamente la degradación biológica de la materia orgánica no requiere la adición de calor externo, sin embargo, un aumento en la temperatura del aire (de 40 a 50 ° C) permite un aumento en el desempeño del proceso. La energía requerida para el calentamiento del aire dependerá de las condiciones ambientales (temperatura del aire y humedad) y del caudal de aire necesario para el proceso.

## **2 TECNOLOGÍAS PARA EL SECADO DE LODOS DE EDAR Y DE PRODUCTOS RESULTANTES DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS DOMÉSTICOS**

### **a) Lodos resultantes de EDAR**

Las elevadas necesidades de energía asociadas a los procesos de secado de lodos procedentes de EDAR y de los lixiviados o de los materiales resultantes del procesamiento de los residuos domésticos son poco atractivos económicamente si son tratados de forma aislada. De esta manera, los elevados costes asociados al transporte, procesamiento y deposición final de estos materiales (cuyo elevada humedad suponen un aumento significativo de volumen y masa) obligan a buscar soluciones que permitan reducir estos costes (mediante la reducción de las cantidades de materia a el tratamiento). En este ámbito, las soluciones de secado con energía solar térmica parecen una solución renovable de alto interés económico y ambiental.

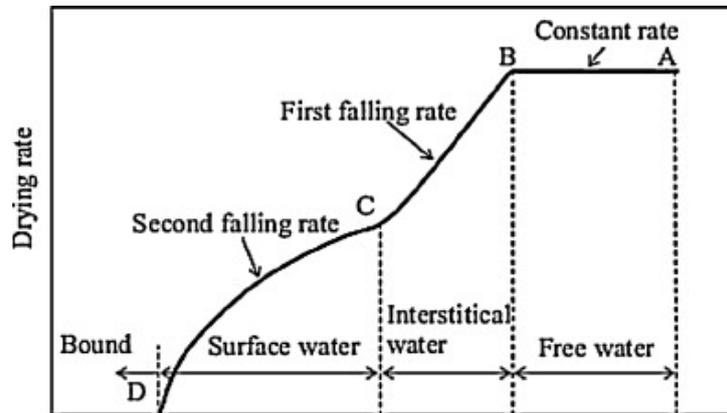
El agua que se encuentra en el estado libre no está ligada a las partículas del lodo, pudiendo ser extraída por diferentes procesos, en particular por sedimentación (acción gravitacional), sistemas mecánicos, drenaje o evaporación. El agua intersticial / adsorbida se encuentra en el interior de la materia sólida (relleno de zonas porosas del material) y puede ser eliminada por acción de fuerzas mecánicas o por la aplicación de temperaturas elevadas. El agua de superficie está ligada en la superficie de las partículas sólidas por acción de fuerzas intermoleculares (adhesión) pudiendo ésta ser eliminada también por acción de temperatura (aunque inferiores a las requeridas en la eliminación del agua intersticial). El agua de unión química está fuertemente ligada a las partículas sólidas y su eliminación requiere fuerza mecánica o energía térmica.

El proceso de secado térmico de los lodos se basa en la eliminación del agua a través de la evaporación (aumento de temperatura del sistema), la tasa de evaporación o la tasa de secado dependen del contenido de humedad existente del lodo y del tipo de conexión el agua presenta con el material.

Uno de los elementos más cruciales y que permite obtener información sobre el comportamiento del lodo durante el secado es la variación de la humedad en el lodo en función del tiempo de secado. Esta variación, típicamente conocida como Curva de Secado, permite verificar el número de fases y la tasa de secado a la que el lodo es sometido durante el referido proceso.

Según algunos autores (Bennamoun, 2012; Bennamoun and Arlabosse, 2013), la tasa de

secado de lodos presenta 3 fases típicas (Figura 1): la primera fase corresponde a un secado que presenta una tasa constante y corresponde a la extracción del agua libre, la segunda fase que corresponde a una tasa de secado inferior donde se verifica la extracción del agua intersticial y una tercera fase en la que se observa un ligero aumento de la tasa de secado, correspondiendo a la extracción del agua superficial del material. La cantidad de agua retenida todavía en el interior del lodo corresponde al agua de conexión por vía química (siendo ésta dependiente del tipo de lodos y condiciones de secado).



**Figura 1 - Curva típica de secado de lodos**  
(Bennamoun and Arlabosse, 2013).

El secado solar es una opción ventajosa cuando se compara con los sistemas térmicos convencionales (secado mecánico), ya que utiliza una fuente de energía renovable. Además, el secado solar puede ser aplicado en todas las líneas de tratamiento, haciendo que esta solución sea muy versátil a la vez que económicamente y ambientalmente atractiva. Este aspecto es especialmente interesante para los países con alta exposición al sol como Portugal y España.

El secado solar se está convirtiendo en una opción muy popular para la sustitución de los secadores térmicos mecánicos. Los lechos de secado solar han sido convertidos en secadores solares del tipo invernadero permitiendo una mejor mezcla y ventilación de los lodos (Mathioudakis et al., 2013). Los sistemas de secado solar permiten la evaporación del agua de forma más eficaz posibilitando la transformación gradual de los lodos a secar en gránulos con un contenido de humedad entre 10 a 15%. Además de la evaporación del agua y de una reducción sustancial del volumen de lodo a tratar (80% m / m), el proceso de secado permite también la desinfección parcial de los lodos mediante la reducción del contenido de agentes patógenos. Esta acción resulta de la exposición a la radiación ultravioleta solar ya la acción de la temperatura.

## **b) Lixiviados de residuos domésticos y residuos domésticos para CDR**

Los lixiviados procedentes de vertederos de residuos domésticos se caracterizan por ser una compleja mezcla líquida de sustancias orgánicas e inorgánicas que presentan una elevada toxicidad. Este residuo es sometido a diferentes procesos de tratamiento físico-químicos (coagulación / floculación, precipitación química, adsorción con carbón activado, membranas y ósmosis inversa) y biológicos (lagunas de estabilización, filtros biológicos aerobios y anaeróbicos, lodos activados), pudiendo estas tecnologías de tratamiento están condicionadas por aspectos técnicos-económicos (Aguilar et al., 2012). Existen otros tipos de tratamiento que buscan una evaporación del lixiviado (para una posterior condensación) con vistas a un mayor grado de eficiencia (95% de eliminación de contaminantes). En lo que se refiere a los concentrados, estos rondan el 6% (m / m), siendo posteriormente sometidos a un tratamiento final por inertización (estabilización / solidificación).

En los diferentes tratamientos que se aplican, se incluyen los Procesos Oxidativos Avanzados (POA) (pretratamiento de lixiviado) para permitir la degradación química de la materia orgánica recalcitrante y aumentar la biodegradabilidad del lixiviado. La aplicación de POA se refiere esencialmente a la transformación por oxidación de los componentes presentes en los lixiviados, en sustancias biológicas degradables (o en sustancias más fácilmente eliminables por los procesos físico-químicos convencionales) (Airton et al., 2002). Estos procedimientos de tratamiento se aplican también a las aguas residuales debido a sus características fisicoquímicas (Babuponnusami y Muthukumar, 2014).

Entre los POA, destaca el uso del peróxido de hidrógeno en presencia de sales de hierro, conocido como el **Proceso Fenton** debido, principalmente, a su bajo coste y a su alta eficiencia en la degradación de compuestos recalcitrantes. Asimismo, también se ha considerado la oxidación de compuestos orgánicos, por vía de ultrasonidos, debido a la rápida tasa de degradación de los contaminantes químicos, así como el tratamiento electroquímico con vistas a la destrucción de compuestos tóxicos y orgánicos biorefractarios. En este último, la oxidación anódica y la electrooxidación indirecta son las técnicas más utilizadas en la mineralización de esos contaminantes. En algunos casos se podrá considerar la combinación de estas técnicas para maximizar el efecto deseado (Babuponnusami y Muthukumar, 2014, Ebrahiem et al., 2017).

Como se mencionó anteriormente, en el informe PP1 - Potencial de aplicación de la energía solar térmica de concentración en los procesos de depuración de aguas residuales y de tratamiento de residuos domésticos (Mantilla et al., 2018), se describen los aspectos más relevantes sobre esta temática.

## 2.1 MÉTODOS DE SECADO TÉRMICO

En el proceso de depuración de aguas residuales se forma un residuo (lodos de depuración) que debido a sus características físicas y químicas necesita ser sometido a un proceso de secado.

Este secado puede ocurrir a través de tres métodos: el secado convectivo, el secado conductivo o el secado solar. En el secado convectivo se pueden encontrar las siguientes fases: fase de adaptación, fase de tasa de secado constante y la fase de secado decreciente. En el secado conductivo, otros aspectos son tenidos en cuenta como son la agitación mecánica constante para renovar el contacto entre la superficie de calefacción y el producto a secar para mantener constante el coeficiente de transferencia de calor entre las paredes. Durante este proceso, el lodo pasa por tres fases distintas: fase húmeda, fase viscosa y fase granular.

No obstante, al considerar la opción de secado solar, las cuestiones relativas a la variabilidad de las condiciones operativas que dependen de las condiciones climatológicas (por ejemplo, la radiación solar y la temperatura y la velocidad del aire), deben ser debidamente protegidas, ya que pueden influir significativamente en la cinética de secado (modificación de las características finales del producto con vistas a su posterior aplicación / valorización).

La selección del tipo de secador a considerar deberá tener en cuenta las características iniciales de la materia a secar, las especificaciones finales requeridas para los productos así como las condiciones de operación. De acuerdo con las condiciones de transferencia de calor y masa, los métodos de secado se pueden clasificar como:

- ✓ Sistemas directos (tambor rotativo, lecho fluidizado, alfombra de atomización).
- ✓ Sistemas indirectos (capa fina, disco giratorio y palas rotativas).
- ✓ Sistemas combinados (combinación de sistemas directos con indirectos).

En los sistemas de secado directo, se verifica un contacto directo e intensivo entre el fluido de transferencia de calor y el producto a secar (secado por convección), siendo éste fluido el responsable de la transferencia de masa de agua existente. En el segundo caso, secadores indirectos, el material a secar está separado del fluido de transferencia de calor por una superficie intermedia (secado por conducción), siendo transferido el calor al material por conducción a través de una superficie de transferencia de calor y, por consiguiente, el fluido de transferencia de calor no es responsable de la transferencia de masa de agua, no estando en contacto directo con el producto a secar (Mendes, 2003).

Los secadores combinados, presentan la particularidad de combinar las características de los dos sistemas. En este caso, el secado ocurre simultáneamente a través del calentamiento de

las paredes circundantes, como también a través del contacto directo entre el fluido de transferencia de calor y el material a secar. El vapor de agua formado en el proceso de secado es posteriormente enfriado y recuperado en forma de condensado.

### **a) Secadores de contacto directo**

En los secadores de contacto directo, el fluido de transferencia de calor (gases calientes) está en contacto directo con el producto a secar, siendo este proceso un secado por convección forzada. Este tipo de secadores suele presentarse en condiciones de operación a altas temperaturas. Estas condiciones a veces constituyen un problema debido al aumento del riesgo de explosión resultante de la formación de polvo de lodos en la atmósfera circundante. De este modo, el uso de secadores convectivos requieren de un equipo específico para la limpieza del aire y la desodorización.

La principal ventaja del secado directo sobre el secado indirecto se centra en la obtención de partículas más consistentes y uniformes en el producto final. Como desventaja presentan una contaminación significativamente mayor debido a las emisiones gaseosas producidas contienen polvo y compuestos volátiles. Para estas situaciones es necesario proceder a la recirculación del lodo seco, factor que depende de su grado de deshidratación.

Las tecnologías que se encuentran en la categoría de secadores de contacto directo son las siguientes:

- ✓ Secadores neumáticos (secadores instantáneos).
- ✓ Secadores rotativos o de tambor.
- ✓ Secadores de lecho fluidizado.

### **b) Secadores indirectos**

En los secadores de contacto indirecto, el secado se realiza principalmente por conducción. Como ventajas se puede subrayar la reducción del olor, del riesgo de formación de polvo y la reducción de emisiones gaseosas contaminantes (no necesitan recirculación del lodo seco).

En la categoría de los secadores indirectos podemos encontrar los siguientes tipos:

- ✓ Secadores de palas.
- ✓ Secadores de tambor rotativo.
- ✓ Secadores de disco.

- ✓ Secadores de estante.

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de equipos de secado. Una breve revisión de los equipos existentes y de sus principales características principales puede consultarse en el Anexo I.

## **Secado de lodos**

De acuerdo con la información publicada (Bennamoun and Arlabosse, 2013), en el secado de lodos se pueden utilizar los secadores de convección, en sistemas de calefacción directa o indirecta, a través del uso de los productos procedentes de la combustión de diversos combustibles (origen fósil, biomasa y biogás), diferentes tipos de intercambiadores de calor o, además, la combinación de estos sistemas térmicos. Considerando que el consumo específico de energía depende del sistema de secado, estos autores también señalan que la tasa de secado específica puede variar de  $0,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (para métodos de secado convectivos) considerando un secador de atomización, para  $30 \text{ kg.m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  para el caso de un sistema de secado de tapete.

En la actualidad, desde el punto de vista económico, la gestión de una EDAR prevé la reducción del volumen y la masa de lodos a tratar, así como su posterior recuperación para una valorización diversa. Teniendo en cuenta estos aspectos, se tiene como objetivo la producción de un lodo sustancialmente más seco, cuyos contenidos de humedad deben ser inferiores al 10% (m / m).

La velocidad de secado de los lodos de EDAR y lixiviados provenientes de residuos domésticos depende directamente de los siguientes factores:

- ✓ Temperatura de secado y humedad del aire.
- ✓ Velocidad y dirección del flujo de transportador de calor.
- ✓ Área de superficie descubierta (superficie de contacto con la fuente de calor).
- ✓ Constitución y composición del material a secar.
- ✓ Tiempo de retención del material en el sistema de secado.
- ✓ Características / tipo del proceso de secado.

En la Tabla 1 se resumen los métodos de secado aplicados al secado de lodos, sus principales características así como las ventajas y desventajas que presentan.

**Tabla 1 - Métodos de secado aplicados a lodos - ventajas y desventajas, consumo específico y tasa específica de secado.** Adaptado de (Bennamoun et al., 2013).

<sup>(1)</sup> COV

Método de secado	Ventajas	Desventajas	Consumo específico ( $kWh_t^{-1}$ )	Tasa de secado específico ( $kg\ m^{-2}h^{-1}$ )
Convectiva	Diseño que permite una fácil operación Producto final seco de aplicación agrícola	Tiempo de secado relativamente largo Emisiones gaseosas (olores)	Secador de tapete (700 a 1140) Secador de tambor (900 a 1100) Secador de atomización (1200 a 1400)	Secador de tapete (5 a 30) Secador de tambor (3 a 8) Secador de atomización (0,2 a 1)
Conductiva	Ninguna contaminación en el sistema de transmisión de calor Baja emisión de olores La concentración de COV (1) reducida Reducción del riesgo de incendio y explosión Producto seco con potencial para aplicaciones industriales	Tiempo de secado relativamente largo La fase viscosa del lodo altera la eficiencia del secador	Secador de disco (855 a 955) Secador de pala (800 a 885) Secador de película fina (800 a 900)	Secador de disco (7 a 12) Secador de palas rotativas (15 a 20) Secador de película fina (25 a 35)
Solar Direto	Fuente de energía gratuita Lodos libres de agentes patógenos Producto final seco de aplicación agrícola Permite secar grandes cantidades durante a misma operación	Dependiendo de la variación de las condiciones climáticas Tiempo de secado relativamente largo Requiere gran superficie de colectores	30 a 200 (podendo alcanzar valores del orden de los 1000)	---
Vapor Sobrecalentado	Ausencia de emisión de partículas Ausencia de emisiones de volátiles Eliminación de agentes patógenos Tiempos de secado relativamente cortos Bajo consumo de energía	Requiere altas temperaturas de operación	---	---

*Compuesto orgánico volátil*

## 2.2 FAMILIA DE SECADORES INDUSTRIALES

En la Tabla 2 se presenta una breve descripción de las principales características de los secadores usados en el secado de residuos con humedad, así como las gamas de temperaturas de operación, el contenido de materia seca a la entrada y, aún, los consumos específicos de energía.

**Tabla 2 - Análisis comparativo de los diferentes tipos de secadores**

<i>Tambor por convección</i>	<i>Conducción rotativa</i>	<i>Bandeja vertical</i>	<i>Banda</i>	<i>Camada fina o mixta</i>	<i>Lecho fluidizado</i>
Principales Características					
Calor transferido por una corriente de aire precalentado, en contacto directo con el lodo	Tambor horizontal en el interior o flujo de gas pasa por el cilindro junto con el material a secar.	El material cae a través de bandejas metálicas sucesivas y son calentadas por conducción en el interior	El material es tratado y depositado en una correa perforada, expuesta a un fluido de transferencia de calor (corriente de gases calientes) orientados perpendicularmente.	Secado parcial por contacto con superficie calentada (2/3) y secado por convección con aire precalentado circulando dentro del tambor (1/3)	Secado por convección, a través de una corriente de gas caliente (recipiente de secado)
Temperatura (°C)					
300-500	100-130	100-130	55-70	200-270	80-100
Materia seca a la entrada (%)					
>20	>20	>20	>25	>5	>25
Materia seca a la salida (%)					
90-95	90-95	90-95	85	90-95	95
<b>Consumo específico de energía (kWh/kg H<sub>2</sub>O)</b>					
0,87	0,87	0,87	0,87	0,81 - 1,16	0,87
Valorización					
Agrícola o energética					

La rentabilidad del secado de los lodos depende de su uso final. Si el objetivo de los lodos es la valorización agrícola, el grado de secado que permite la obtención de un margen lucrativo debe ser superior al 60% (en base seca). Lo mismo ocurre con los sistemas de coincineración de lodos con residuos (Flaga, 2003).

La Tabla 3 presenta el grado de secado de lodos de acuerdo con su uso final.

**Tabla 3 - Gama de secado de lodos en función de su uso**

<b>Método de utilización</b>	<b>Grado de secado</b>			<b>Objetivos de secado</b>
	<i>30-40%</i>	<i>60-90%</i>	<i>Por encima 90%</i>	
Agrícola	No lucrativo (en relación con cuestiones técnicas y económicas)	Rentable	Rentable	Conveniencia de transporte y almacenamiento. Estabilización y saneamiento (por encima del 90%)
Incineración	Rentable 35-45% en base seca	No lucrativo (en relación con cuestiones técnicas y económicas)	Rentable (si parte del lodo se seca y se mezcla con un lodo del 35-45% antes de ser enviado a la instalación de incineración)	Incineración autotérmica
Coincineración con residuos	No lucrativo (en relación con cuestiones técnicas y económicas)	Rentable	Rentable	Transporte simple, almacenamiento y operación de instalación de incineración

## 2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO TÉRMICO

En este subcapítulo son abordadas las principales ventajas y desventajas del proceso de secado térmico de los lodos de EDAR y el material derivado del tratamiento de residuos domésticos de acuerdo con la información publicada (David, 2002; Davis, 2002; De Castro, 2002; Galdós Aller, 2001; González Rodríguez, 2001; Perdices, 1999; Permuy Vila, 2002; Pueyo et al., 1999). Cabe señalar que varios de estos puntos son característicos del secado térmico y no exclusivo del uso de energía solar térmica.

### Ventajas

- ✓ Los sistemas mecánicos de deshidratación permiten alcanzar entre 15 y 35% de materia seca. Un nivel más alto de secado requiere la ruptura de la estructura molecular del lodo, ya sea para uso biológico (compostaje) o térmico (secado térmico e incineración). Para una situación de lodos mecánicamente deshidratados (con un 20% de materia seca como un valor medio), el secado térmico permite reducir el volumen hasta cuatro veces cuando se compara con los lodos deshidratados.
- ✓ El secado térmico es un proceso que permite la estabilización del lodo debido a la acción del calor. Sin embargo, cuando se compara con los procesos de estabilización, el secado térmico no conduce a una reducción sustancial de la materia orgánica volátil presente en los lodos.

- ✓ Elevados niveles de desinfección. Las altas temperaturas a las que es sometido el lodo durante el proceso de secado unido al tiempo de residencia dentro del secador, garantizan la eliminación o la inactivación de los agentes patógenos.
- ✓ Las instalaciones tradicionales de secado ocupan un espacio reducido en comparación con la gran capacidad de tratamiento que pueden alcanzar (Perdices, 1999). Cabe señalar, sin embargo, que el uso de energía solar térmica para la producción de calor industrial para el secado requiere un mayor de área de instalación en comparación con los demás sistemas.
- ✓ El agua evaporada durante el secado se condensa y se conduce hasta el inicio de la estación de tratamiento, no sólo para permitir la reducción de lixiviados, sino también para que los gases de escape puedan ser tratados antes de ser enviados a la atmósfera.
- ✓ El secado térmico de lodos conduce a un importante desarrollo industrial siendo una tecnología actualmente contrastada.
- ✓ La necesidad de energía térmica en los procesos convencionales de secado térmico a altas temperaturas, utilizando combustibles fósiles, alcanza valores en el orden de los 850 kWh por tonelada de agua evaporada, mientras que la necesidad de energía eléctrica ronda valores entre los 70 a 110 kWh por tonelada de agua evaporada . El secado solar permite la descarbonización de estos procesos, aumentando su sostenibilidad mediante la introducción de una fuente de energía renovable.
- ✓ La temperatura de funcionamiento en el secador es muy variable, dependiendo del mecanismo físico que controla el proceso de secado. La gama de temperaturas puede variar entre los 55 y los 500 ° C dependiendo del tipo de secador. El secado térmico permite alcanzar un contenido en materia seca superior al 85% en todos los casos, pudiendo alcanzar valores más elevados (del orden del 95%).
- ✓ El lodo seco por vía térmica presenta múltiples posibilidades de recuperación y/o disposición final. Su principal aplicación es, generalmente, en forma de fertilizante orgánico, aunque también puede ser incinerada o utilizada en otros sistemas de recuperación de energía.

### **Desventajas**

- ✓ Elevados costes de inversión y mantenimiento, muy superiores a otras tecnologías menos intensivas de tratamiento posterior de lodos, especialmente en el caso de las instalaciones de cogeneración asociadas.
- ✓ Factores como seguridad y facilidad de operación y mantenimiento, que son más difíciles de cuantificar y para hacer una evaluación económica.

- ✓ Necesidad de un sistema de apoyo para garantizar el porcentaje de secado deseado en casos especiales.
- ✓ Necesidad de incluir en estas instalaciones sistemas de seguridad sofisticados para evitar riesgos de incendio y / o explosión por acumulación de polvo generada durante el proceso.

## **2.4 SECADORES INDUSTRIALES MÁS ADECUADOS EN LA INTEGRACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA**

En este subcapítulo se presentará una breve descripción de los tipos de secadores convencionales más comunes y que se consideran más adecuados para la integración de las tecnologías de energía solar térmica. De acuerdo con las condiciones de temperatura requeridas para cada tipo de secador, se identifica la tecnología de energía solar térmica más adecuada teniendo en cuenta los siguientes parámetros operativos: fluido de transferencia de calor y la temperatura de entrada en el secador.

En el caso de los secadores directos que usan el aire caliente como fluido de transferencia de calor -*Heat Transfer Fluid* (HTF)-, se comprueba la posibilidad de utilización en sistemas cuya temperatura de entrada de aire puede alcanzar los 650 ° C.

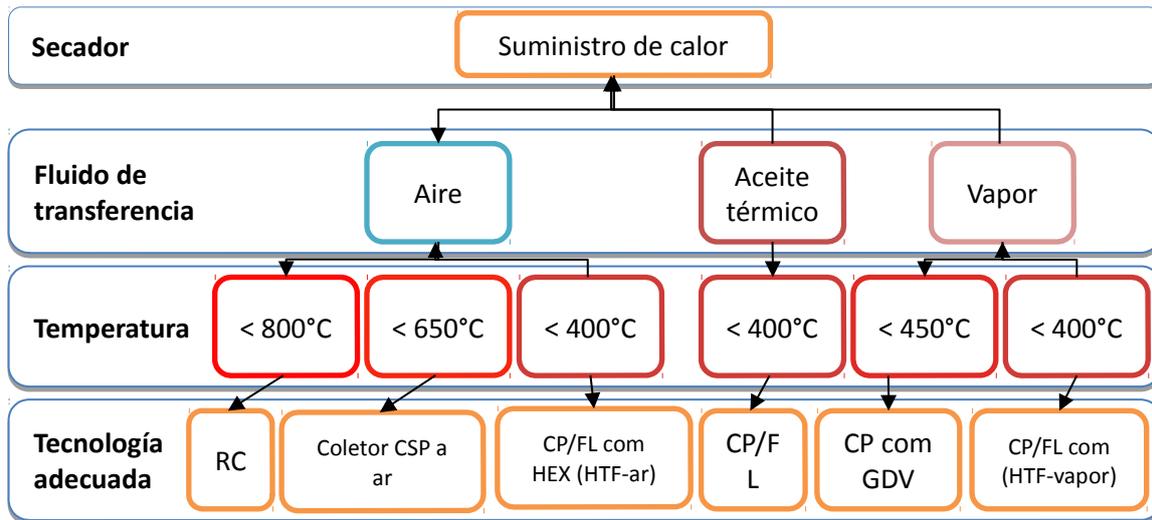
Para temperaturas inferiores a los 400 °C, y con otros fluidos de transferencia de calor (diferentes del aire) se pueden utilizar los colectores cilindro parabólicos (CP) o de tecnología Fresnel Linear (FL). En este caso, sin embargo, un intercambiador de calor llamado HEX HTF aire.

Para sistemas que requieren temperaturas del aire más altas, la opción a adoptar sería un sistema receptor central (RC) (sistemas que son generalmente receptores volumétricos). En los casos de uso de aire caliente como fluido de transferencia de calor, se comprueba que el almacenamiento de energía térmica es facilitado (en medio sólido) a través de un lecho de rocas compactadas.

Para los casos en que se utilizan secadores directos e indirectos usando vapor (sobrecalentado) u otro HTF, se pueden integrar sistemas cilindro-parabólicos con producción directa de vapor (GDV) para temperaturas hasta 450 ° C, o sistemas cilindro-parabólicos y reflectores lineales de Fresnel integrando un generador de vapor (HTF-vapor). Para las situaciones que apuntan a la utilización de secadores indirectos cuyo fluido de transferencia de calor es el aceite térmico, las tecnologías de concentración solar térmica más adecuadas son los colectores cilindro-parabólicos o recolectores del tipo reflectores lineales de Fresnel.

El resumen de las tecnologías de concentración solar de media y alta temperatura que se pueden utilizar en procesos de secado se muestra en la Figura 2, teniendo en cuenta el fluido

de transferencia de calor, la temperatura requerida y la tecnología más adecuada.



**Figura 2 - Identificación de la tecnología de concentración solar térmica más adecuada para la integración en procesos de secado.** Adaptado de (Crema y Horta, 2014).

La carga térmica o la dimensión (capacidad) de los secadores son parámetros igualmente a tener en cuenta en la identificación de la tecnología de concentración solar a implementar. La carga puede variar entre cientos de kW hasta varios MW. Así, se considera que la carga térmica de los procesos de secado depende principalmente de la tasa de evaporación requerida para el proceso (cantidad de agua a eliminar), del tiempo requerido y del dimensionamiento del secador.

Se presenta a continuación, y de forma genérica, los diferentes tipos de secadores, las exigencias típicas de necesidades térmicas y la tecnología de concentración solar más adecuada para su integración teniendo en cuenta la información publicada por diferentes grupos (Crema y Horta, 2014).

## 2.5 Secadores instantáneos (Flash Dryers)

Los secadores instantáneos Flash Dryers (Figura 3), también denominados sistemas de secado neumático, son secadores de secado directo. El material húmedo se dispersa bajo el fluido de transferencia de calor (aire o gas caliente) que, a su vez, permite su transporte a través de un conducto o túnel de secado. Posteriormente, a través de sistemas de separación de partículas (ciclones o filtros), el material es separado. La temperatura de secado debe ser la más elevada posible, sin exceder los límites impuestos por las características térmicas de los equipos.

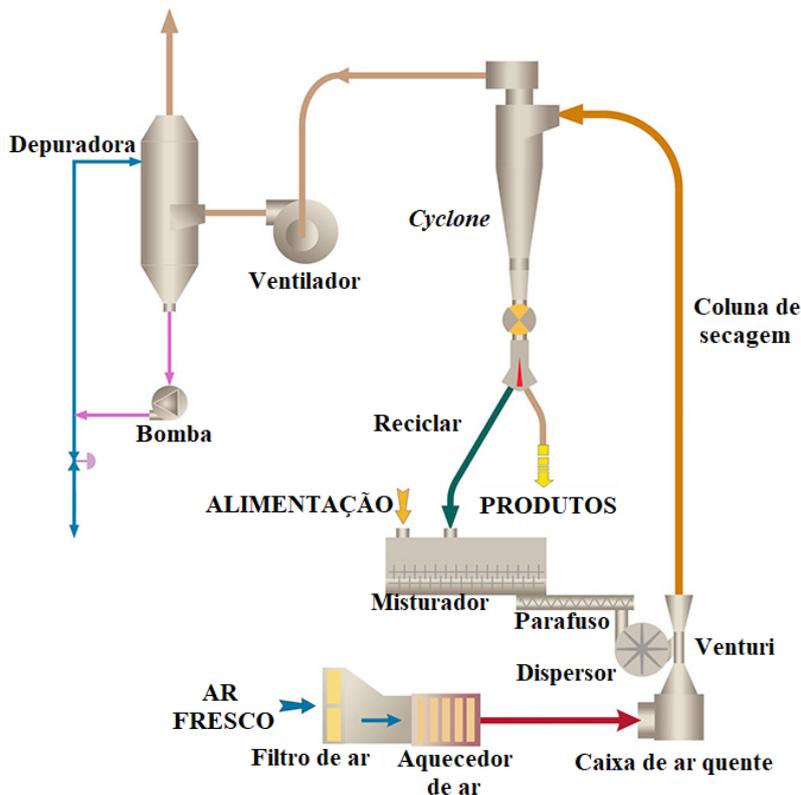


Figura 3 - Diagrama de procesos de los secadores instantáneos. Adaptado de (GEA, n.d.).

Tabla 4 - Características técnicas de los secadores instantáneos.

<i>Tipo de entrada de calor</i>	<i>Medio de secado/calentamiento</i>	<i>Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor</i>	<i>Presión del medio de transferencia de calor</i>	<i>Tecnología CSP adecuada</i>
Secado directo	Aire	400-600 °C	Presión atmosférica o similar	CR com receptor de aire
	Vapor sobrecalentamiento	>230 °C	Alta (25 bar)	CP/FL + HEX GDV

## 2.6 Secadores de Spray

Los secadores del tipo Spray (Figura 4 y Tabla 5) son sistemas de secado directos que permiten atomizar el material de entrada. Este material se dispersa en la parte superior de una gran cámara de secado. El secado ocurre por vía térmica, a través de la formación de gotas que se precipitan en el fondo de la cámara, siendo las partículas secas separadas posteriormente por ciclones.

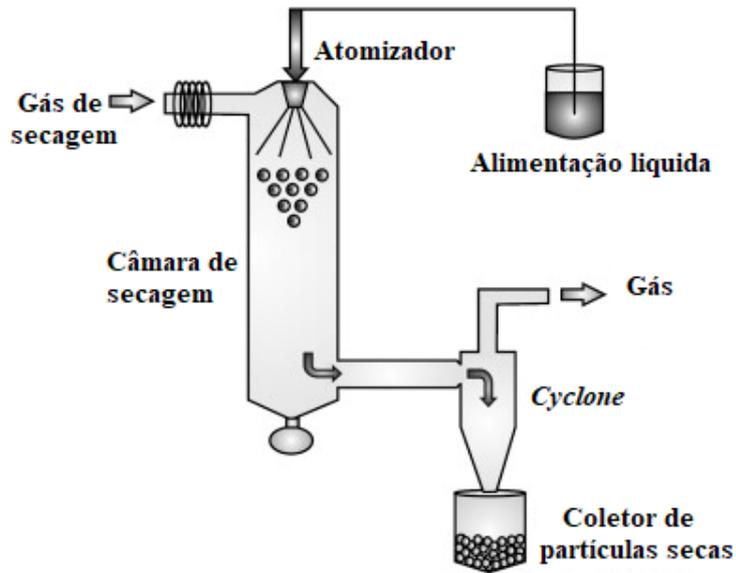


Figura 4 - Diagrama del equipamiento y del proceso de secado con secador de *Spray*. Adaptado de (Sosnik and Seremeta, 2015).

Tabla 5 - Características de los secadores del tipo *Spray*.

<i>Tipo de entrada de calor</i>	<i>Medio de secado/calentamiento</i>	<i>Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor</i>	<i>Presión del medio de transferencia de calor</i>	<i>Tecnología CSP adecuada</i>
Secado directo	Aire	200-450 °C	Cerca de la atmosférica	CSP con receptor de aire. CP/FL + HEX
	Vapor sobrecalentado	<700 °C	Cerca de la atmosférica	CR (até 550 °C)

## 2.7 Secadores de tambor rotativo

En los secadores de tambor rotativo (Figura 5 y Tabla 6) el material húmedo se seca en un tubo cilíndrico rotativo. En este sistema, el material sólido es transferido por el efecto combinado del flujo de aire, de la gravedad, de la velocidad de rotación e inclinación del escudo.

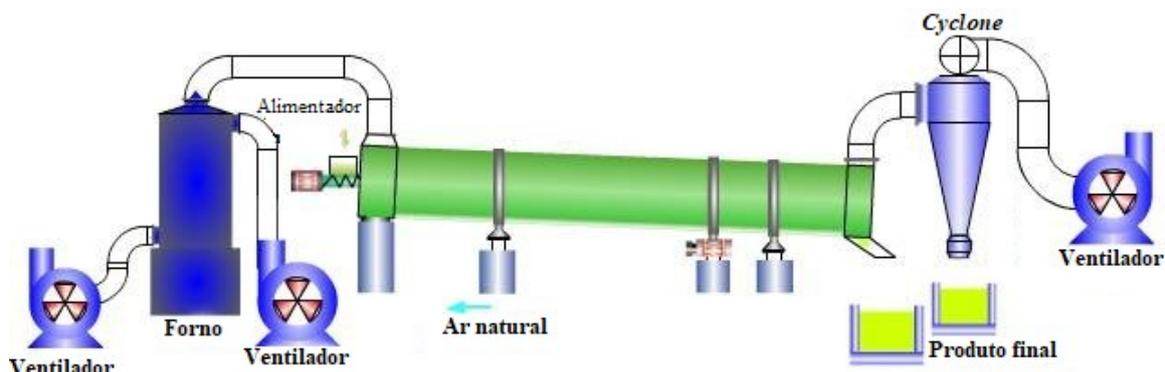


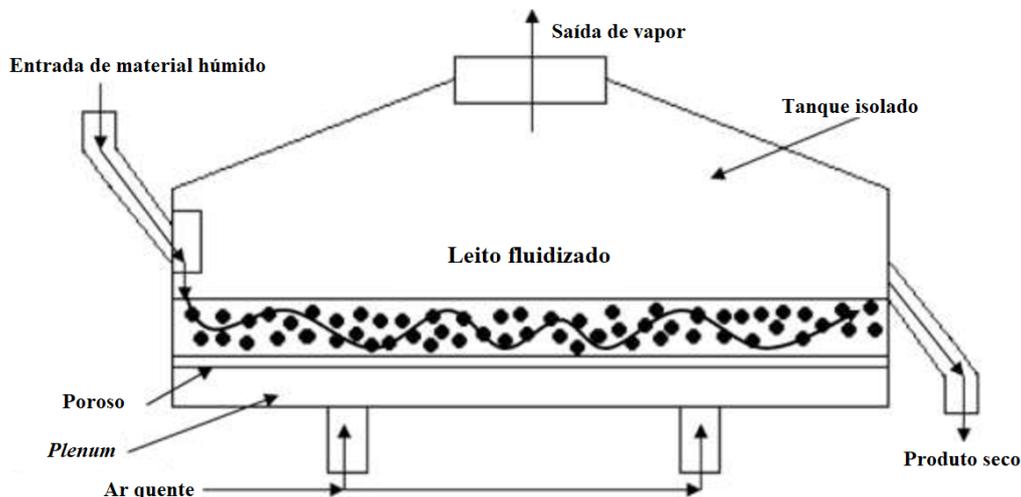
Figura 5 - Proceso de secado con secador de tambor rotativo. Adaptado de (TN-ORIENT, n.d.).

**Tabla 6 - Características de los secadores de tambor rotativo.**

Tipo de entrada de calor	Medio de secado/calentamiento	Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor	Presión del medio de transferencia de calor	Tecnología CSP adecuada
Secado directo	Aire	200-600 °C	Presión atmosférica o en su vecindad	CSP con receptor de aire. CP/FL + HEX
	Vapor sobrecalentamiento	<300 °C	Baja o cerca de atmosférica	CP/FL + HEX o GDV
Secado indirecto	Vapor (tubo de vapor)	<300 °C (temperatura de superficie)	No especificado	CP/FL + HEX o GDV
	Aire / Gases de combustión	Até 700-900 °C	No especificado	CR con receptor de aire

## 2.8 Secadores de lecho fluidizado

Estos secadores (Figura 6) emplean la fluidización gas-sólido en un proceso de contacto entre dos fases. En primer lugar, la fase sólida, bajo la fluidización es tomada "como un fluido", y la fase gaseosa fluye sobre el lecho de partículas a una velocidad específica para garantizar la fluidización. En este tipo de secador, el secado ocurre por un mecanismo combinado de transferencia de calor y masa. Las características de los secadores de lecho fluidizado se presentan en la Tabla 7.



**Figura 6 - Concepto de secado con lecho fluidizado.** Adaptado de (Murthy and Joshi, 2007).

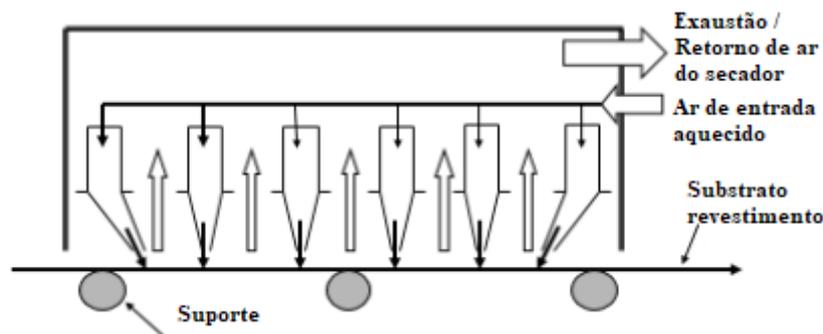
**Tabla 7 - Características de los secadores de lecho fluidizado.**

Tipo de entrada de calor	Medio de secado/calentamiento	Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor	Presión del medio de transferencia de calor	Tecnología CSP adecuada
Secado directo	Aire	100-600 °C	Presión atmosférica o en su vecindad	CSP con receptor de aire. CP/FL + HEX
	Vapor sobrecalentamiento	50-360 °C	Presión atmosférica o en su vecindad (<5bar)	CP/FL + HEX o GDV
Secado indirecto	Vapor	<300 °C (temperatura de la superficie)	No especificado	CP/FL + HEX o GDV

## 2.9 Secadores de impacto

En la Tabla 8 se presentan las características de los secadores de impacto (Figura 7). Estos sistemas utilizan el impacto rotativo para promover la ruptura de los materiales aglomerados en un tubo de arrastre vertical.

La mayoría de los materiales de alimentación húmedos se pueden introducir directamente en el secador de impacto. En la entrada del secador, el material de alimentación se expone a los gases calientes y la humedad superficial se evapora rápidamente. La alimentación se arrastra dentro del secador por medio de los gases calientes. La humedad se evapora a medida que el material pasa por el sistema.



**Figura 7 - Esquema de la boca del secador de impacto.** Adaptado de (Chemical Process Engineers, n.d.).

**Tabla 8 - Características de los secadores de impacto.**

Tipo de entrada de calor	Medio de secado/calentamiento	Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor	Presión del medio de transferencia de calor	Tecnología CSP adecuada
Secado directo	Aire	100-350 °C	Cerca de la atmosférica	CP/FL + HEX HTF/aire
	Vapor sobrecalentamiento	>100 °C	Cerca de la atmosférica	CP/FL + HEX o GDV

## 2.10 Secadores "Through"

Estos secadores (ver Figura 8) se basan en sistemas de secado directo (Tabla 9). En este tipo de sistemas se observa la existencia de un diferencial de presión entre el material húmedo poroso y la corriente de aire caliente de secado que pasa a través del material. Estos secadores son similares a los secadores de impacto y rotativos.

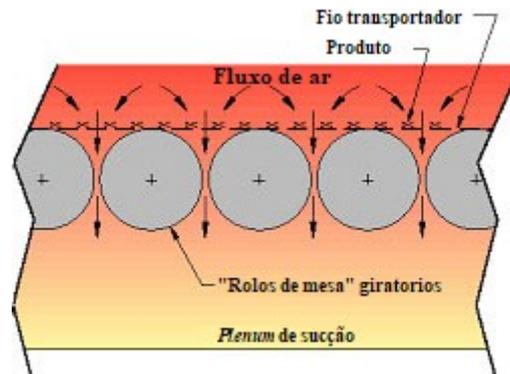


Figura 8 - Esquema del secado con secador "Through". Adaptado de (GLENRO, n.d.).

Tabela 9 - Características de los secadores tipo "Through".

Tipo de entrada de calor	Medio de secado/calentamiento	Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor	Presión del medio de transferencia de calor	Tecnología CSP adecuada
Secado directo	Aire	150-370 °C	Cerca de la atmosférica	CP/FL + HEX HTF/ar
	Vapor sobrecalentamiento	>100-180 °C	Cerca de la atmosférica	CP/FL + HEX GDV

## 2.11 Secadores de transporte

En los secadores de transporte (Figura 9) el material húmedo es transportado por una correa de acero (a través de un sistema de vibración) por una cámara donde pasa el aire caliente. Estos sistemas presentan también el secado directo como principal característica (Tabla 10).

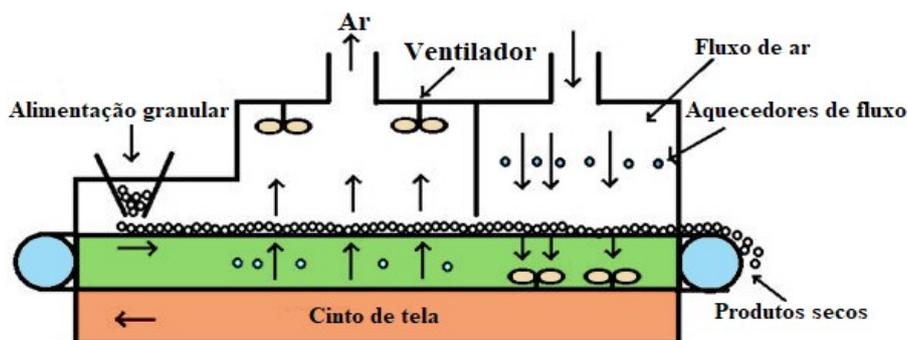


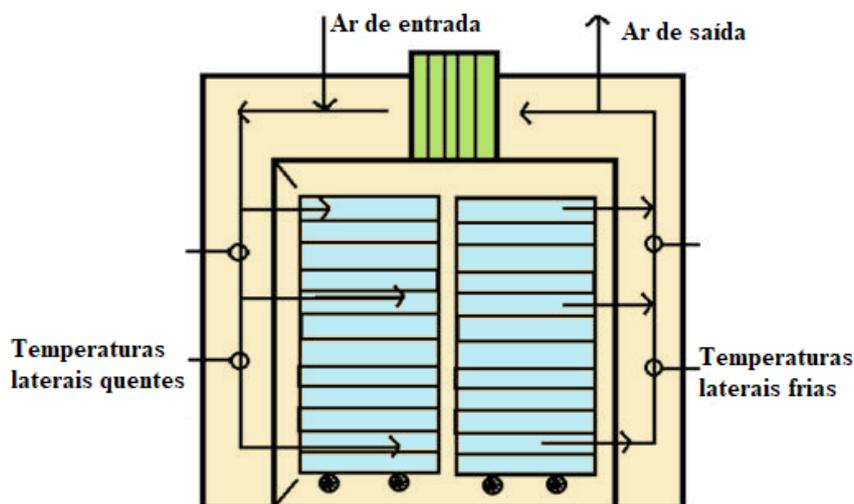
Figura 9 - Secadores de transporte. Adaptado de (NPTEL, n.d.).

**Tabela 10 - Características de los secadores con medio de transporte.**

Tipo de entrada de calor	Medio de secado/calentamiento	Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor	Presión del medio de transferencia de calor	Tecnología CSP adecuada
Secado directo	Aire	50-175 °C	Cerca de la atmosférica	CP/FL + HEX HTF/aire
	Vapor sobrecalentamiento	>160 °C	Media (<5bar)	CP/FL + HEX o GDV

## 2.12 Secadores de bandeja

Los secadores de bandeja (Figura 10), también conocidos como secadores de túneles, son generalmente secadores directos. El material a secar se coloca en carros o bandejas, que entran por un extremo del túnel y posteriormente se descargan en el otro extremo (después de secos) por medio de una corriente de aire caliente. También existe un tipo de secador de bandejas indirecto, en el cual el calor se suministra al material a secar por una superficie de contacto, internamente calentada por un fluido de transferencia térmica (por ejemplo, aceite o vapor), las características más importantes en la Tabla 11.



**Figura 10 - Principio de funcionamiento de los secadores de bandeja.** Adaptado de (Pharmawiki, n.d.)

**Tabla 11 - Características de los secadores de bandeja.**

Tipo de entrada de calor	Medio de secado/calentamiento	Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor	Presión del medio de transferencia de calor	Tecnología CSP adecuada
Secado directo	Aire	100-200 °C	Cerca de la atmosférica	CP/FL + HEX
Secado indirecto	Vapor /Aceite térmico	<300 °C (temperatura de superficie)	No especificado	CP/FL + HEX o GDV

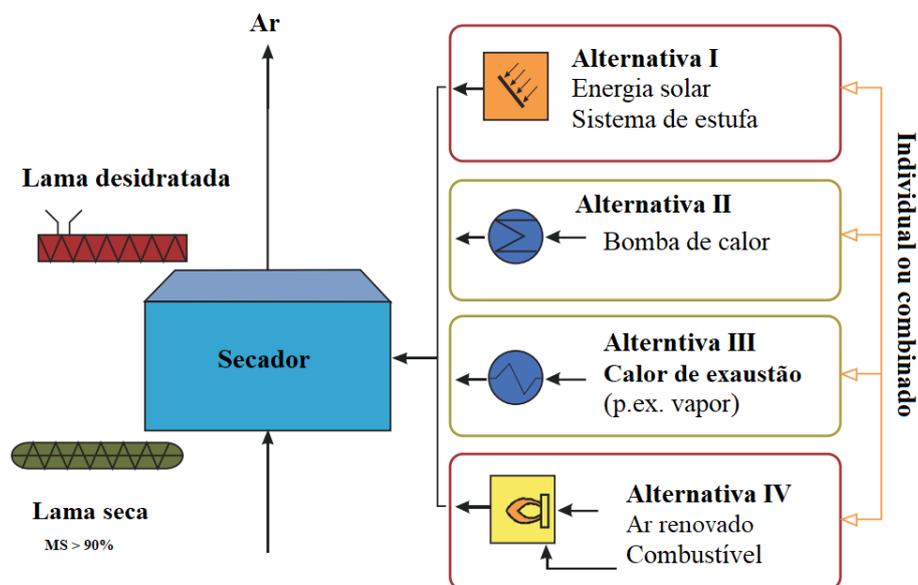
## 2.13 Secador solar tipo invernadero

Este tipo de secador actúa como un invernadero (espacio cerrado) donde es posible elevar la temperatura del aire de modo artificial. En este tipo de sistemas, cuanto mayor sea la temperatura del aire mayor cantidad de vapor de agua puede ser transportado. Sin embargo, la presión parcial de vapor aumenta con la cantidad de agua existente en el aire por lo que deben utilizarse sistemas de ventilación controlada, en particular PLC's (Process Logical Control) para un mejor control de la temperatura y la humedad dentro y fuera del invernadero.

Los secadores tipo invernadero se pueden diseñar con diferentes especificaciones:

- ✓ Piso radiante.
- ✓ Mejor visualización del proceso de secado;
- ✓ Zona de temperatura y sin recirculación del producto;
- ✓ Secado por lotes como facilidad de muestreo del producto durante el proceso de secado;
- ✓ Sistemas de limpieza y desconexión de fácil operación.

Con excepción de los días muy húmedos, el proceso de secado se produce incluso con poca energía del sol. Dada las características presentadas por este tipo de secadores, estos pueden ser configurados de diferentes formas para mejorar su eficiencia global. En la Figura 11 se presentan algunas alternativas.



**Figura 11 - Secador tipo invernadero con integración de diferentes alternativas.** Adaptado de (HUBER Technology, 2001).

En el caso de la Alternativa I (recurso solar), los secadores tipo invernadero pueden ser integrados con sistemas fotovoltaicos (Haque et al., 2019) o, con colectores CPC (colectores parabólicos compuestos) de tubos de vacío, siendo esta última la tecnología más usada.

En el proceso de secado, la materia a secar se introduce por bombeo (desde la zona de almacenamiento de lodos hasta el invernadero), siendo posteriormente esparcida en el interior del invernadero a través de procesos mecánicos. En el caso de los lixiviados procedentes de residuos domésticos, éstos pueden ser previamente almacenados para su posterior integración en el secador.

En la Tabla 12 se presentan algunas especificaciones de los secadores tipo invernadero, siendo el secado directo su principal característica.

**Tabla 12 – Principales características de los secadores tipo invernadero**

Tipo de entrada de calor	Medio de secado/calentamiento	Temperatura de entrada del medio de transferencia de calor	Presión del medio de transferencia de calor	Tecnología CSP adecuada
Directa	Aire y agua	50-120 °C	No especificado	No adaptable – Utilizados colectores tipo plano, CPC o vacío

A este tipo de secadores (solar tipo-invernadero), se puede añadir un sistema regenerativo. Este sistema funciona en el área total del secado, permite revolver el lecho de lodos y, en el caso de los procesos biológicos, permite una reducción significativa de los olores producidos. Además, este tipo de sistema permite además la reducción de polvo resultante del proceso mecánico dado que los lodos todavía se encuentran suficientemente húmedos.

En la Figura 12 se muestra un ejemplo de este sistema de secado. Existen varias entidades que producen sistemas de secado, componentes o prototipos de investigación. En este caso, se puede destacar la *Thermo-System*, la *WendeWolf* de IST (IST Anlagenbau GmbH, 1994), la *Heliantis* de Degrémont (Maldonado, 2005) integrado en la EDAR de Ponta na ilha de Porto Santo – Portugal (desde 2012) e, además, la *KULT* de *HUBER Technology* (Anexo IV).



**Figura 12 - Secador tipo invernadero con sistema regenerativo (HUBER Technology, 2001).**

En el caso de los componentes algunos fabricantes nacionales presentan: el sistema híbrido Black Block utilizado para deshidratar alimentos y productos agroindustriales, el Bubble Dryer de Chatron y el DryEcoMate (García et al., 2018) cuyos modelos se resumen en el Anexo IV. El proyecto de investigación SECMAD (Loureiro et al., 2008) desarrollado por el INETI, utilizó un secador tipo-invernadero con ventilación natural y mecánica con un sistema de instrumentación y control, responsable por la optimización de las condiciones de ambientales externas e internas del secador.

## 2.14 CONDICIONES DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

Los residuos sólidos urbanos se regulan desde 2007, a través del:

- ✓ Plan Estratégico para los Residuos Sólidos Urbanos II (PERSU II, Portaria n.º 187/2007), como acción de la política nacional de gestión de residuos para el horizonte temporal 2007-2012.
- ✓ La integración de las directivas comunitarias en relación con la justificación de la aplicación de los residuos urbanos biodegradables en vertederos y el fomento y la regulación del reciclado y la valorización de los residuos de envases (MAOTDR, 2007).

Como complemento del PERSU II, se publicó en 2009 una estrategia nacional para incentivar la preparación de la fracción restante de los residuos sólidos y la promoción de su utilización en una matriz industrial, denominada "Estrategia para los Combustibles Derivados de Residuos -CDR" (Despacho 21295 / 2009) (MAOTDREI, 2009).

En el marco de la estrategia nacional de RSU, se aprobó en 2014 el "Plan Estratégico para los Residuos Urbanos" que abarca la meta para 2020 (PERSU 2020, Decreto nº 187-A / 2014) (MAOT, 2014). El PERSU definió diversos objetivos, reforzando la orientación del PERSU II, en lo que se refiere al incremento de la preparación para reutilización, del reciclaje y de la calidad de los reciclables, la eliminación progresiva del depósito de residuos en vertedero y el aumento de la contribución del sector a otras estrategias y planes nacionales.

En el marco de la contribución del sector de los RSU en relación con otras estrategias nacionales, concretamente relacionadas con las metas definidas en el "Plan Nacional para el Cambio Climático - PNAC" (PNAC 2020/2030), también se consideró en el PERSU el incentivo a la sustitución de combustibles fósiles por CDR producidos a partir de RSU. En el PNAC 2020/2030 se definen como medidas, entre otras, el aumento del porcentaje de utilización de combustibles alternativos en la mezcla energética de las industrias manufactureras, la promoción de la penetración de fuentes de energías renovables y en el sector de los residuos la creación de condiciones para la salida y la valorización económica de los CDR y la contribución al cumplimiento de las emisiones de GEI, promoviendo la sustitución de

combustibles fósiles por CDR.

## **2.15 Valorización agrícola de los lodos de EDAR**

### **a) Portugal**

La valorización agrícola de los lodos de EDAR está regulada a nivel nacional desde 2009 por el Decreto-Ley nº276/2009, estableciendo el régimen de utilización de lodos de depuración procedentes de depuradoras domésticas, urbanas y de otras EDAR de composición similar, o la mezcla de lodos constituida exclusivamente a partir de este tipo de residuos.

Dicha normativa se aplica a la utilización en suelos agrícolas de estos tipos de lodos (EDAR), incluida la obligatoriedad del productor o del operador de poseer una autorización para su aplicación en el suelo en un determinado perímetro de intervención sujeto a la aplicación de un Plan de gestión de lodos (PGL) (DRAP), con un dictamen favorable de la CCDR y de la ARH territorialmente competentes, con el objetivo de promover su correcta utilización y controlar los efectos nocivos para la salud pública, la red hidrográfica, y el ecosistema relacionado como el medio agrario (APA, 2014).

En virtud del Decreto-Ley nº 73/2011, es competencia de la Comisión de Coordinación y Desarrollo Regional (CCDR) territorialmente competente, el licenciamiento de la actividad de valorización agrícola de lodos ejercida por operadores con capacidad técnica comprobada y que sean titulares de para las operaciones de valorización agrícola de lodos de depuración. de conformidad con la legislación específica nacional. En cuanto al tratamiento a efectuar los lodos de depuradora, se adecua un régimen especial de licenciamiento, ajustado al PGL y al área de esparcimiento, debiendo el productor ser titular de permiso para el almacenamiento y / o tratamiento de lodos.

Sólo se permite la utilización en suelos agrícolas, los lodos que cumplan los valores límite de metales pesados, compuestos orgánicos y microorganismos, y que se tenga en cuenta que su introducción en suelos cultivados no puede sobrepasar los valores límite de concentración previstos anualmente reglamentariamente, siendo obligatoria la realización periódica de análisis a los lodos ya los suelos por laboratorios acreditados. El Decreto-Ley nº 276/2009 establece que los lodos con un contenido en materia seca (MS) inferior al 20% deben inyectarse inmediatamente en el suelo o dispersarse sobre el terreno y ser incorporados al suelo en un plazo máximo de 24 horas (eliminación en el caso del uso de los lodos en la valorización agrícola, se considerarán los valores límite de concentración de (mg / kg de MS) relativos a metales pesados compuestos orgánicos y dioxinas y microorganismos.

A partir de 2015 el Ministerio de Agricultura y del Mar y la Secretaría de Estado del Ambiente (Despacho nº 8400 -22/07/15) creó la Comisión Técnica de Seguimiento de la Directiva Lamas

(CTADL), un órgano nacional de carácter consultivo que congrega los diferentes intereses en torno a la valorización agrícola de los lodos, la credibilidad de la operación de valorización de residuos y la agilización del régimen en vigor, diversos representantes de organismos oficiales de gestión, investigación y ordenación del territorio de este flujo de residuos que permita su mayor control.

## **b) España - Andalucía**

La legislación de lodos en Andalucía fue establecida a partir de 1993:

*“En la Orden de 22 de noviembre de 1993 se establecía la creación del registro de lodos de la comunidad autónoma, adscrito a la Consejería de Agricultura y Pesca, por el que se disponía la información necesaria que deberán facilitar los entes locales y demás entidades titulares de estaciones depuradoras de aguas residuales, así como las entidades explotadoras de lodos para el sector agrario, mediante la cumplimentación de determinados Anexos que contienen como datos más relevantes la información sobre la calidad de los lodos tratados de depuradora y la relación de municipios de ubicación de las zonas agrarias en las que se aplican dichos lodos.*

*El Decreto 73/2012, de 22 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía, tiene como objetivo desarrollar el régimen jurídico regulador de la producción, posesión y gestión de los residuos recogido en la Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, y además prevenir la generación de residuos y fomentar la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización.*

*El objetivo es doble, se valoriza un residuo y supone un beneficio a la agricultura en línea con lo planteado en la Estrategia Europea de una Bioeconomía Sostenible, mediante la conversión de los flujos de residuos en productos de valor añadido para mejorar la producción y la eficiencia en el uso sostenible de los recursos. Los lodos tratados de depuradora mantendrán su condición de residuos hasta su incorporación efectiva a los suelos, y como tal deberán ser manipulados y aplicados por las entidades legalmente establecidas a tal fin.”*

*Neste âmbito, em 2018 foi publicada novo decreto que estabelece o seguinte:*

*Orden de 6 de agosto de 2018, conjunta de la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se regula la utilización de lodos tratados de depuradora en el sector agrario.*

*Para obtener lodos tratados de depuradora se podrán aplicar los métodos de tratamiento por compostaje, correspondiendo a metodologías de manejo del lodo de depuradora que se basen en métodos controlados de transformación biológica aeróbica y termófila del lodo, e se admitirá, la incorporación a la mezcla para compostaje de materias primas de origen orgánico, animal o vegetal, incluidas expresamente en la lista de residuos orgánicos biodegradables (Real Decreto*

*506/2013, de 28 de junio, Anexo IV) con uno contenido mínimo final de materia seca de 60%.*

*Distintas metodologías para el tratamiento de lodos, pueden ser utilizados en plantas de depuradora, además de compostaje, que permiten obtener un lodo tratado mediante la reducción de su poder de fermentación y de su potencial para causar molestias y daños para la salud y el medio ambiente. Así se puede utilizar la Digestión anaerobia termófila a una temperatura mínima de 55°C e tiempo de retención media de 15 días, a Digestión anaerobia mesófila a una temperatura mínima de 35 °C, con un tiempo de retención medio de 12 días, siempre que a los lodos se les haya sometido a un tratamiento térmico inmediatamente anterior de, al menos, 70 °C durante 30 minutos e lo secado térmico, donde toda la masa sometida a tratamiento deberá alcanzar una temperatura como mínimo de 80 °C, y permanecerá en tal temperatura durante un tiempo no menor de 10 minutos. Para tiempos de permanencia igual o superiores a 30 minutos, se admitirá que la temperatura alcance durante ese período como mínimo 70°. El contenido final de humedad no podrá ser mayor de un 10%.*

*De acuerdo con la Orden de 6/agosto 2018, Las instalaciones de tratamiento de lodos donde se realicen los métodos de tratamiento llevarán registro de los datos y medidas recogidos en la comprobación de los parámetros del tratamiento de que se trate, y mantendrán tales registros durante 5 años a disposición de la Administración. Dichos registros recogerán una referencia inequívoca bien al lote de tratamiento bien a la identificación de la fecha y, en su caso, hora de carga o de inicio de la carga, en sistemas de alimentación continua y del lodo o mezcla sometida a tratamiento.*

### **3 TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN PARA PROCESOS DE SECADO**

La energía solar es una fuente inagotable, de gran interés y aplicabilidad, siendo una alternativa a las fuentes de energía "no renovables" o convencionales. A continuación, se muestran las principales tecnologías que permiten la captación y conversión de la radiación solar en energía térmica.

El principal componente de un sistema de energía solar es el colector. El colector solar más simple está compuesto por una superficie negra absorbente donde circula un fluido para permitir la extracción del calor producido por la absorción de la irradiación solar.

La selección del tipo de colector más apropiado para un determinado proceso depende principalmente de la temperatura de operación deseada y de las condiciones climatológicas. La eficiencia de un determinado colector solar disminuye en la medida en que la temperatura del fluido aumenta o la radiación solar disponible disminuye.

Las tecnologías solares pueden clasificarse de forma general por su nivel de temperatura de funcionamiento típico, existiendo tres clases: baja temperatura; temperatura media; alta temperatura, así como las características de utilización. La Tabla 13 resume las características de las principales tecnologías solares, según el tipo, rango de temperatura y uso típico.

**Tabla 13 - Algunas características de las tecnologías solares, segundo o tipo.**

<b>Tipo de tecnología</b>	<b>Gamas de temperatura</b>	<b>Usos</b>
Baja temperatura	< 100 °C	Obtención de agua caliente sanitaria y agua o aire caliente para calefacción de edificios o procesos industriales de baja temperatura
Media temperatura	100 – 400 °C	Producción de vapor para procesos industriales, secado, producción de energía eléctrica a pequeña escala, fotocátalisis, desalinización de agua de mar y refrigeración por absorción
Alta temperatura	>= 400 °C	Para la producción de electricidad a gran escala

Existen diversas bases de datos que pueden ser consultadas para obtener información específica sobre los colectores disponibles en el mercado. Para colectores planos y de tubo de vacío se recomienda la consulta de la base de colectores de Solar Keymark (Solarkeymark, 2019). Para colectores concentradores en la gama de media temperatura se recomienda la consulta de la base de datos del proyecto STAGE-STE (STAGE-STE, 2015).

### 3.1 COLECTORES SOLARES PLANOS (BAJA TEMPERATURA)

Los sistemas solares térmicos pueden utilizar diversas tecnologías de aprovechamiento de la energía solar térmica por medio de colectores solares que pueden ser del tipo plano, CPC, tubo de vacío o concentrador parabólico. Los colectores de tipo plano y CPC se utilizan en aplicaciones de baja temperatura (<100 ° C) como el calentamiento de piscinas, la agua caliente sanitaria, la calefacción central o el suministro de calor de proceso industrial. De acuerdo con el medio fluido utilizado para la conversión de calor, los colectores pueden funcionar con aire o agua.

Los colectores planos de aire presentan una menor eficiencia comparado con los colectores a agua, principalmente debido a la reducida capacidad térmica del aire.

Son más utilizados en configuraciones de sistemas solares pasivos en edificios o en sistemas activos de climatización y secado. No se asocian, normalmente al almacenamiento en depósitos, pero pueden combinarse con sistemas regenerativos de lecho de piedras o materiales de cambio de fase o actuar como fuente fría de una bomba de calor aire-agua de baja temperatura, cuya aplicación depende mucho de la competitividad del costo de operación frente a otros equipos.

Los colectores solares con agua, pueden incorporar diversas configuraciones técnicas en función de los sistemas solares térmicos a los que están asociados, pudiendo clasificarse en tres grupos en función de la gama de temperatura y la generación de calor: colectores planos con o sin cobertura y con tubos de (Tabla 14).

**Tabla 14 - Configuraciones técnicas de colectores solares de agua.** Fuente (LNEG, 2016)

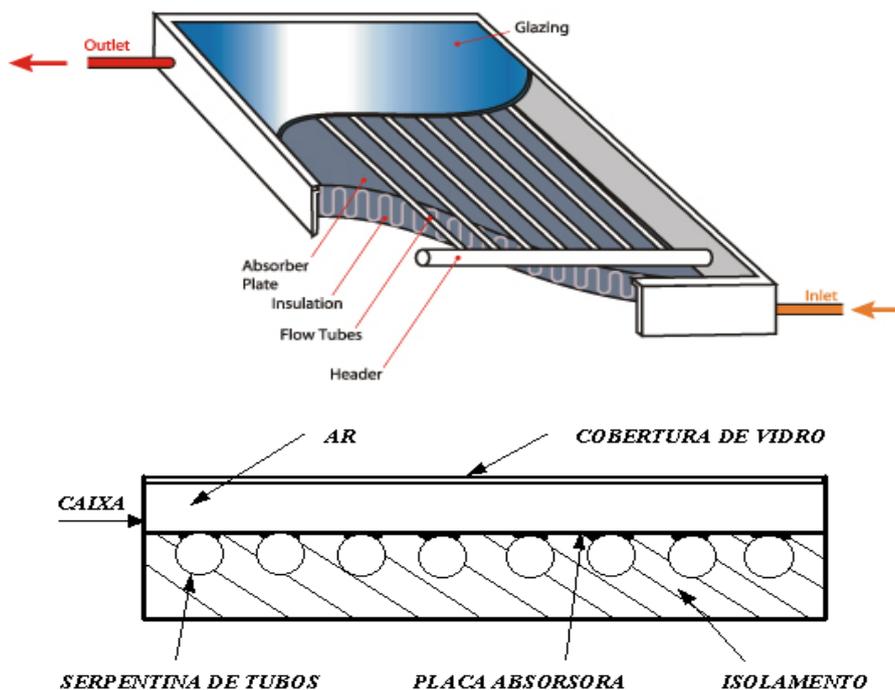
	<b>Colectores con cobertura</b>	<b>Colectores sin cobertura</b>	<b>Colectores de tubo de vacío</b>
Temperatura de operación (°C)	50 - 100	25 - 50	120
Principales aplicaciones	AQS, calefacción ambiental	Piscinas, calefacción ambiental, pré-AQS	AQS, calefacción ambiental, refrigeración solar, proceso industrial
Producción de energía (kWh/m <sup>3</sup> )	400 - 600	300 - 350	480 - 650
Coste de operación (€/m <sup>2</sup> )	370	220	880

El colector solar térmico es el componente que convierte la irradiación solar en energía térmica útil y está compuesto por una cubierta de vidrio que tiene la función de producir el efecto invernadero, reducir las pérdidas térmicas por convección y asignar al conjunto la durabilidad necesaria y la protección de las intemperies. La configuración típica del colector solar plano con cubierta incluye una placa de absorción, constituida por la placa asociada a un

conjunto de tuberías, que tiene la función de absorber la radiación en calor útil y transmitirla al fluido de circulación. En la parte posterior y en los laterales del conjunto, se incorpora un aislamiento térmico que tiene la función de limitar las pérdidas de energía térmica. La caja externa del colector, generalmente metálica, tiene la función de ensamblar todos los componentes, confiriendo resistencia mecánica en el transporte e instalación, durabilidad y fiabilidad en su funcionamiento y mantenimiento.

Los colectores solares planos con cobertura alcanzan temperaturas del orden de los 80 °C (Guerra, 2015), variando su rendimiento térmico entre 40 a 60% en este rango de temperaturas. Para aplicaciones donde son necesarias temperaturas superiores, típicamente hasta 120°C, esencialmente como sistema de precalentamiento (vapor, por ejemplo), deberán ser utilizados colectores planos dotados de una superficie de absorción selectiva y un buen aislamiento con configuración del tipo CPC o tubo de vacío. En la Figura 3 se puede observar un esquema con la configuración y los componentes de un colector solar plano.

Los colectores solares planos representan la mayor parte de las instalaciones de sistemas solares térmicos para edificios (Figura 13) en la preparación de agua caliente sanitaria (ACS). Permite un fácil almacenamiento de ACS en depósitos aislados en las instalaciones, son económicamente rentables e importantes para reducir la dependencia de la energía consumida derivada de combustibles fósiles.



**Figura 13 - Configuración tipo de un colector solar plano.** Fuente: LNEG



**Figura 14 - Colector solar plano con absorsor selectivo.** Fuente: LNEG

### **3.2 COLECTORES DE TUBO AL VACÍO (BAJA-MÉDIA TEMPERATURA)**

Este tipo de colector solar presenta una configuración técnica que posibilita alcanzar una temperatura de operación más elevada para el colector solar plano, entre los 130 a 150 ° C. Se compone de una rejilla de tubos de vacío transparente, ubicándose en el interior de cada conjunto el absorsor y la tubería con el fluido de transferencia de calor (agua o fluido térmico). La configuración del tubo reduce significativamente las pérdidas por conducción y convección, permitiendo un aumento del rendimiento térmico. La rejilla de tubos de calor está conectada a un distribuidor situado en la parte superior por donde circula el fluido de circulación, que se interconecta entre otros colectores en el sistema de calefacción.

Los colectores de tubo de vacío se distribuyen en dos clases, en función del proceso utilizado en la transferencia de energía térmica al fluido de circulación:

- ✓ Los sistemas de flujo directo: el fluido de circulación se mueve en los propios tubos de vacío, existiendo una conexión directa entre éstos y el distribuidor.
- ✓ Los sistemas de tubo de calor: utiliza un fluido secundario en circuito cerrado que a través del absorsor sigue el ciclo de transferencia térmica de evaporación-condensación a través del fluido de trabajo en el tubo distribuidor.
- ✓ Los colectores de tipo tubo de vacío pueden exhibir reflectores estacionarios que incrementan la radiación incidente en el absorsor y permiten un mejor rendimiento para la temperatura de proceso más elevada. Los colectores de tubo al vacío (Figura 15) se recomiendan cuando las condiciones climáticas son más exigentes (Silván and Silva, 2015).

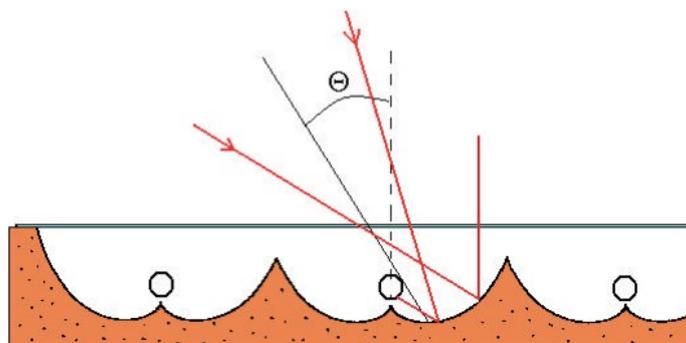


**Figura 15 - Colector de tubo de vacío.** (Fuente: LNEG).

### **3.3 COLECTORES CON CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO - CPC (BAJA-MEDIA TEMPERATURA)**

El modelo de colector solar concentrador parabólico compuesto (sigla CPC) es una tecnología intermedia entre el colector solar plano y el de tubo de vacío. El principio del colector solar CPC consiste en minimizar el área del absorbente en relación al área de apertura del colector a la radiación solar, reduciendo así las pérdidas de calor típicas de un colector plano, ya que éstas son proporcionales al área del absorbente.

Por otro lado, la configuración parabólica truncada del reflector permite la captación de la radiación solar dentro de un cierto ángulo de la abertura del colector, a través de múltiples reflexiones del recorrido óptico (Aiguasol, 2002). El diseño de cada modelo de colector CPC pasa por un proceso de investigación y optimización numérica (ray-tracing), según la disciplina de la óptica no productora de imagen (Winston et al., 2005). Esta configuración parabólica del reflector, está asociada a configuraciones constructivas de modelos de colectores planos (Figura 16) y de tubo de vacío (Figura 17).



**Figura 16 - Configuración parabólica truncada de reflector del colector tipo CPC.** (Winston et al., 2005).



**Figura 17 - Configuración del Reflector CPC aplicado en un colector de tubos de vacío.** (Fuente: CENTA).

El amplio ángulo de captación de este tipo de colector permite la captura de la irradiación directa y de parte de la irradiación difusa, dependiendo esta del ángulo de aceptación del CPC. Por otro lado, la baja concentración típica de estos sistemas permite su utilización de forma estacionaria, sin necesidad de utilización de sistemas de seguimiento (Figura 18).



**Figura 18 - Instalación de sistema solar colectivo con utilización de colector solar del tipo CPC, en la configuración de circulación forzada.** (Fuente: LNEG).

Las instalaciones solares térmicas exhiben diversas configuraciones tecnológicas cuyo rendimiento, materiales y durabilidad a las condiciones atmosféricas más severas, dependen fundamentalmente de la certificación de calidad de los colectores solares. Solar Keymark (ESTIF, 2016) es la primera marca de calidad reconocida internacionalmente según CEN / CELEC para los productos solares térmicos producidos de conformidad con los estándares europeos de gestión de la calidad y cumplen las normas EN 12975 y EN 12976. El Solar Keymark pretende reducir las barreras comerciales y promover el uso de productos solares térmicos de alta calidad en el mercado europeo siendo cada vez más reconocido como estándar de calidad en todo el mundo.

### 3.4 COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS (MEDIA TEMPERATURA)

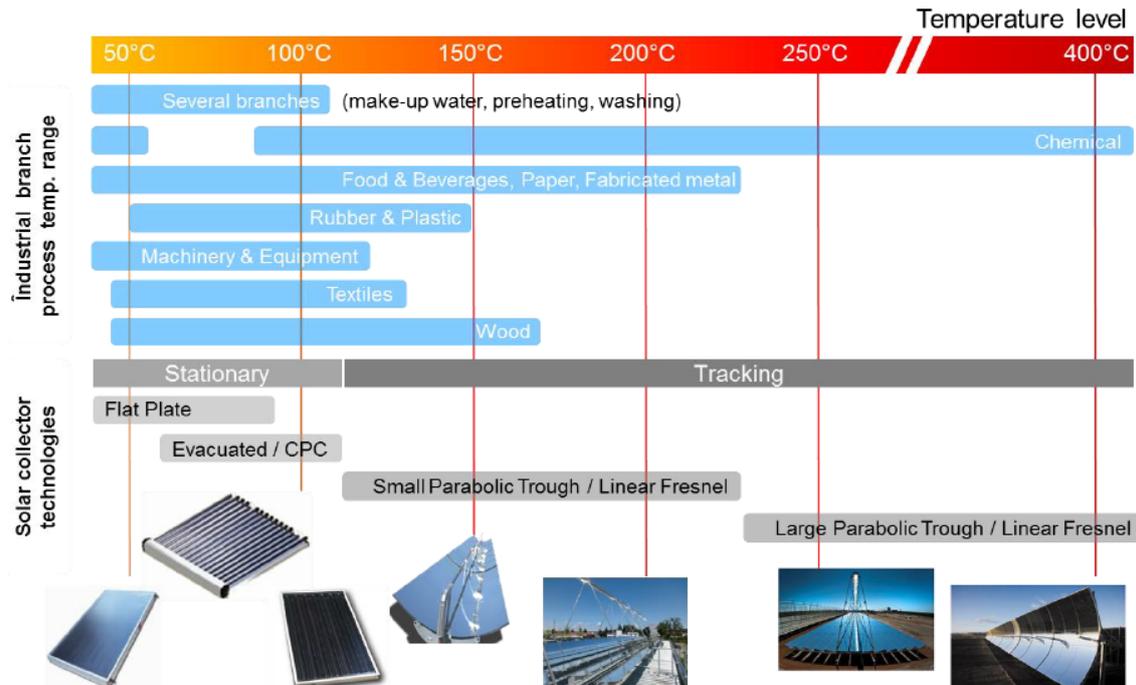
El desarrollo de tecnologías de concentración solar fue impulsado en los años 80 por la creación de centros productores de electricidad por vía solar (STE), estableciendo las bases tecnológicas para actividades de investigación y desarrollo de productos. Esta línea de innovación fue conducida por la tecnología de recolector concentrador parabólico (PTC) y, más recientemente, por el concepto de concentración con enfoque lineal, como la tecnología del tipo reflector lineal Fresnel (FL). El colector PTC utiliza eficientemente el componente directo de la radiación solar (DNI), pero no aprovecha la radiación solar difusa, haciendo uso del seguimiento solar en un eje o dos ejes.

El colector concentrador parabólico (PTC) es un sistema de concentración de foco lineal con seguimiento solar, cuya geometría permite la reflexión de cualquier rayo incidente paralelo al eje para converger en el foco de parábola. Dependiendo del sistema de absorción de radiación solar y del factor de concentración, puede ser adecuado para las bandas de media temperatura entre 100°C y 250°C. Permite el seguimiento en torno al eje longitudinal (donde está localizado el absorsor) y puede exhibir el acoplamiento de diversos tipos de absorsor con diversos fluidos térmicos de circulación (Horta, 2015).

El concentrador del tipo reflector lineal de Fresnel (LFR) es un sistema de concentración de foco lineal con seguimiento solar, cuya geometría está basada en el principio de Fresnel de división de la parábola en distintos segmentos desplazados del plano horizontal. En el LFR se utilizan múltiples espejos individuales en un sistema de seguimiento de un solo eje alrededor del eje longitudinal. Dependiendo del sistema de absorción de radiación solar y del factor de concentración, puede ser adecuado para las bandas de media temperatura entre 100°C y 250°C. Permite el seguimiento (tracking) alrededor del eje longitudinal y necesita un concentrador secundario ubicado en torno al absorsor para incrementar la eficiencia óptica del proceso.

La selección de la tecnología de concentración solar más adecuada depende de la temperatura de operación de las pérdidas térmicas del colector solar, directamente relacionada a la temperatura de las necesidades de calor y asociada a la estrategia de integración solar adoptada en la definición del layout del sistema: calor de proceso o nivel de abastecimiento (Muster, 2015).

Así, para definir las tecnologías más adecuadas a las condiciones operativas del proyecto térmico, se debe tener en cuenta el nivel de exigencia de temperatura de proceso en diferentes sectores industriales (Lauterbach et al., 2012), así como la gama más adecuada de temperaturas de operación de las diferentes tecnologías de colectores, conforme puede ser resumido en la Figura 19 (considerar como complemento la información referida en la Figura 2).



**Figura 19 - Tecnologías de colectores solares estacionarios y con seguimiento solar, en función de la temperatura de operación y de la gama de temperatura del proceso en diferentes sectores industriales.** (Horta, 2015)

Los concentradores cilindro parabólico presentan un bajo coeficiente de pérdidas térmicas, siendo particularmente adecuados para aplicaciones de alta temperatura. Las configuraciones tecnológicas de los colectores PTC (Figura 20) necesitan evaluar la importancia de las pérdidas ópticas y de las térmicas, ya que es inherente una interdependencia entre ambas. Así, se puede afirmar que, a partir de una eficiencia independiente de la temperatura límite (máxima) (representando sólo pérdidas ópticas), la eficiencia instantánea del colector se disminuye con el aumento de los niveles de temperatura operacional debido a la dependencia de la temperatura de las perdidas térmicas (Horta 2015).



**Figura 20 - Colectores cilindro parabólicos. (FLABEG, 2015).**

### 3.5 COLECTORES CON REFLECTORES LINEALES DE FRESNEL (MEDIA TEMPERATURA)

Los colectores del tipo reflectores lineales de Fresnel (Figura 21) poseen espejos planos o con ligera curvatura, seguidores del Sol en un solo eje, que concentran irradiación solar en uno o más tubos donde circula un fluido de trabajo que puede alcanzar temperaturas hasta 400 ° C. Este tipo de tecnología presenta un elevado potencial para su uso en diversos procesos térmicos (instalaciones industriales). Estos sistemas presentan menor rendimiento cuando se comparan con los colectores cilindro-parabólicos, pero presentan un menor costo de instalación por área (Häberle et al., 2014). Estos sistemas de concentración deben su nombre al esquema de montaje de los espejos, que siguen la óptica de Fresnel, donde, a partir de cierta distancia focal, cada parábola puede ser representada como una circunferencia, permitiendo posicionar los espejos de manera escalonada.

El sistema puede presentar un concentrador secundario envolviendo el tubo o los tubos receptores, contribuyendo a aumentar el rendimiento del sistema.



**Figura 21 - Tecnología Fresnel Linear.** (Fuente: LNEG).

Las principales ventajas de esta tecnología son (Silván and Silva, 2015):

- ✓ Menor coste en comparación con otras tecnologías de concentración solar.
- ✓ Estructura más simple, pues al contrario de los cilindros parabólicos, los espejos no soportan el tubo receptor.
- ✓ Tubo rectificador fijo.
- ✓ El absorbedor es libre en los extremos para permitir la expansión debido a altas temperaturas.
- ✓ La ubicación de los espejos planos cerca del suelo significa cargas mecánicas más

reducidas debido al viento.

- ✓ Mejor aprovechamiento de la superficie ocupada.

## **4 INTEGRACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR DE CONCENTRACIÓN EN LOS PROCESOS DE SECADO**

La elección de la tecnología de conversión de energía solar depende de la temperatura de funcionamiento y del fluido de transferencia de calor que se va a utilizar. Sin embargo, la definición del esquema de integración del sistema solar térmico y del suministro de calor solar en el proceso industrial (en este caso, en el proceso de secado) depende de las características individuales del proceso industrial implementado en una determinada instalación.

En general, una instalación solar industrial consiste en un campo de colectores solares a través del cual circula un fluido de transferencia de calor (agua, aceite térmico o sales fundidas) - el llamado circuito primario. Un sistema de regulación controla esta circulación de acuerdo con la intensidad de la radiación solar directa (DNI) disponible para obtener la temperatura de operación deseada. Por medio de un intercambiador de calor, la energía solar se puede utilizar para calentar líquidos, flujos de aire o para la generación de vapor. El acoplamiento del sistema solar con el sistema de calefacción convencional puede ser realizado en diversos puntos del sistema: acoplamiento directo a un proceso específico, precalentamiento de agua y generación de vapor en el sistema central.

En efecto, diferentes conceptos de integración son aplicables para la incorporación directa del calor solar en el proceso industrial o para la incorporación indirecta, a través de integración con el sistema de suministro de energía. Si la integración se realiza a nivel del sistema de suministro de energía, el medio de transferencia de calor y el correspondiente punto de integración llevan automáticamente a un posible concepto de integración. Por otro lado, si la integración se realiza directamente en el proceso industrial, el tipo de intercambiador de calor en combinación con su fuente de alimentación convencional es fundamental para el concepto de integración.

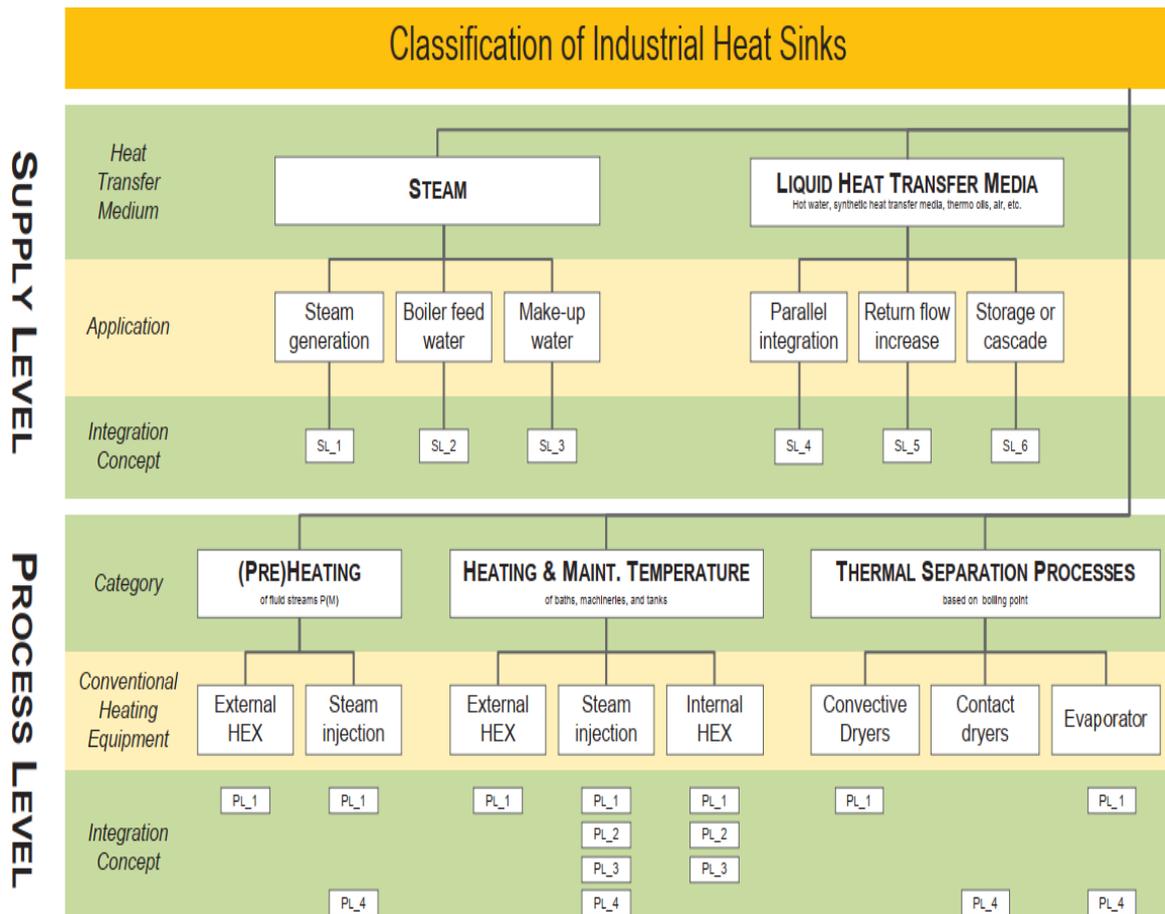
Diferentes conceptos de integración generalizada son presentados (Schmitt, 2016) a nivel del sistema de suministro de energía y del proceso, pudiendo ser atribuidos a diferentes tipos de consumidores industriales de calor. De acuerdo con la metodología definida en (Schmitt, 2016) es posible garantizar una rápida identificación del modo de integración más adecuado al uso de energía solar térmica para suministro de calor en un determinado proceso considerando las siguientes condiciones de encuadramiento:

- ✓ Distinción entre suministro de energía y nivel de proceso.
- ✓ Identificación del medio de transferencia de calor en el nivel de suministro.

- ✓ Identificación de la categoría de consumo de calor en el nivel del proceso.
- ✓ Identificación del modo de calentamiento convencional en el proceso.

Considerando estos cuatro puntos, los diferentes tipos de integración pueden ser clasificados y las diferentes formas de integración de calor solar pueden ser catalogadas en clases generales.

La Figura 22 esquematiza las diferentes posibilidades para la integración de calor producido por sistemas solares térmicos en procesos industriales, presentando los esquemas de integración generalizados definidos en (Schmitt, 2016).



**Figura 22 - Posibles modos de integración de energía solar térmica en procesos industriales.** (Schmitt, 2016).

Los esquemas de integración de energía solar aplicables a la integración directa de energía en los procesos de secado analizados en el marco del proyecto SECASOL (lodos de EDAR, lixiviados y RSU / CDR) se encuentran en la categoría "procesos de separación térmica", efectuándose una la distinción entre secadores de convección y de contacto -que cubren la mayoría de todas las tecnologías de secado de lodos y RSU / CDR presentadas anteriormente - y evaporadores - relevantes para la evaporación y concentración de lixiviados procedentes de

vertederos.

Con base en la relación entre el tipo de consumo de calor y la forma convencional de transferencia de energía térmica, diferentes sistemas de integración pueden ser aplicados para aprovechar el calor solar. En la Tabla 15 se presenta una nomenclatura uniformizada para describir los diversos esquemas de integración de energía solar resultantes de la aplicación de la metodología arriba mencionada.

**Tabla 15 - Resumen de los conceptos de integración de la energía térmica en procesos industriales.**  
(Schmitt, 2016).

Nivel de integración	Distinción	Concepto de integración de calor solar		
Nivel de suministro (Supply level)	HTF	Vapor <i>Steam</i> (S)	SL-1	integración paralela (directa o indirecta) de calor solar
			SL-2	Pre calentamiento del agua de alimentación de la caldera
			SL-3	Pre calentamiento del agua de alimentación (make-up)
		Líquido <i>Liquid</i> (L)	SL-4	integración paralela (directa o indirecta) de calor solar
			SL-5	<i>Solar return flow boost</i>
			PL-6	Calefacción solar de aire
Nivel de proceso (Process level)	Equipamientos convencionales de calefacción	Permutador externo (E)	PL-1	Calentamiento solar para calor de proceso
			PL-2	Calentamiento solar para equipamientos
		HEX Interno (I)	PL-3	Calentamiento solar con HEX interno
		Fornecimento de vapor (S)	PL-4	Suministro de vapor solar al vacío o a baja presión

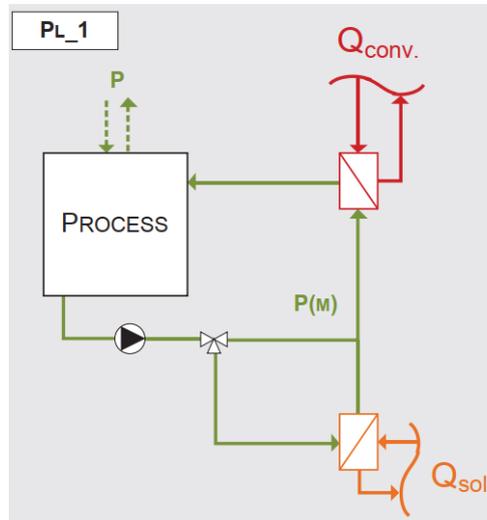
Como ejemplo de la aplicación de esta metodología y nomenclatura para la aplicación del secado solar con secadores del tipo convectivo, las configuraciones recomendables para la integración de energía solar a nivel del proceso podrían ser de los tipos: Nivel de Proceso (PL) - Intercambiador externo (E) - Calentamiento solar del producto (PL1) o sea PL-E-PL1 o Nivel de Proceso (PL) - Intercambiador externo (E) - calefacción solar con HEX interno (PL3) o sea PL-E-PL3, etc.

En las Figuras 24 y 25, "Qsol" significa calor obtenido por tecnología solar, y "Qconv" se refiere al calor producto de las tecnologías convencionales.

## 4.1 POSIBLES ESQUEMAS DE INTEGRACIÓN

**a) Integración a nivel del proceso con intercambiador de calor externo y calefacción de los fluidos de entrada (PL-E-PL1).**

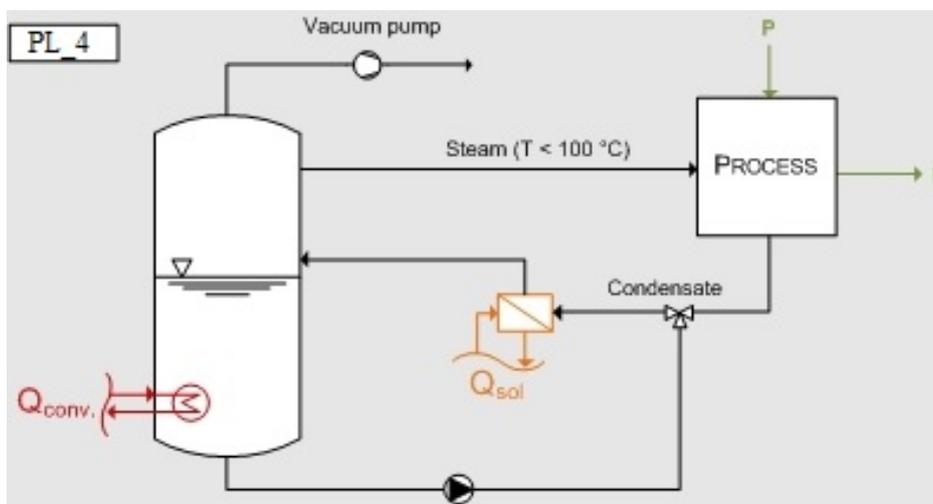
Este concepto de integración es uno de los más simples de alcanzar, utilizando un intercambiador de calor adicional, alimentado por energía solar e instalado en serie con el intercambiador de calor convencional, para el suministro de energía al proceso de secado. La Figura 23 presenta el correspondiente esquema de principio.



**Figura 23 - Esquema de un sistema de transferencia de calor con tecnología solar utilizando un intercambiador de calor externo.** (Schmitt, 2016).

**b) Integración a nivel del proceso con generación de vapor al vacío (PL-S-PL4).**

Otra posibilidad es la generación de vapor solar con vacío, puede ser aplicada en procesos de evaporación a temperaturas de 40 a 80 ° C. El esquema de flujo del proceso para este concepto de integración se presenta en la Figura 24.



**Figura 24 - Esquema de generación de calor solar al vacío** (Schmitt, 2016).

**c) Integración a nivel del proceso con generación de vapor a baja presión (PL-S-PL4)**

Para la producción de vapor solar con presión reducida de 1,5 a 3 bar (110-135 ° C) es

necesaria una caldera alimentada con calor procedente del sol. El agua de alimentación o condensado se introduce en la caldera, evaporada y se utiliza para calentar el proceso de secado. Por lo tanto, el consumo de vapor convencional para calefacción por inyección es reducido (Figura 25).

La única diferencia es el nivel de temperatura más bajo en comparación con los sistemas de vapor convencionales de la industria.

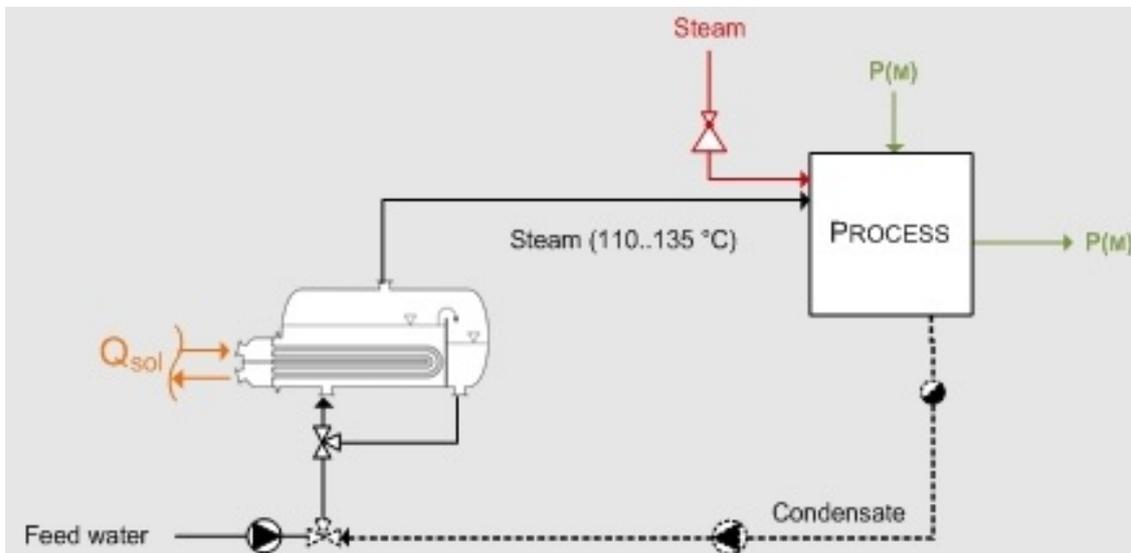


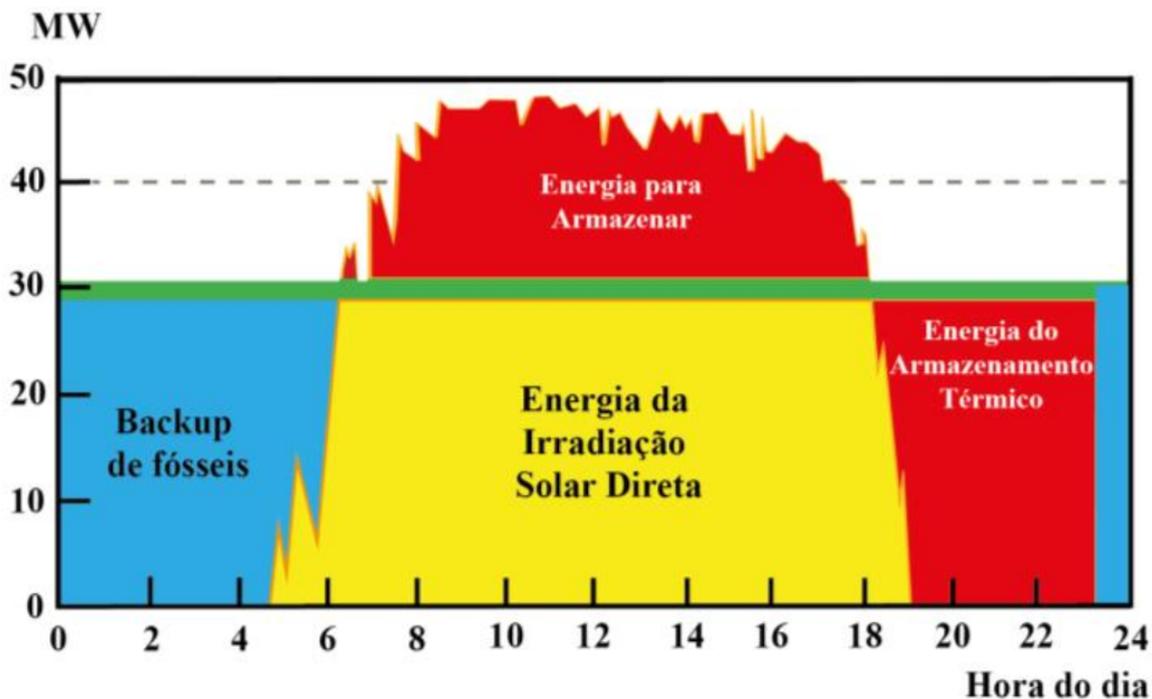
Figura 25 - Esquema del proceso de secado utilizando aceites térmicos (sintéticos) o vapor. (Schmitt, 2016).

### Almacenamiento de energía térmica

El almacenamiento de la energía solar térmica puede ser parte integrante del sistema solar, dependiendo de la cantidad de material a secar y de los parámetros considerados en la concepción del sistema solar y de su modo de operación.

Los sistemas de energía solar para generación de energía térmica pueden ser proyectados con o sin almacenamiento de la energía generada en el campo solar. La decisión de considerar el almacenamiento de la energía producida por la instalación solar depende de la relación entre la producción de energía solar y las necesidades térmicas del proceso industrial. Cuando el consumo de energía del proceso es mucho mayor que la producción solar, el almacenamiento puede ser eliminado y la energía solar puede alimentar directamente el proceso o el sistema existente de producción de calor.

Incluir sistemas de almacenamiento de calor junto con las tecnologías de concentración solar permite que el sistema siga trabajando en la ausencia parcial o total de irradiación solar. A título ilustrativo, la Figura 26 muestra el comportamiento de la energía producida y almacenada en una central solar termoeléctrica de 50MW dotada de un sistema de almacenamiento de energía térmica



**Figura 26 - Comportamiento de la energía en un sistema CSP utilizando almacenamiento térmico.** Adaptado de (Ginley and Parilla, 2013).

Actualmente, el almacenamiento térmico de energía se realiza mediante un método de retención de calor sensible, en tanques con un fluido de almacenamiento de energía (agua, aceite térmico o sólidos fundidos) o módulos de cerámica, por ejemplo.

El calor almacenado puede ser utilizado siempre que la irradiación solar disminuya - sea durante la noche o debido a la nebulosidad - permitiendo un suministro estable de energía en alturas con menor disponibilidad del recurso solar.

## **5 CONCLUSIONES**

En este informe se presenta el encuadramiento temático del proyecto SECASOL que busca la promoción de tecnologías innovadoras en la mejora de la eficiencia de los procesos de secado de lodos de desagüe y secado de residuos sólidos urbanos con recurso a tecnologías solares en el espacio transfronterizo de Andalucía-Algarve-Alentejo.

Teniendo en cuenta las principales conclusiones presentadas en el documento Potencial de aplicación de la energía solar térmica de concentración - (PP1), el objetivo del presente trabajo es identificar y presentar información fundamental relativa a las posibles soluciones técnicas de secado con recurso a la energía solar térmica de concentración procesos de depuración de aguas residuales y de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

Para ello se identificaron y analizaron los problemas derivados de los procesos de secado de lodos en los sectores de Tratamiento de Aguas Residuales y de Secado de Residuos Sólidos Urbanos, evaluando la viabilidad técnica en la implementación de tecnologías solares de concentración en procesos industriales, teniendo como base la actual estructura de los procesos de secado. También se identificaron las diferentes tecnologías y tipologías de secado teniendo en cuenta los criterios de transferencia de calor y masa, las tasas de secado, la influencia y eficiencia de los diferentes sistemas de secado y los requisitos del producto final, considerando su valorización.

También se presentan los sistemas de secado más adecuados en la integración de la energía solar térmica, abordado el marco legal relativo a las condiciones de valorización de residuos en las regiones en objeto de estudio. En adición, se presentaron las diferentes tecnologías de concentración solar térmica y se abordó su integración en los procesos industriales de secado teniendo en cuenta diferentes aspectos operativos, en particular: la temperatura de operación, el tipo de fluido de transferencia de calor a utilizar, las diferentes posibilidades de integración del componente térmico de acuerdo con los sistemas utilizados y presentadas las soluciones consideradas más convenientes.

A pesar de que los procesos de tratamiento presentan características estructurales y condiciones operativas diferentes y que los productos finales presentan características distintas, se puede concluir que la utilización de sistemas de energía solar térmica de concentración en el secado de estos residuos no está condicionada por estos aspectos.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Aguilar, H.A., González, J.H., Gallegos, J., Valencia, M., 2012. Physico-chemical treatment of type III leachates from a landfill in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Mexico. *Environ. Eng.* 4, 372–382.
- ✓ Aiguasol, 2002. POSHIP- The Potential of Solar Heat in Industrial Processes.
- ✓ Airton, K., Peralta-Zamora, P., Gomes de Moraes, S., Durán, N., 2002. Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis. *Quim. Nova* 25. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100014>
- ✓ APA, 2014. Gestão de Lamas de Estações de Tratamento de Águas Residuais Urbanas (2010-2013). Agência Portuguesa do Ambiente, Portugal.
- ✓ Babuponnusami, A., Muthukumar, K., 2014. A Review on Fenton and Improvements to the Fenton Process for Wastewater Treatment. *J. Environ. Chem. Eng.* 2, 557–572.
- ✓ Bennamoun, L., 2012. Solar Drying and Wastewater Sludge: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 1061–1073.
- ✓ Bennamoun, L., Arlabosse, P., 2013. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 28, 29–43.
- ✓ Bennamoun, L., Arlabosse, P., Léonard, A., 2013. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 28, 29–43.
- ✓ Chai, L.H., 1997. Statistical dynamic fetures of sludge drying systems. *Int. J. Therm. Sci.* 46, 802–811. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.011>
- ✓ Chemical Process Engineers, n.d. ANALYSE & OPTIMISE YOUR DRYING SYSTEM TO REDUCE DRYING COST FOR [WWW Document]. URL <https://www.chemiprocess.com/service/design-drying-systems/>
- ✓ Chen, G., Yue, P., Mujumdar, A., 2002. Sludge dewatering and drying. *Dry. Technol.* 20, 883–916. <https://doi.org/https://doi.org/10.1081/DRT-120003768>
- ✓ Crema, L., Horta, P., 2014. Scientific and Technological Alliance for Report on suitable Process heat and / or CHP systems for specific industries and integration guidelines.
- ✓ David, A.C., 2002. Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio. <https://doi.org/10.11606/D.3.2002.tde-30042003-131628>

- ✓ Davis, R., 2002. Draft Guide to the use of thermally dried sludge products.
- ✓ De Castro, J., 2002. Secado térmico de fangos.
- ✓ Ebrahiem, E., Al-Maghrabi, M.N., Mobarki, A.R., 2017. Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology. Arab. J. Chem. 10, 1674–1679.
- ✓ Escosteguy, P.A. V, Cerini, J.B., Gobbi, D., Gobi, D., Cecconello, C.M., 2008. Extração de nutrientes por macrófitas cultivadas com lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos. Rev. Bras. Cienc. do Solo 32, 853–860. <https://doi.org/10.1109/DEXA.2000.875035>
- ✓ ESTIF, 2016. Solar Thermal Markets in Europe. Trends and Market Statistics 2015.
- ✓ FLABEG, 2015. The new mirror is designed for parabolic trough collectors like the Ultimate trough.
- ✓ Flaga, A., 2003. Sludge drying.
- ✓ Galdós Aller, J., 2001. Secado térmico y cogeneración: Perspectivas.
- ✓ Garcia, J., Pássaro, J., Rosado, R., Coelho, L., Ley, M., Rodrigues, J., Madureira, P., 2018. DryEcoMate – An horticultural dehydrator , using solar thermal and photovoltaic energy , low cost production , modular and portable 22–24.
- ✓ GEA, n.d. Flash Dryer - Process Flow Diagram [WWW Document]. URL <https://www.gea.com/en/products/flash-dryer.jsp> (accessed 2.22.19).
- ✓ Ginley, D.S., Parilla, P.A., 2013. Solar Energy: A Common-Sense Vision. Front. Energy Res. 1, 1–5. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2013.00003>
- ✓ GLENRO, n.d. Through Air Dryers & Ovens [WWW Document]. URL <http://www.glenro.com/engdryers-through.html> (accessed 2.22.19).
- ✓ González Rodríguez, J.L., 2001. Plantas de secado térmico de lodos de depuradora (EDAR). Rev. técnica medio Ambient. 14, 37–44.
- ✓ Guerra, J.J., 2015. Energía solar de la edificación.
- ✓ Häberle, A., Scherer, S., Berger, M., Farian, J., 2014. Fresnel CSP Technology – State of the Art and Market Overview.
- ✓ Haque, A., Hasan, M., Shibly, M., Hasan, M., Rashid, M., Huque, S., 2019. Design , Development and Performance Analysis of Photo Voltaic Powered Solar Dryer. Adv. Res.

Text. Eng. 0–4.

- ✓ HelioCSP, 2017. Concentrated Solar Power Thermal for Biosolid Drying [WWW Document].
- ✓ Horta, P., 2015. Process Heat Collectors: State of the Art and available medium temperature collectors.
- ✓ HUBER Technology, 2001. Secagem solar e regenerativa KULT SRT.
- ✓ IST Anlagenbau GmbH, 1994. Drying Principles [WWW Document]. URL <http://www.wendewolf.com/klssystem.php?lang=en> (accessed 2.26.19).
- ✓ IWA, 2000. Constructed Wetlands for Pollution Control – Processes, Performance, Design and Operation.
- ✓ Junta de Andalucía, 2018. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, Número 156. España.
- ✓ Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K., 2012. The potential of solar heat for industrial processes in Germany. Kassel University.
- ✓ LNEG, 2016. Configurações técnicas dos coletores solares a água.
- ✓ Loureiro, D., Martins, M.J., Santos, J.A., Nogueira, A., Pestana, L., Costa, C., Ramalho, Á., 2008. Towards a competitive use of solar driers A case study for the lumber industry 1–8.
- ✓ Maldonado, M., 2005. Heliantis, una solución energéticamente aceptable para el secado de fangos. DYNA.
- ✓ Mantilla, V., Miranda, M., di Berardino, S., Loureiro, D., Cardoso, J., Dias, I., Lobo, G., Martins, A., González, E., Pérez, S., 2018. Potencial de aplicação da energia solar térmica de concentração aos processos de depuração de águas residuais e de tratamento de resíduos sólidos urbanos. Lisboa.
- ✓ MAOT, 2014. Plano Estratégico Para os Resíduos Urbanos. Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território, Portugal.
- ✓ MAOTDR, 2007. Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos II (Portaria n.º187/2007). Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território e Desenvolvimento Rural, Portugal.
- ✓ MAOTDREI, 2009. Estratégia para os Combustíveis Derivados de Resíduos CDR. Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional, Portugal.
- ✓ Mathioudakis, V.L., Kapagiannidis, A.G., Athanasoulia, E., Paltzoglou, A.D., Melidis, P.,

Aivasidis, A., 2013. Sewage Sludge Solar Drying: Experiences from the First Pilot-Scale Application in Greece. *Dry. Technol.* 31, 519–526. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/07373937.2012.744998>

- ✓ Melidis, P., Gikas, G.D., Akratos, C.S., Tsihrintzis, V.A., 2010. Dewatering of primary settled urban sludge in a vertical flow wetland. *Desalination* 250, 395–398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.063>
- ✓ Mendes, J.A.F., 2003. Secagem térmica de lamas de ETAR”, Comunicação apresentada no Encontro Gestão e Valorização de Lamas de ETA e ETAR em Portugal, in: Forum Lisboa (27-28 Junho). Lisboa, p. 13.
- ✓ Muller, J., Thermo-System, n.d. Solar Drying of Sludge - The world ' s Number 1 in solar drying.
- ✓ Murthy and Joshi, 2007. Concept of fluidized bed drying.
- ✓ Muster, B., 2015. Integration Guideline, IEA TASK 49.
- ✓ NPTEL, n.d. Module 4: Design of Dryers [WWW Document]. URL <https://nptel.ac.in/courses/103103027/module4/lec2/4.html> (accessed 2.22.19).
- ✓ Perdices, V., 1999. Alternativas de tratamiento y disposición final de lodos y grasas de las estaciones depuradoras de aguas residuales de la Comunidad de Madrid.
- ✓ Permuy Vila, D., 2002. El secado térmico de fangos.
- ✓ Pharmawiki, n.d. Tray Dryer Working Principle – Tray Dryers Theory Manufacturer – Best Pharmaceutical Equipment [WWW Document]. URL <https://pharmawiki.in/tray-dryer-working-principle-tray-dryers-theory-manufacturer-best-pharmaceutical-equipment/> (accessed 2.22.19).
- ✓ Pueyo, J.M., Jurado, J.L., Cazorra, T., 1999. Secado térmico de fangos de estación depuradora de aguas residuales características de las principales tecnologías aplicadas. *Tecnol. del agua* 184, 31–37.
- ✓ Schmitt, B., 2016. Classification of Industrial Heat Consumers for Integration of Solar Heat. *Energy Procedia* 91, 650–660. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.225>
- ✓ Silván, Á., Silva, M.A., 2015. Análisis de viabilidad de la integración de energía solar térmica en procesos de secado de lodos para la obtención de biomasa. Universidad de Sevilla.

- ✓ Solarkeymark, 2019. The Solar Keymark Database - Collector Certificates [WWW Document]. URL <http://www.solarkeymark.dk/CollectorCertificates> (accessed 2.8.19).
- ✓ Sosnik, A., Seremeta, K.P., 2015. Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers. *Adv. Colloid Interface Sci.* 223, 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.05.003>
- ✓ STAGE-STE, 2015. Medium Temperature Solar Collectors Database [WWW Document]. URL <http://stage-ste.psa.es/keydocuments/solarthermalcollectors.php> (accessed 2.8.19).
- ✓ TN-ORIENT, n.d. Rotary drum dryer [WWW Document]. URL [https://www.alibaba.com/product-detail/Food-dryer-rotary-dryer-rotary-drum\\_60512870695.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Food-dryer-rotary-dryer-rotary-drum_60512870695.html)
- ✓ United States Environmental Protection Agency, 2000. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters.
- ✓ Werther, J., Ogada, T., 1999. Sewage sludge combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.* 25, 55–116.
- ✓ Winston, R., Miñano, J.C., Benítez, P., 2005. NONIMAGIN OPTICS. ELSEVIER Academic Press.

### 3. ANEXOS

#### 3.1. ANEXO I - EJEMPLOS DE SECADORES COMERCIALES

En este anexo se muestra un resumen de los principales fabricantes de secadores que pueden utilizarse en el secado térmico de los lodos de EDAR y en el secado de los productos resultantes del tratamiento de residuos domésticos.

La información ha sido obtenida de website de los fabricantes, por lo tanto, los datos y las características de cada secador y tecnología son de responsabilidad del mismo.

Las tecnologías para el secado de residuos son variadas y amplias. En la Tabla A se resumen los datos de secado comercial localizados clasificados en función del tipo de transmisión de energía utilizada.

**Tabla A. Lista de fabricantes de secadores**

MARCA	DIRECTO	INDIRECTO	BANDA	ROTATIVO	SOLAR
VEOLIA	x		x		
SUEZ	x	x	x	x	
ANDRITZ		x		x	
THERMO-SYSTEM					x
SCOLARISL	x		x		
INGETECSA	x	x	x		
VOMM	x	x	x	x	
THEILEN MASCHINENBAU GMBH	x		x		
APISA	x		x		
SCOLARI SL	x		x		
GMF-GOUDA	x	x	Turbina		
AQUALOGY SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR S.A	x		x		
WATERMARK	x		x		
EVOQUA	x		x		
ZHENGZHOU TAIDA	x			x	
PNHIX	x		x		
HENAN ZJN ENVIRONMENTAL SCI-TECH CO., LTD	x			x	
GRYPHON	x		x		
KOMLINE-SANDERSON PADDLE DRYING		x		x	
SMS		x		x	

#### A. VEOLIA

##### Tipo de secador: banda directa

BioCon™ utiliza un sistema innovador para depositar los lodos húmedos en forma de líneas

finas en la primera banda de secado. Este sistema garantiza un gran área superficial de exposición de los lodos al aire de secado mientras circula dentro del secador.

BioCon™ opera en un rango de temperatura de aire seco entre 120-170 ° C, siendo que en la primera gama las temperaturas varían entre los 80-100 ° C en la banda final. El tiempo de permanencia de los lodos dentro del secador es superior a 60 minutos, permitiendo así que estas estén de acuerdo con los requisitos de la Clase A relativa a la reducción de microorganismos patógenos de la Agencia de Protección de los Estados Unidos (US EPA).

- ✓ Se obtiene un lodo con materia seca superior al 90%.
- ✓ Operación segura debido a bajas temperaturas de secado, y una emisión mínima de polvo (proceso se acredita como NO ATEX).
- ✓ Flexible en términos de energía y fuente de calor utilizada.
- ✓ No hay emisión de olores al exterior durante el proceso de secado debido a la operación en depresión del circuito cerrado de secado del aire.
- ✓ Diseñado para funcionar de forma intermitente o continua.
- ✓ Bajo coste de operación y mantenimiento.
- ✓ Los lodos secos y granulados se obtienen de acuerdo con los requisitos de saneamiento de la Clase A de la EPA de los Estados Unidos (bio sólidos);
- ✓ Puede ser fácilmente combinado con el Sistema de Recuperación de Energía (BERS) y con el Sistema de Cambio de Energía (BEES).
- ✓ [http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/secado\\_termico/](http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/secado_termico/)  
Bosquejo y material audiovisual (<https://youtu.be/24Rjkiczz5U>)

[http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/secado\\_termico/](http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/secado_termico/)

**Material audiovisual** (<https://youtu.be/24Rjkiczz5U>)

## **B. SUEZ**

### **Tipo de secador: indirecto y directo, rotativo y banda.**

Desarrollado por el grupo francés Suez, que actúa principalmente en los sectores de tratamiento de aguas y gestión de residuos domésticos. Anteriormente, era una división operativa de Suez original, empresa que fue dividida en 2008, para permitir su fusión con la Gaz de France, creando la GDF Suez, actualmente Engie y Suez Environnement.

INNODRY® 2E es una combinación innovadora y patentada de tecnologías que combina las ventajas de los secadores directos e indirectos, con un rendimiento inigualable de eficiencia energética en un ambiente sin polvo.

INNODRY® 2E también está diseñado para garantizar los más altos estándares de seguridad operacional.

INNODRY® 2E utiliza dos etapas para el secado: la primera es el secado indirecto (evaporador de película fina) y la segunda es la tecnología de secado directo (secado de bandas). La conformación del lodo granular se obtiene después de la primera etapa, con el cortador, cuando el lodo aún está en la fase plástica, evitando así la formación de polvo.

Debido al sistema de recuperación de calor, parte del exceso de energía de la primera etapa se recupera para calentar la segunda etapa.

El producto final es el lodo seco en forma de gránulos, con un nivel de secado del 65% al 90%, de acuerdo con los requisitos. INNODRY® 2E produce un granulado con una densidad de hasta  $600\text{kg}/\text{m}^3$ , que es higiénico, biológicamente estable, libre de polvo y puede almacenarse indefinidamente. El tamaño de los gránulos puede adaptarse para adaptarse al uso final

**Fase 1: Evaporador de película fina.** El Evaporador de Película Fino (TFE) consiste en un cilindro, contra cuya pared interna el lodo se extiende, formando una fina capa bajo el efecto de la velocidad periférica del rotor central. Las láminas, ubicadas en el rotor central, extienden y empujan el fango de la entrada a la salida del TFE. Las paredes del TFE se calientan con aceite caliente o vapor. El secado del fango después del TFE es aproximadamente del 45%. El vapor extraído del TFE se utiliza para calentar el aire del secador de correa.

**Fase 2: Secador de banda.** Los gránulos formados en el cortador se depositan en el secador de correa a través de un transportador rotativo que distribuye los gránulos de una manera homogénea a lo largo de toda la anchura de la correa.

El progreso de la correa está regulado para asegurar que los gránulos no estén expuestos a ningún movimiento que pueda hacer que se froten, prácticamente evitando el polvo. La velocidad de la banda puede ajustarse para que coincida con el secado solicitado. El lodo se mantiene a una temperatura de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el secador de bandas, antes de ser refrigerado hasta una temperatura final de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El secador de bandas es dimensionado para adaptarse al nivel de sólidos secos necesarios en su salida (65 a 90%). El secador de bandas opera con una presión ligeramente negativa, lo que evita la emisión de olores, y su operación puede ser verificada a través de innumerables puertas de acceso a lo largo de cada banda.

## Extrusión de lodos

En la salida del TFE, el lodo, aún en la fase plástica y maleable, cae directamente en el dispositivo de extrusión (cortador).

Se presiona a través de una rejilla perforada, que permite la creación de "espagueti", cuya longitud fluctúa de acuerdo con el contenido de fibra del fango o del producto. La extrusora se limpia regularmente con un sistema automático.

INNODRY® 2E establece nuevos estándares de seguridad para centrales de secado, ya que está diseñado para funcionar a temperaturas por debajo de 110 ° C, en un ambiente libre de polvo. En consecuencia, no hay riesgo de ignición y explosión de gránulos. La combinación de estos dos factores permite una operación completamente segura de la central.

<https://www.suezwatertechnologies.com/products/biosolids/dryers>

<https://www.suez.es/es-ES>

Two Stage Dewatering and Drying – INNODRY 2E – Energy recovery

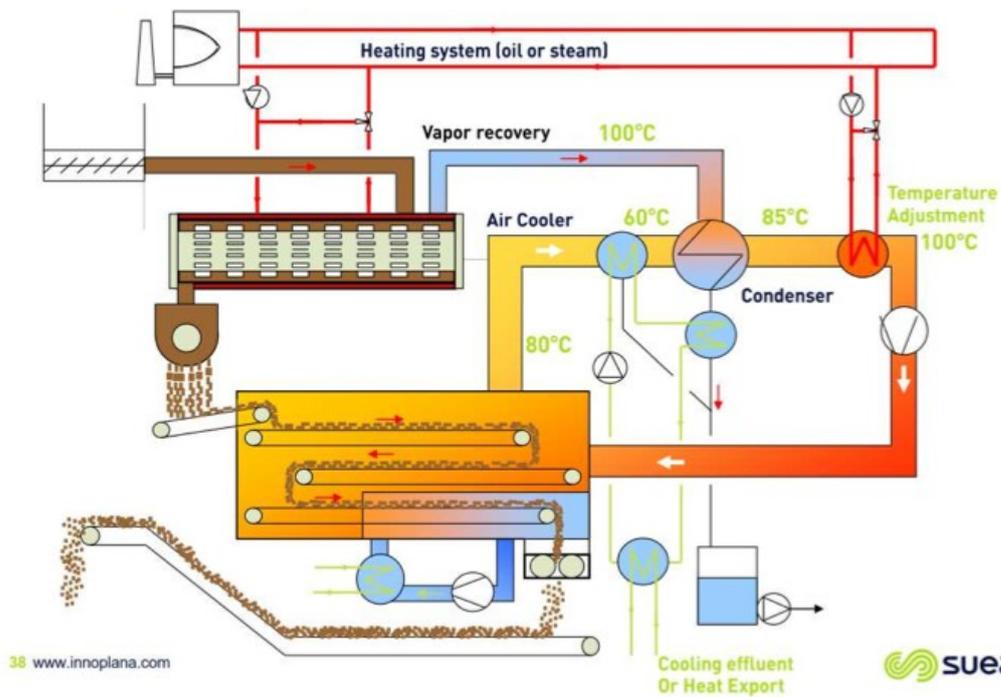


Figura A. Two Stage Dewatering and Drying

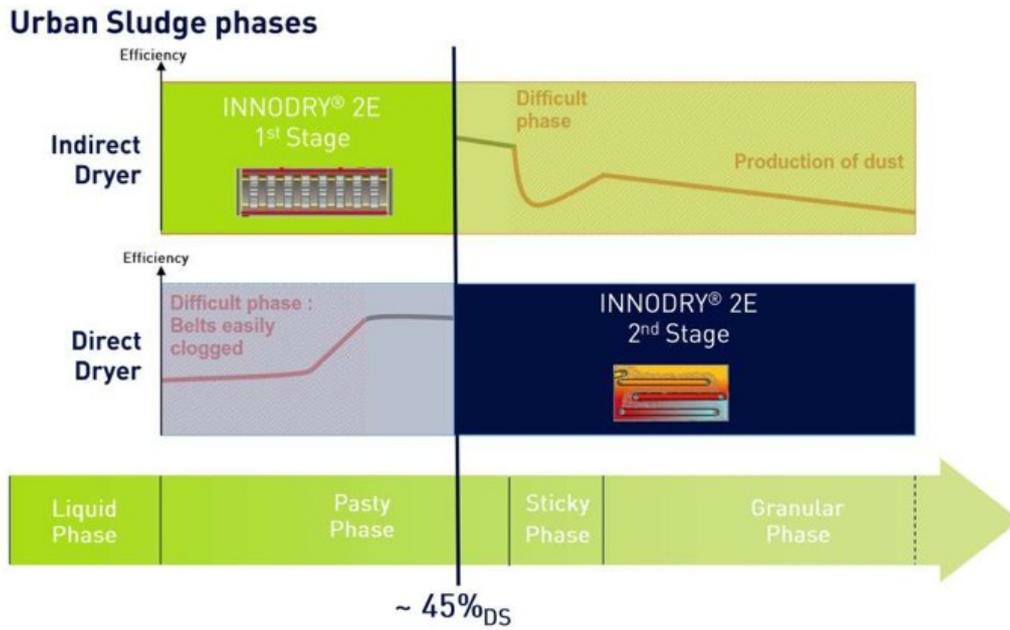


Figura B. Energy Savings Potential

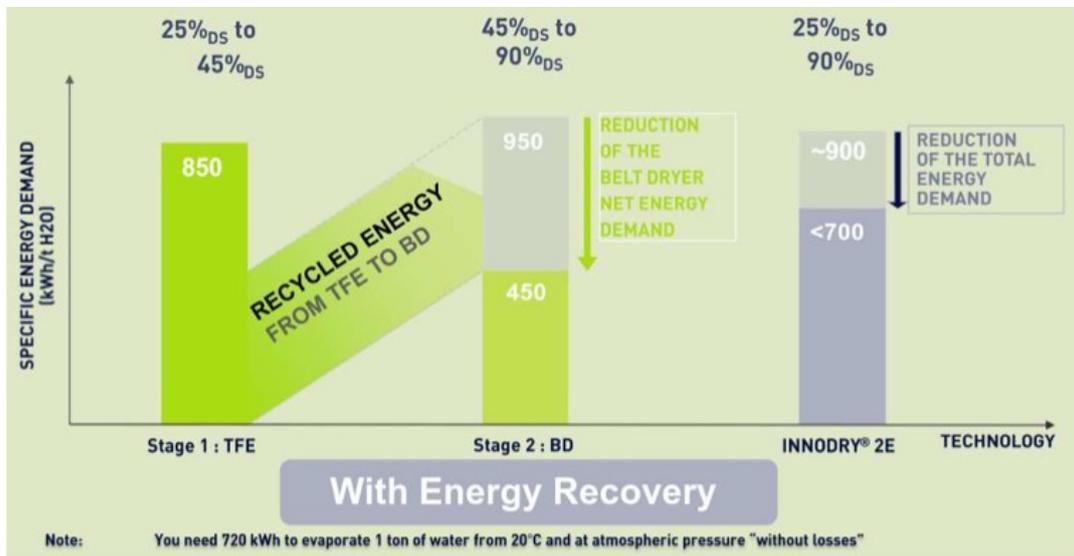


Figura C. Energy Savings Potential with Energy Recovery

### C. ANDRITZ

#### Tipo de secador: láminas rotativas indirectas

La transmisión térmica continua indirecta ocurre dentro del secador de lámina.

- ✓ Alta eficiencia térmica.
- ✓ Tambor giratorio MPS especial (sistema de paso múltiple).
- ✓ Contenido de humedad de salida controlada debido al diseño interno del tambor

específico.

- ✓ Tiempo de secado flexible para material ligero y pesado.
- ✓ Amplia experiencia.

**Material audiovisual:**

<https://www.andritz.com/products-en/group/separation/belt-drum-fluid-bed-dryers/drum-dryer-vdb>  
[http://www.andritzgouda.com/es/index.php/proceslijn/Sludge\\_treatment\\_process/](http://www.andritzgouda.com/es/index.php/proceslijn/Sludge_treatment_process/)  
[http://www.andritzgouda.com/uploads/docs/ANDRITZ\\_Gouda\\_Paddle\\_brochure\\_def\\_mail.pdf](http://www.andritzgouda.com/uploads/docs/ANDRITZ_Gouda_Paddle_brochure_def_mail.pdf)

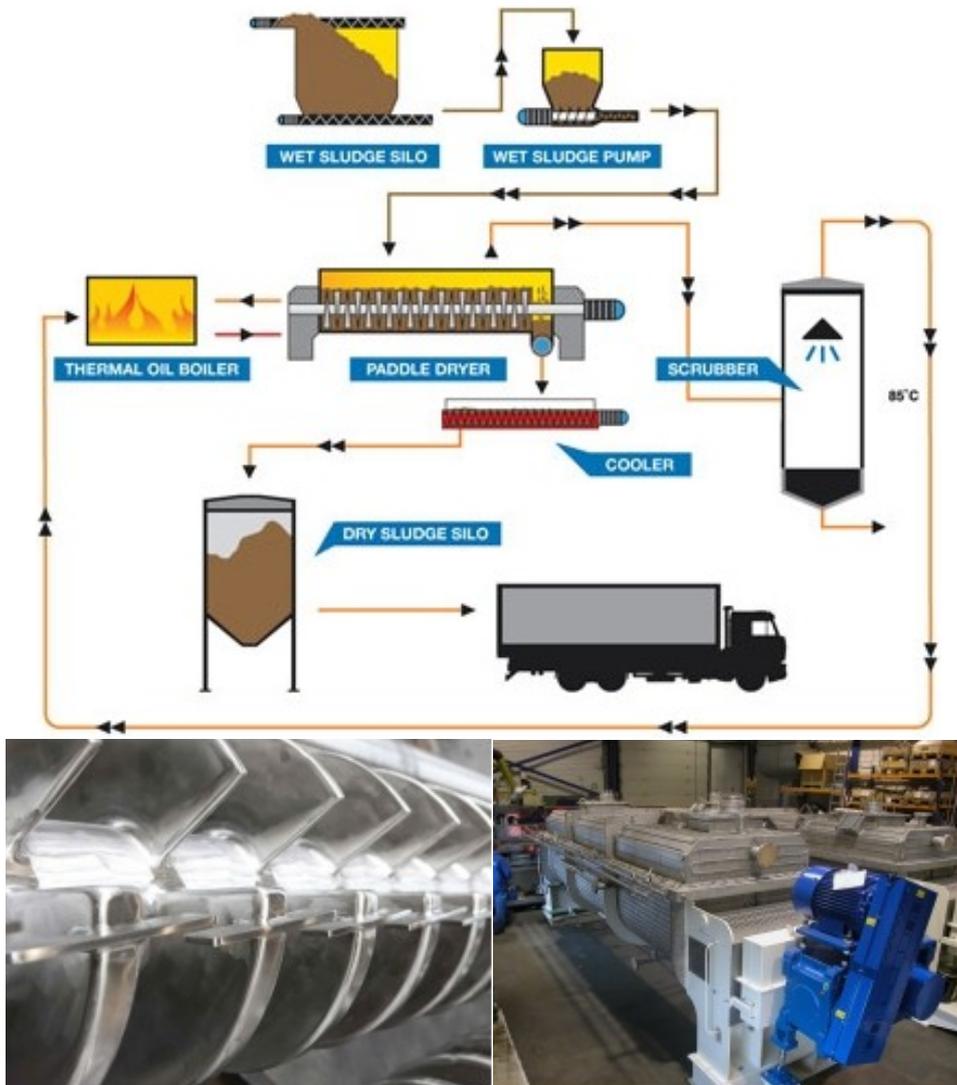


Figura D. Secador/refrigerador de eje de cuchilla doble

**D. THERMO-SYSTEM**

**Tipo de secador: invernadero solar con técnica mixta**

Necesidad de superficie disponible. Dependiendo de las condiciones del lugar, el clima, el

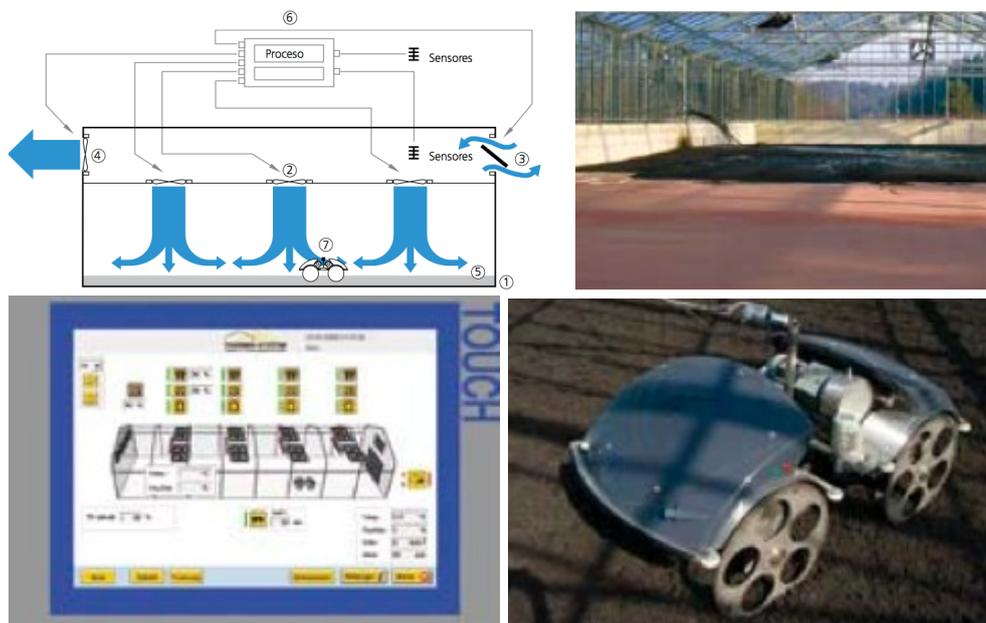
contenido de masa seca (MS) y las características del lodo pueden ser secos por  $m^2$  y sólo con operación solar (sin recuperación de calor residual) las siguientes cantidades anuales de lodo:

- ✓ Lodo deshidratado (25-30 % MS): 0,5-3  $t\text{lodo}/m^2$
- ✓ Consumo energético eléctrico: 20-30  $kWh/t$  de agua extraída
- ✓ Capacidad: 1000 a 600 000 habitantes

[www.thermo-system.com](http://www.thermo-system.com)

**Material audiovisual:**

[http://www.andritzgouda.com/es/index.php/proceslijn/Sludge\\_treatment\\_process/](http://www.andritzgouda.com/es/index.php/proceslijn/Sludge_treatment_process/)



**Figura E. Diagrama del proceso Thermo-System**

**E. APISA**

**Tipo de secador: Directo de banda**

Consiste en una banda continua formada por piezas de metal perforadas, encerradas en un túnel a través del cual el aire caliente es introducido. Los secadores pueden ser 1, 2 o 3 bandas superpuestas. Los usuales son secadores de dos pisos que ofrecen mayor eficiencia energética y una tasa muy baja de emisión de partículas sólidas en la atmósfera.

APISA posee un contrato de desarrollo tecnológico y comercialización, recíproco, con la empresa italiana SCOLARI SRL con amplia experiencia en el sector de secadores de bandas.

<https://www.apisa.info/>

## Material audiovisual

Ref. : [www.apisa.info/directorio\\_productos.php?id=9&idioma=es](http://www.apisa.info/directorio_productos.php?id=9&idioma=es)



**Figura F. Instalación de secado industrial (directo de banda)**

## F. SCOLARI SL

### Tipo de secador: Directo de banda

Sistema de secado de ciclo continuo o alterno, compuesto por 1 banda móvil, normalmente utilizada con aire de proceso a baja temperatura y para capacidades de evaporación pequeñas y medias. El material a secar se coloca por medio de embudo o banda de alimentación inclinada, en la banda de secado, formada por perfiles perforados, que permiten el paso del aire caliente del proceso.

El aire saturado de humedad se aspira y se evita a la atmósfera después de limpiar el polvo por un sistema de alto rendimiento. La velocidad de la banda y el tiempo de exposición del material pueden variar automáticamente dependiendo de la humedad programada para el producto. En el tramo final de la banda es posible tener una zona de enfriamiento.

Los secadores de banda - serie 1T BT - están diseñados y fabricados para permitir la recuperación de calor de las plantas de cogeneración. La serie 1T BT es adecuada para ser insertada tanto en líneas de gasificación donde la potencia térmica disponible puede ser muy limitada (100 kW) y en sistemas con alta potencia térmica (5MW).

Diseñada para recuperar y reutilizar energía térmica de agua caliente con baja temperatura. Ciclos con control automático de la humedad final

<https://www.scolarisrl.com/home-es/>

## Material audiovisual

Ref.: <https://www.scolarisrl.com/product-category/secaderos/version-1t-2/>

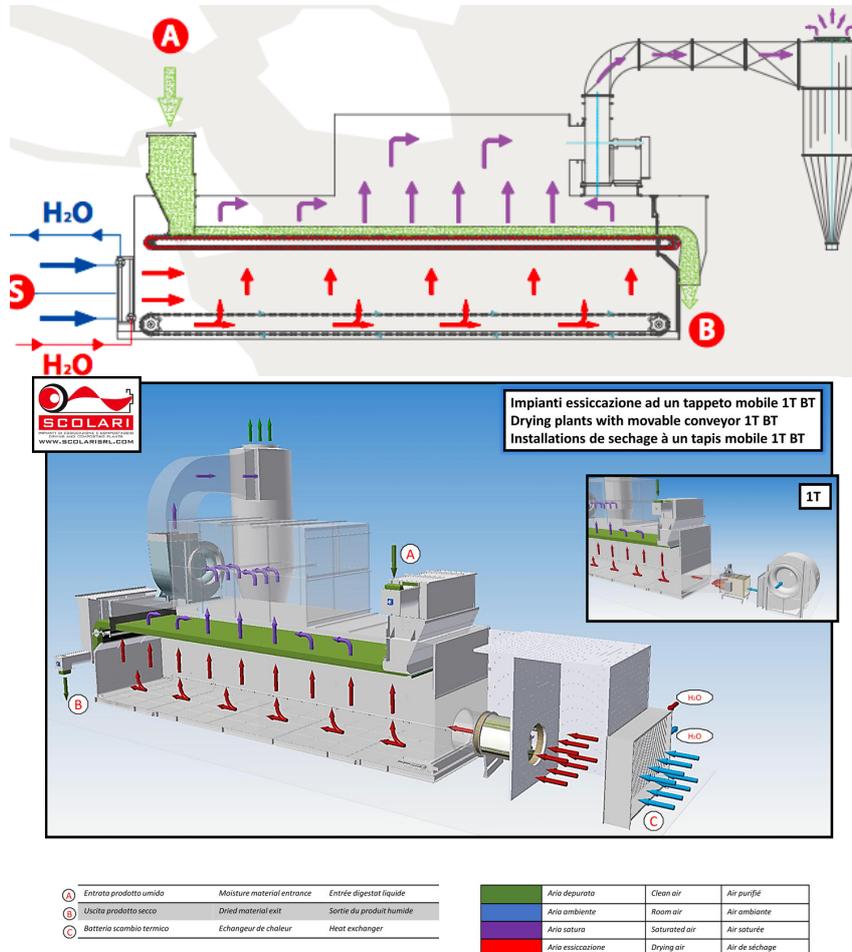


Figura G. Instalación de secado industrial (directo de banda)

## G. INGETECSA

Tipo de secador: Directo /indirecto de banda

Tipo de contribución de energía

- ✓ Calefacción indirecta: con vapor, agua caliente o aceite térmico, en el secador a través de intercambiadores de calor internos.
- ✓ Calefacción directa: con quemadores de combustible o gas natural, que proyectan la llama directamente en el módulo del secador.
- ✓ Calefacción indirecta o directa, desde el exterior: los intercambiadores o quemadores están

alojados en el exterior, posiblemente en un lugar no afectado por restricciones de seguridad.

#### Tipos de banda

- ✓ Banda de alambre inoxidable, guiada por corrientes.
- ✓ Banda de placas perforadas y articuladas, guiadas por corrientes.
- ✓ Banda de alambre sin cadenas.
- ✓ Banda de tejido metálico con cables autoguiados.
- ✓ Banda de placas flexibles, guiadas por corrientes.

<http://www.ingetecsa.com/es/empresa.html>

#### Material audiovisual

Ref.: [http://www.ingetecsa.com/files/Fichas/Secadero\\_de\\_banda.pdf](http://www.ingetecsa.com/files/Fichas/Secadero_de_banda.pdf)

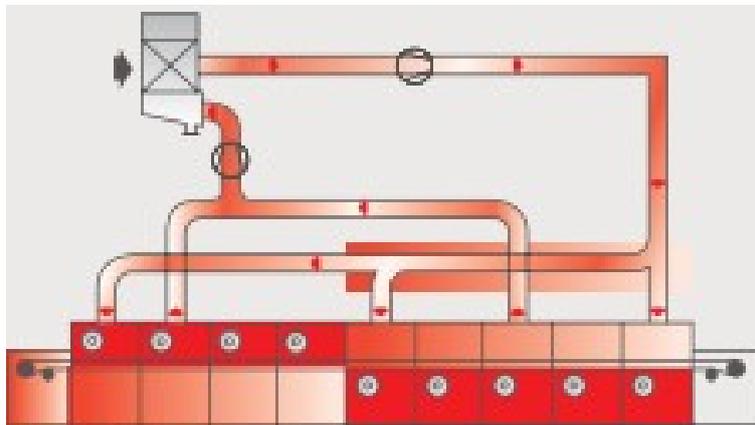


Figura H. Instalación de secado industrial (directo/indirecto de banda)

#### H. GMF-GOUDA

Andritz Gouda (Former GMF-Gouda) es un fabricante de equipos de secado. El Grupo Andritz adquirió Royal GMF-Gouda en octubre de 2012.

#### I. VOMM

##### **Tipo de secador: directo e indirecto de turbina**

En general, el sistema es operado en circuito cerrado, con una ligera depresión, diseñados para el tratamiento continuo de varios productos, tales como líquidos orgánicos e inorgánicos, diluidos o lodos concentrados, independientemente de la cantidad de agua

contenida y de la viscosidad.

La aplicación de la tecnología Turbo VoMM en el área del medio ambiente, proporciona un tratamiento térmico del producto con una combinación de intercambio de calor por conducción y convección, garantizando excelentes resultados en términos de eficiencia de energía y el tiempo de procesamiento para preservar la calidad y estabilidad del producto seco.

La fuente de calor puede ser una unidad dedicada (caldera de gas natural o biogás), o aprovechando el calor residual de los procesos industriales o equipo de producción de energía (motor de combustión interna, calderas, turbinas de gas, hornos, etc.).

El proceso de secado ocurre en una fase, sin la necesidad de mezclar el producto húmedo con el producto seco en la salida, para la remoción de la masa. Evitando el consumo caro de gases inertes y siempre de acuerdo con los estándares ATEX.

<http://www.vomm.it/copia-di-storia-1>

## **J. THEILEN MASCHINENBAU GMBH**

### **Tipo de secador: Directo de banda**

Durante décadas, los secadores de banda en el modo de recirculación de aire para el secado continuo de material a granel fueron la primera elección. El flujo de aire que actúa en la gran superficie de muchas partículas individuales es energéticamente eficiente y absorbe la humedad, y el aire húmedo dentro del secador.

El producto se distribuye en una cinta transportadora sin fin permeable al aire y se introduce el aire caliente. El aire de secado circula y satura a cada paso a través de la capa del producto. Una parte específica del aire de secado es reabastecida con aire fresco y al mismo tiempo se eliminan los vapores correspondientes. Para una eficiencia energética ideal, el aire de secado se dirige contra el flujo del producto.

En el caso de que sea necesario un tratamiento uniforme en toda la altura de la capa de producto, la dirección del aire cambia al menos una vez de arriba hacia abajo. A menudo se sigue una sección de enfriamiento. Aquí, el aire frío pasa de arriba hacia abajo a través del producto. El aire de escape calentado se puede utilizar para la sección de secado. En el caso de procesos operativos muy lentos, nuestros secadores de banda pueden ser proyectados como sistemas de varias bandas.



**Figura I. Instalación de secado industrial (directo de banda)**

<http://www.belt-dryer.com/EN/English.html#about>

## **K. SMS**

Tipo de secador: de película fina rotativa indirecta

El núcleo de la instalación es el secador horizontal de película fina. Dependiendo de la aplicación, la capacidad de evaporación por secador es de hasta 8 toneladas de agua por hora.

Las ventajas de este sistema son:

- ✓ Operación de 1 etapa que pasa la fase pegajosa o pastosa.
- ✓ Ninguna mezcla subsiguiente de producto seco.
- ✓ Cantidad mínima de gas de escape.

Todas estas ventajas hacen que los secadores de pulpa de película fina sean muy exitosos. Más de 100 máquinas están instaladas en todo el mundo.

La principal característica del secado por contacto es la transmisión directa de calor a través del contacto del producto con la superficie de calentamiento. Por lo tanto, el aire caliente no es necesario en el secado de contacto. Por lo tanto, el tratamiento del aire de escape es minimizado y no hay pérdida de energía con el aire saliendo del sistema. Nuestra cartera de productos incluye una amplia gama de secadores de contacto para aplicar las ventajas del secado de contacto en una amplia variedad de productos alimenticios:

### Principio de funcionamiento

Los secadores horizontales de película fina operan continuamente como secadores de contacto y se utilizan para una amplia gama de aplicaciones al vacío, presión atmosférica y bajo represión. Consisten en una cubierta calentada dispuesta horizontalmente con tapas de extremo y un rotor con láminas atornilladas. El producto mojado que se alimenta a través de la boquilla de entrada es captado por las paletas del rotor, aplicado en la pared caliente y transportado simultáneamente a la boquilla de salida en el extremo opuesto del cuerpo. Los

vapores generados se transmiten en la dirección opuesta al flujo del producto y dejan el secador cerca de la boquilla de alimentación. La capacidad de evaporación y transporte es adaptada por el arreglo correcto de las palas del rotor.

Las partículas retenidas en la zona seca se retiran en la zona húmeda. Se pueden alcanzar niveles de humedad inferiores al 1%. El tiempo de permanencia del producto es típicamente entre 5 y 15 minutos.

Los secadores horizontales de película fina también son adecuados para otras aplicaciones además del secado, como enfriamiento de partículas sólidas y fusión del producto.

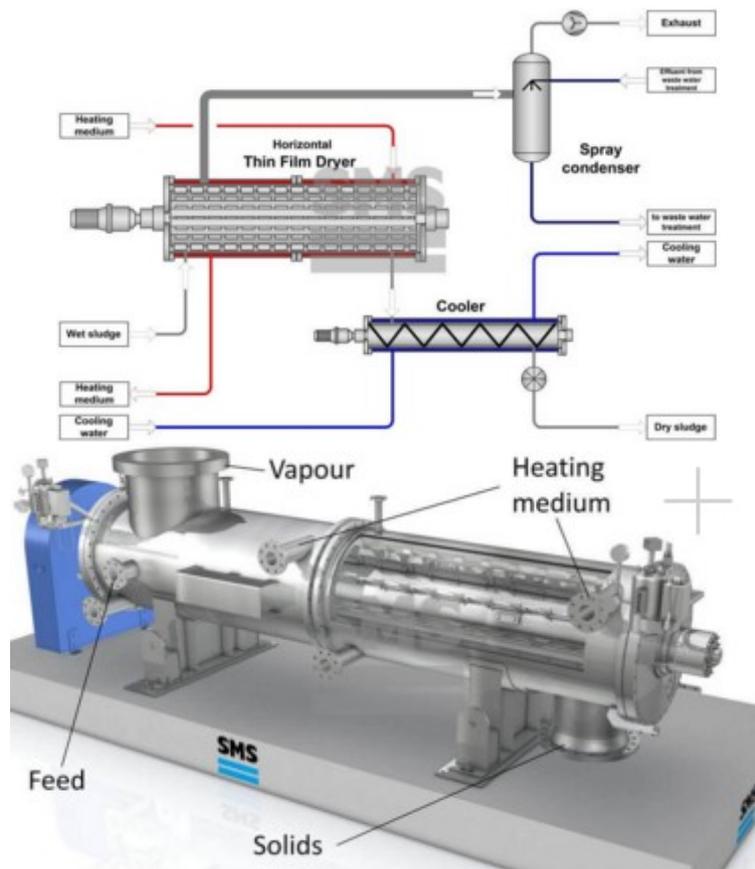


Figura J. Instalación de secado industrial (filme fino rotativo indirecto)

### Material audiovisual

<https://www.sms-vt.com/company/company-profile/>

### L. AQUALOGY SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR S.A

Tipo de secador: directo de banda

El sistema STC de secado térmico, utiliza aire caliente a baja temperatura, reduce la producción de lodos en un 70% y mejora las posibilidades de reutilización agrícola y la

recuperación de energía. La baja temperatura de trabajo, entre 65-80 °C, permite el uso de energía residual de otros procesos y el uso de la bomba de calor.

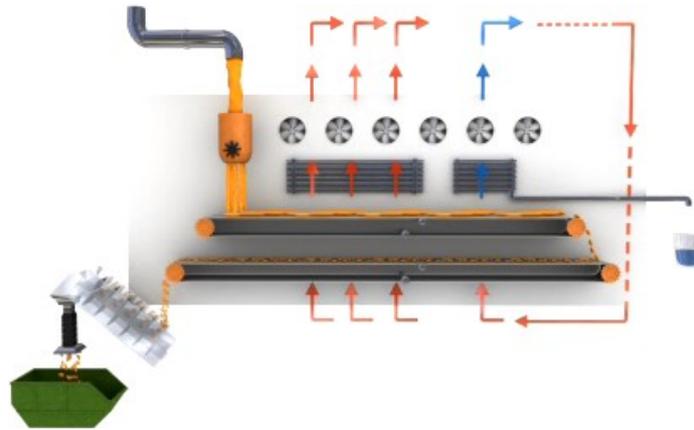


Figura J. Instalación de secado industrial (directo de banda)

[http://www.secadolodos.com/600000\\_es/Aqualogy-Sistemas-de-Transferencia-de-Calor/](http://www.secadolodos.com/600000_es/Aqualogy-Sistemas-de-Transferencia-de-Calor/)

## Material audiovisual

Ref.: <https://www.youtube.com/watch?v=P766eKVbzPQ>

## M. WATERMARK

Tipo de secador: Directo de banda

El secador de lodo continuo está diseñado para ser utilizado junto con un filtro de prensa. El área filtrante producida por la prensa de filtro se vierte en la tolva de recepción del secador de lodos (A). Los cepillos empujan el área del filtro a través de una superficie de acero inoxidable, disminuyendo el tamaño del material y configurándolo para aumentar el área de superficie y secar eficientemente (B, C).

A continuación, el material en forma de macarrones cae sobre una tira continua de malla de acero inoxidable, donde pasa bajo una serie de calentadores infrarrojos para secado (D). El calor es producido por gas natural o LP, mientras que el aire ambiente es expulsado a través de la cámara de calor por un ventilador montado en la entrada del lavador húmedo (E). Después de una reducción significativa, el material granular seco deja el secador en un recipiente para extracción.

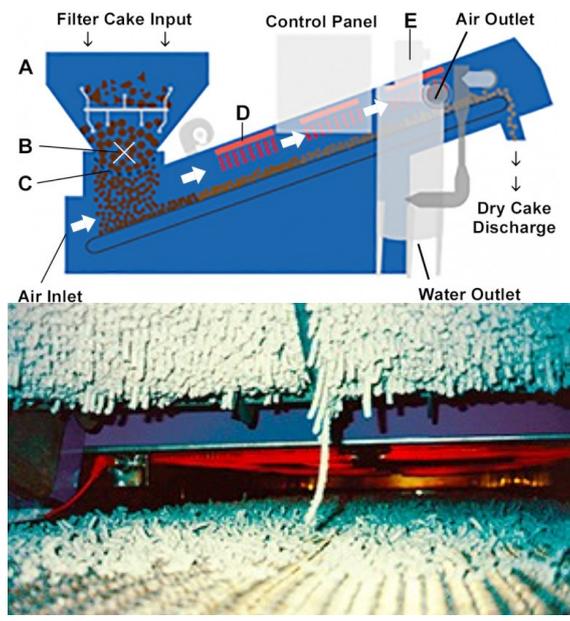


Figura L. Material granular seco

[http://www.mwwatermark.com/en\\_US/products/sludge-dewatering-equipment/](http://www.mwwatermark.com/en_US/products/sludge-dewatering-equipment/)

**Material audiovisual**

Ref.: <https://youtu.be/PDIggqYm1JA>

**N. EVOQUA**

Tipo de secador: Directo de banda

Con características semejantes al secador anterior.



Figura M. Instalación de secado industrial (directo de banda)

**Material audiovisual:** <http://www.evoqua.com/en/brands/JWI/Pages/j-mate-continuous-dryer.aspx>

## O. ZHENGZHOU TAIDA

Tipo de secador: Directo rotativo



Figura N. Instalación de secado industrial (directo rotativo)

## Material audiovisual

<http://www.drying-machine.org/>

## P. PNHIX

Tipo de secador: Directo de banda

Fabricante de bombas de calor

Material audiovisual

[http://www.phnix.com/products/info\\_2\\_itemid\\_195\\_cid\\_18\\_lcid\\_4.html?gclid=EAlaIQobChMIk5Lfu\\_2m3wIVikPTCh3DAQx-EAAYAiAAEgLvD\\_BwE](http://www.phnix.com/products/info_2_itemid_195_cid_18_lcid_4.html?gclid=EAlaIQobChMIk5Lfu_2m3wIVikPTCh3DAQx-EAAYAiAAEgLvD_BwE)

## Q. HENAN ZJN ENVIRONMENTAL SCI-TECH CO., LTD

Tipo de secador: Directo rotativo



Figura O. Instalación de secado industrial (directo rotativo)

*Material audiovisual*

<http://www.zjndrying.com/technology/show.php?lang=en&id=19&detail=ok>

## R. GRYPHON

Tipo de secador: Directo de banda

Gryphon es el secador más eficiente del mercado, simplemente porque:

- ✓ Secado por presión diferencial.
- ✓ Recirculación del flujo de aire para promover la estabilización y eliminar el uso del aire ambiente frío y húmedo.
- ✓ Precalentamiento del aire reciclado a través de tubos internos dentro del secador.

Gryphon Environmental, LLC ofrece tecnología de secado avanzada, consistente en un secador de banda continua que utiliza inyección de aire comprimido y vacío caliente para alcanzar la máxima eficiencia.

El resultado termodinámico es una rápida expansión del aire a medida que pasa por los residuos para promover la eliminación del agua por evaporación y un proceso llamado secado en flujo continuo. La eficiencia energética general permite que los clientes se sienten suspensiones a una fracción de los costos tradicionales. Con costos operativos y de capital más bajos, nuestra tecnología es la primera en generar retornos significativos de inversión, al tiempo que ofrece automatización avanzada y capacidad máxima para la expansión y flexibilidad de procesos.

Las unidades instaladas en Gryphon son los sistemas más eficientes disponibles, generalmente exigiendo menos de 2,1 MMBTU de energía térmica por tonelada de agua

captada. El análisis de terceros mostró una reducción del 45% en el costo en relación a las soluciones de secado anteriores.

Esto es posible con el uso de nuestro diseño diferencial de presión patentado.

Los diferenciales de presión desempeñan dos funciones principales en la conservación de la energía. El primero es permitir el calentamiento de la corriente de aire mientras el aire se condensó ligeramente. Por su naturaleza, el aire condensado obviamente tiene un ACFM menor (pies cúbicos reales por minuto). También es un poco más denso porque las moléculas están más cerca. Esto promueve una mejor transferencia de calor por quemadores de gas natural en línea.

En segundo lugar, y más importante, el aire caliente y condensado tiene una humedad relativa (RH) inferior al 1%. Esto es crucial, ya que es la humedad relativa del aire que se inyecta en los biosólidos para el secado y, naturalmente, absorber humedad.

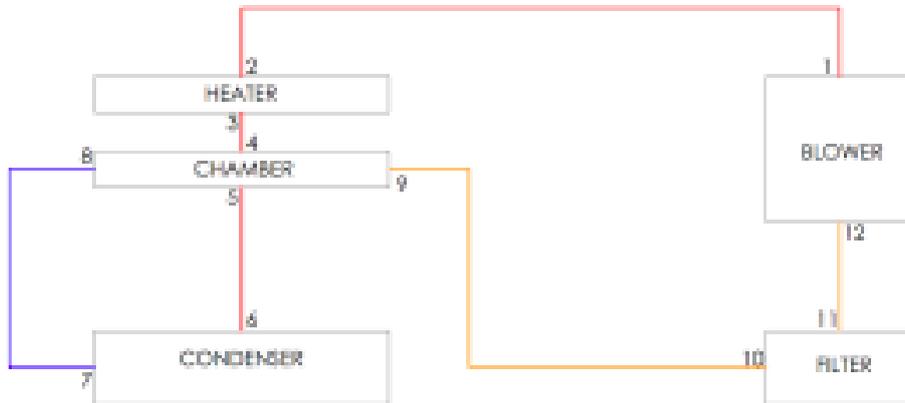


Figura P. Esquema deL principio de tecnología de secador (direto de banda)

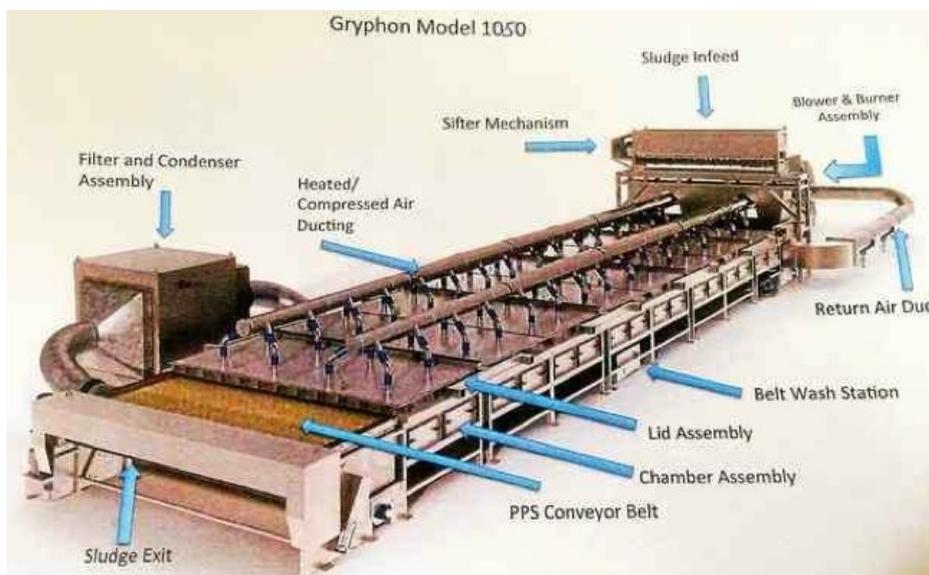


Figura Q. Primera instalación planeada en Pottstown, PA

**Material audiovisual:** <http://2gryphon.com/>

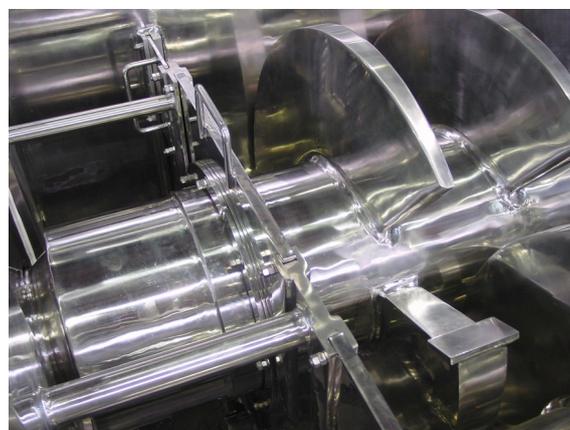
Ref.: <https://www.youtube.com/watch?v=6TB3Bn3h5nM>

## S. KOMLINE-SANDERSON PADDLE DRYING

Tipo de secador: Indirecto de tornillo rotativo

El secador de palas K-S se utiliza en todo el mundo para secar una variedad de lodos, biosólidos y subproductos, para generar productos secos estables, reducir los costos de descarte y convertir residuos en subproductos comercializables. En las estaciones de tratamiento de aguas residuales municipales (MWWTP), el sistema de secadores de palas KS produce biosólidos de clase A, de conformidad con los reglamentos E3 503, que permiten que el material granular seco se utilice beneficiosamente como fertilizante de liberación. cambio lento o en tierra. Los residuos secos también se han utilizado como combustible en calderas y hornos de cemento.

Caliente indirectamente con vapor o fluido térmico circulante (aceite caliente), el secador de palas K-S tiene una eficiencia térmica de aproximadamente el 98%. El gas no condensable en el secador que puede requerir tratamiento para olores es mínimo.



**Figura R. Tornillo goratorio del sistema de secado**

[http://www.komline.com/products/paddle\\_dryer\\_processor.html#Design](http://www.komline.com/products/paddle_dryer_processor.html#Design)

## Material audiovisual

<https://www.youtube.com/watch?v=6jxzK0GG2iE>

<https://www.youtube.com/watch?v=vDtJlInUBU>

### T. SERNAGIOTTO

Él diseñó y construyó varios tipos de secadores para el tratamiento de lodo, tanto municipales como industriales. Entre ellos, el modelo CTD (secador convectivo de tambor rotativo).

## 3.2. ANEXO II - POSIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN/SECADO A TRAVÉS DE LECHOS DE MACRÓFITAS EN EDAR DE PEQUEÑA DIMENSIÓN

La gestión integrada de sistemas que tengan por objeto no sólo el tratamiento de residuos, así como el control de la contaminación, puede lograrse mediante sistemas de tratamiento descentralizados y que garanticen los objetivos de calidad deseados con bajos consumos de recursos. De este modo, la utilización de soluciones naturales, en particular de lechos de macrófitas, en el tratamiento de los vertidos de excedentes de sistemas de drenaje de aguas residuales, puede constituir una plusvalía en situaciones específicas debido a las ventajas que presenta, en particular de orden económico, medioambiental y social (integración paisajista).

La tecnología de tratamiento por lechos de macrófitas presenta una simplicidad de operación y mantenimiento, bajos consumos de recursos y, además, eficiencias de remoción significativas, principalmente en lo que se refiere a: carencia bioquímica de oxígeno, carencia química de oxígeno y sólidos. La presencia de la vegetación influye en otros parámetros del funcionamiento de los lechos, en particular la temperatura del agua, la conductividad hidráulica, el pH y el potencial redox (USEPA, 2000).

Los lechos de macrófitas promueven el tratamiento biológico de las aguas residuales a través de procesos naturales presentando diversas variantes, dependiendo principalmente del tipo de flujo que presentan a través del lecho. Los mecanismos que promueven la mejora de la calidad del efluente son diversos, pudiéndose destacar (IWA, 2000).

- a) sedimentación de la materia particulada en suspensión.
- b) Filtración y precipitación química a través del contacto de la fracción líquida con el sustrato y los residuos que componen el lecho.
- c) las reacciones químicas derivadas del proceso.
- d) Adsorción e intercambios iónicos que ocurren a la superficie (por ejemplo, de las

plantas, del sustrato, de los sedimentos y de los residuos que se forman).

e) descomposición, transformación y consumo de los nutrientes y contaminantes por los microorganismos y las plantas presentes en el lecho.

f) Ciclo de vida natural de los microorganismos patógenos.

La aplicación de lechos de macrófitas en ETAR permite mejorar la gestión de lodos deshidratados en ETAR (dependiendo del área disponible para el efecto), siendo generalmente asociada a pequeñas comunidades rurales debido esencialmente a:

- ✓ Reducción de la producción de lodos.
- ✓ Reducidos gastos de funcionamiento y mantenimiento
- ✓ Relativa facilidad de construcción
- ✓ Proceso de tratamiento estable y capaz de soportar variaciones significativas de caudales y / o cargas contaminantes.

La deshidratación de los lodos ocurre por percolación del agua a través de las capas superiores de lodo y del medio filtrante, siendo acelerada por la evapotranspiración y la evaporación a partir de la superficie de los lodos. La oscilación de los tallos, por acción del viento, y un sistema de fijación constituido por rizomas facilitan la apertura de pequeños canales de drenaje a través del lecho de lodos. El agua recogida en el fondo de los lechos se reconduce a la depuradora. El reducido suministro de oxígeno que atraviesa los lodos, ya sea a través de las plantas y sus raíces, bien por difusión a través de la interfaz aire-lama, permitirá oxidar gradualmente los lodos, ocurriendo una reducción de los sólidos volátiles (SV) y un aumento de sólidos fijos (SF), obteniendo como resultado un lodo deshidratado con contenido de sólidos totales (ST) hasta el 50% del valor inicial.

Los lechos presentan, de forma genérica, tres componentes principales:

- ✓ El componente fijo donde se incluye la matriz, la zona de la rizosfera y los biopelículas (agregados microbianos que se desarrollan espontáneamente en las superficies sólidas).
- ✓ El componente hídrico que incluye el afluente, el agua dentro de la matriz, el efluente y todos los contaminantes asociados a estos tres componentes.
- ✓ El componente atmosférico que permite regular el movimiento de las fracciones gaseosas hacia el interior y exterior de la matriz, medio y suelo del componente hídrico.

En la Tabla A se presentan algunos de los mecanismos físicos, químicos y biológicos de

depuración.

**Tabla A- Mecanismos físicos, químicos e biológicos de la depuración.**

Parámetro	Mecanismos Físicos	Mecanismos Químicos	Mecanismos Biológicos
Sólidos en suspensión	Sedimentación	---	Degradación Microbiana
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	Sedimentación	---	Degradación Microbiana
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Sedimentación	---	Degradación Microbiana
Metales	Sedimentación	Precipitação; Adsorção; Troca Iónica	Captação por via dos microorganismos e plantas
Hidrocarburos fósiles	Volatilización	Adsorción	Degradação Microbiana; Captação por via das plantas
Hidrocarburos sintéticos	Sedimentación y Volatilización	Adsorción; Volatilización (NH <sub>4</sub> )	Degradación Microbiana; Captación por via de las plantas
Compuestos nitrogenados	Sedimentación	Precipitación; Adsorción	Captación y transformación por vía de los microorganismos; Captación por las plantas
Fósforo (orgánico e inorgánico)	Sedimentación	---	Captación por via de los microorganismos y plantas
Organismos patógenos	Sedimentación	---	Mortalidad Natural; Predación microbiana

La eficiencia de los procesos de eliminación de contaminantes puede verse afectada por una variedad de factores inherentes al propio proceso de eliminación (Escosteguy et al., 2008). Sin embargo, se puede considerar como los más influyentes:

- ✓ Las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, DQO y los sólidos en suspensión.
- ✓ Espesor y porosidad del lecho.
- ✓ Especies de plantas utilizadas
- ✓ Parámetros ambientales (por ejemplo, precipitación, viento, exposición solar).
- ✓ Condiciones oxidación-reducción existentes en los lechos
- ✓ Las fases anaerobias y aerobias.

Otro aspecto a tener en cuenta es el balance hidráulico, donde es necesario conocer los procesos de transporte y retención de agua en el medio. Estos son a veces de alta complejidad, ya que la superficie del sistema está expuesta de forma continuada a los flujos de energía que, a su vez, crean ciclos de temperatura, humedad relativa y evaporación. De

este modo, el conocimiento adecuado del comportamiento y del balance hidráulico es fundamental para una evaluación correcta de la eficiencia de depuración.

Como criterios a tener en cuenta en la elección de especies a utilizar y teniendo en cuenta un crecimiento rápido, se podrá destacar:

- ✓ Considerando alturas de lechos superiores a 0,6 m, se debe optar por *Phragmites*, cuyas raíces alcanzan profundidades de cerca de 1 m.
- ✓ Permitir el desarrollo rápido de las raíces, ya que este factor está normalmente relacionado con la presencia de nutrientes (crecimiento en profundidad a medida que la concentración de nutrientes disminuye).
- ✓ Siempre que los efluentes puedan presentar altos niveles de sodio es recomendable la utilización de cañizos como *Phragmites australianus* o *Phragmites vulgaris* (como es el caso de las aguas residuales en poblaciones del litoral donde pueden ocurrir infiltraciones de aguas salobres).
- ✓ Lechos de fácil control y que tengan un alto rendimiento en la depuración de las aguas residuales y en la eliminación de los nutrientes.
- ✓ Lechos que tengan una elevada resistencia a la salinidad presente en las aguas residuales (éstas tienden a variar a lo largo del proceso de tratamiento debido a las reacciones que van ocurriendo).

En cuanto a los criterios que determinan el dimensionamiento y el modo de tratamiento a tener en cuenta, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Topografía del terreno. Elección de lugares llanos o con pendiente pequeña (para evitar gastos con sistemas de bombeo) evitando zonas húmedas artificiales (lechos propensos a inundaciones).
- ✓ Preservación del área circundante (levantamiento previo del uso del suelo y sus condicionantes).
- ✓ Condiciones climáticas (incluso previendo un caudal de aguas residuales afluente al sistema, la modelación del balance al agua debe abarcar variaciones semanales o mensuales así como las variaciones de temperatura).
- ✓ Tiempo de retención hidráulico (teniendo en cuenta la eficiencia de eliminación de los contaminantes) y la carga hidráulica.
- ✓ Carga y coeficientes de eliminación de los contaminantes.

- ✓ Área, geometría del lecho y tasa de inundación.
- ✓ Conductividad hidráulica (dependiendo del tipo de llenado utilizado, por ejemplo, arena gruesa, arena, grava y otros).

En la Tabla B se presentan algunas ventajas y desventajas de la utilización de este tipo de sistemas:

**Tabla B – Ventajas / Desventajas.**

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Tecnología que presenta costes de construcción y operación reducidos en comparación con los sistemas convencionales (Por ejemplo lodos activados o lechos percoladores).	Necesidad de utilización de mayores áreas para implantación que los sistemas convencionales (por ejemplo, lodos activados o lechos percoladores).
Menores áreas de implantación que los sistemas de lagunas de estabilización (sin recurrir a la utilización de plantas).	Posible colmatación del lecho debido a la presencia de altas concentraciones de materia orgánica y materia sólida.
Elevadas eficiencias de eliminación de materia orgánica, materia sólida, nutrientes (compuestos nitrogenados y fósforo) y metales pesados.	Para alcanzar unas eficiencias de tratamiento más elevadas es necesario un período de funcionamiento más elevado (2-3 años después del inicio de la explotación)
Fácil operación y mantenimiento y gastos de energía reducidos.	Presenta eficiencias estacionales muy influenciadas por las épocas vegetativas y no vegetativas
Buena adaptabilidad (a las condiciones geográficas más amenas)	Dependiendo del sistema utilizado, se observa una elevada probabilidad en la aparición de roedores e insectos (en particular, mosquitos)
Reducida emisión de olores (sistemas con escurrimiento sub-superficial)	La eficiencia de remoción de fosforo y nitrógeno de las macrófitas depende del tipo de efluente (siendo algunas más eficientes para compuestos específicos)
Dispensa la utilización de químicos y la posibilidad de reutilización del efluente final	La eficiencia de las macrófitas en la eliminación de iones de efluentes depende (también) del tipo de especie y de cultivo utilizado (aunque el monocultivo es predominantemente empleado, sistemas con varias especies pueden ser más eficientes)
Buena tolerancia a variaciones de cargas hidráulicas, orgánicas e inorgánicas	
Impacto visual positivo	

## **EDAR de Alcoutim**

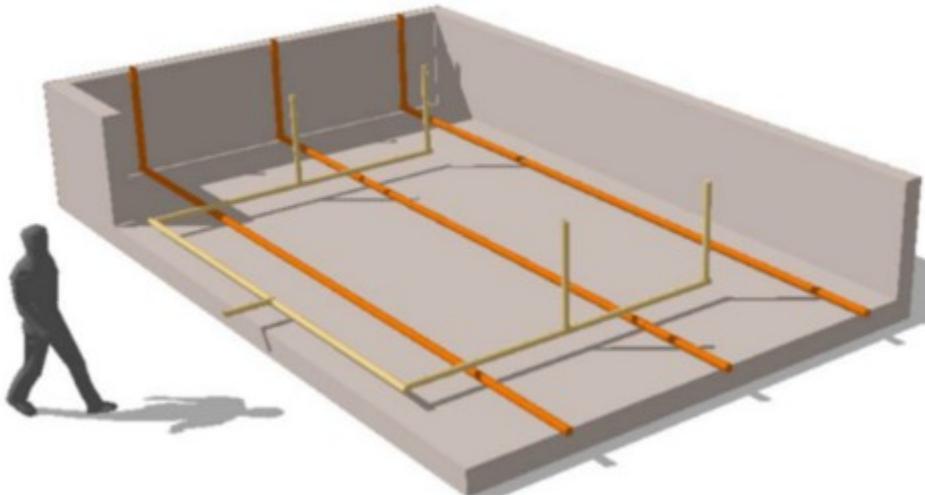
En el caso de la EDAR de Alcoutim está previsto acumular lodos en lechos macrófitas por un período de referencia mínimo de 3 a 5 años, minimizándose los transportes a realizar y mejorando la calidad del lodo final, particularmente a nivel de parámetros microbiológicos.

Considerando que la altura del lecho ideal debe situarse entre 1,5 y 1,6 my, considerando que se debe añadir unos 20 cm para el borde libre, así como que la altura de lodo en el lecho aumenta a unos 10 cm / año, el tiempo necesario para alcanzar cerca de 1 metro de altura de lecho ronda los 8 a 10 años.

El sistema de alimentación debe garantizar la distribución uniforme del lodo por el lecho de plantas, siendo la configuración variable de país a país. El sistema de alimentación a través de tuberías garantiza una distribución más uniforme que el sistema que alimenta los lechos en el extremo. En cuanto al sistema de drenaje / aireación, éste debe tener cerca de 1% de inclinación para permitir el drenaje de las escorrentías y garantizar alguna ventilación (Figura A).

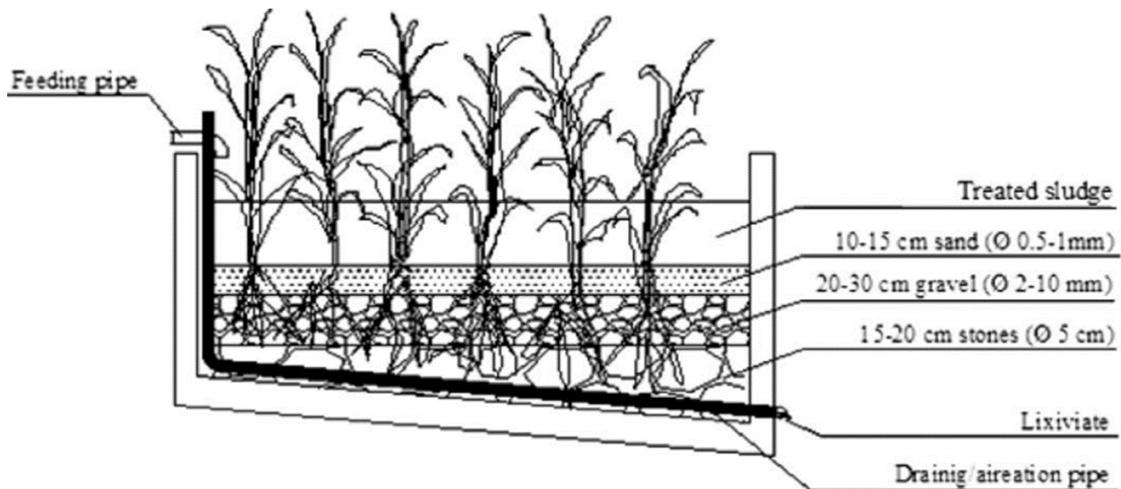
El principio base se basa en alimentar el lodo por el medio filtrante, para la retención de los sólidos, mientras que el contenido de agua es reducido. Para ello, se tendrán en cuenta determinados criterios de dimensionamiento, en particular la determinación del número de lechos necesarios y su altura, el tipo de sistema de alimentación y drenaje / aireación y, además, el tipo de llenado a considerar .

Sin embargo, para pequeños grupos el número de lechos puede variar siendo recomendado existir por lo menos 4 lechos considerando una rotación adecuada durante la fase de llenado. El área superficial recomendada depende de la población servida, por lo que el valor deberá encontrarse entre 0,12 a 0,24 m<sup>2</sup> / habitante-equivalente.



**Figura A - Configuración de los sistemas de alimentación y drenaje/aireación.**

En la Figura B se presenta un esquema general de la matriz de llenado de un lecho de macrófitas. La altura del medio filtrante debe comprenderse entre 30 y 60 cm, en que la primera capa debe contener piedras de 5 cm de diámetro, para protección de las tuberías con una altura de 15-20 cm, seguida de capa filtrante de grava con diámetro entre los 2 a 10 mm y la altura de 20-30 cm y finalmente una capa de arena de aproximadamente 0,5 a 1 mm y una altura entre 10-15 cm como medio filtrante y de soporte para las plantas.



**Figura B - Matriz de llenado de un lecho de macrófitas.** Adaptado de (Melidis et al., 2010).

Las plantas a utilizar deberán ser preferentemente macrófitas emergentes, en particular, la *phragmites australis* contemplando una configuración a nivel del espaciamiento de 4 plantas / m<sup>2</sup>. La presencia de las macrófitas intensifica los procesos de deshidratación y permite también una reducción en los valores de carencia química y bioquímica de oxígeno.

En la fase de arranque, después de la plantación de las macrófitas, se recomienda que las cargas aplicadas a los lechos en los primeros meses sean menores para promover el crecimiento y el desarrollo de la vegetación. La carga de los lechos con lodo y el reposo se regulan de acuerdo con las necesidades de retirar los lodos en exceso de la EDAR.

La fase de fuga de los lechos sólo debe producirse al cabo de seis meses de reposo, no sólo para permitir la mineralización del fango, sino también para que los microorganismos patógenos puedan ser eliminados. El primer lecho es retirado al cabo de 8 a 9 años y el último al cabo de 11 a 12 años, por lo que la vegetación debe ser cortada antes de la fase de fuga de los lechos. Los lodos se retiran de los lechos por medio de sistemas mecánicos, permaneciendo únicamente el filtro y las raíces de las plantas.

### 3.3. ANEXO III - EJEMPLOS DE PROCESOS DE SECADO INTEGRADOS CON TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR TÉRMICA

A título de ejemplo se presenta un sistema de concentración solar térmica integrado en un proceso de secado de lodos procedentes de una planta depuradora. Este sistema, instalado en Surprise (Arizona, EE.UU.) en el año 2017 fue desarrollado por la empresa Heat2Hydro, con el objetivo de reducir el contenido de agua de los lodos y disminuir los costos operativos asociados al transporte de los lodos (HelioCSP, 2017). El sistema deberá alcanzar los 5 MW térmicos hasta 2019.

Para la fase de demostración se utilizaron dos colectores cilindro-parabólicos del fabricante canadiense Rackam, con una longitud aproximada de 33,6 metros cada una y un área de captación total de 150 m<sup>2</sup>. La potencia térmica del sistema es de 98 kW, siendo el agua se calienta a 121 ° C a 5 bar y circulada a través de tubos subterráneos a un tanque de almacenamiento. De ahí el agua caliente circula por tubos colocados en el interior de los canteros con lodos (ver Figura A).



Figura A - Estación piloto para el secado de lodos de EDAR en Surprise - Arizona (USA).

### 3.4. ANEXO IV – EJEMPLOS DE SECADORES TIPO-ESTUFA

#### A. THERMO-SYSTEM

Esta tecnología (Figura A) se caracteriza por la utilización de la energía solar en el secado de los lodos. Además de reducir la masa y el volumen de los lodos al final del proceso, este producto presenta como características la ausencia de olores (inodoro), es biológicamente estable y fácilmente almacenable.

Sin embargo, este sistema presenta como requisito la necesidad de un área adecuada al proceso de secado. Si se utiliza calefacción externa (por ejemplo, centrales de calefacción comunes, instalaciones de biogás, calefacción auxiliar, etc.), será necesario un espacio considerablemente menor.

El Thermo-System posee un controlador de microprocesador para un control adecuado del sistema, teniendo en cuenta las condiciones climáticas existentes y las propiedades de los lodos a tratar.

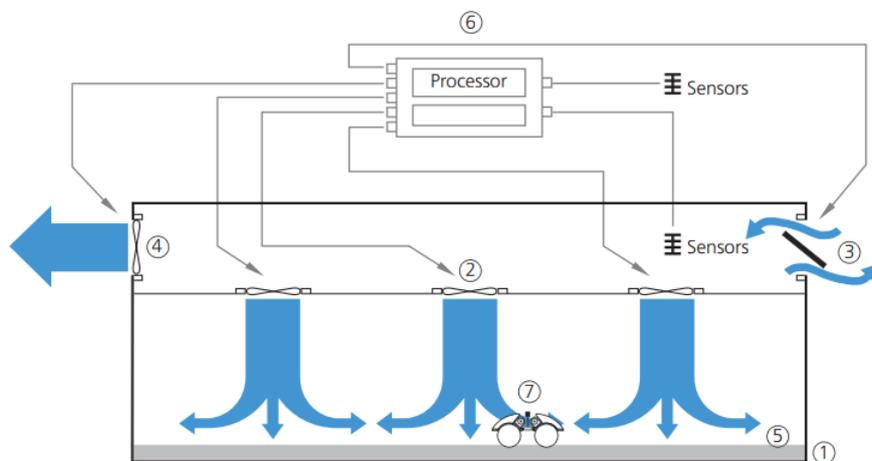


Figura A. *Thermo-System*.

Ref.: <https://www.thermo-system.com/en>

<https://www.youtube.com/watch?v=33Anw53z-v8>

#### B. WENDEWOLF

Este sistema presenta como principal componente del secador la máquina de inversión y transporte, denominada WendeWolf®. La máquina funciona en medio de dos paredes paralelas, con 12 m de distancia, 0,85 m de altura y una longitud que puede llegar a los 120 m. La parte central está compuesta por un tambor en el que se fijan diferentes peines y palas que cortan la superficie del lodo, permitiendo la ventilación de la parte inferior (interior). El

tambor se puede colocar a una altura de 50 cm del suelo por medio de un motor central y dos soportes dentados conectados entre sí.

La unidad puede moverse y girar en ambas direcciones siendo controlada por motores. Estos sistemas están totalmente equipados con sensores y unidades de control.



**Figura B. The Wendewolf – Ther Heart of the Drying Plant.**

Ref.: <http://www.wendewolf.com/klswolf.php?lang=en>

### **C. HELIANTIS - DREGREMONT TECHNOLOGIES**

Esta tecnología fue instalada en la EDAR de Ponta - isla de Porto Santo.

El principio de funcionamiento se basa en el intercambio térmico entre la superficie de los lodos y la atmósfera circundante. La máquina giratoria gira el producto a secar (escarificación de operación automática), promoviendo la aireación de los lodos y manteniéndolos en fase aeróbica. Este sistema permite que el lodo tome el sol durante el día y presenta como ventajas:

- ✓ Favorecimiento de la evaporación del agua contenida en los lodos, siendo el medio calentado por la radiación térmica y por los materiales utilizados en el tejado.
- ✓ Renovación del aire ambiente, saturado con humedad, con aire más seco por la ventilación (natural o forzada) hacia el lecho de lodo.



**Figura C. Sistema Heliantis en el secado de lodos de EDAR da Ponta - ilha de Porto Santo.**

Ref.: <http://www.aguasdmadeira.pt/Portals/0/Documentos/Instala%C3%A7%C3%B5es/ETAR%20da%20Ponta.pdf>

#### **D. KULT – HUBER COMPANY**

El principio básico del proceso HUBER SRT consiste en el secado de los lodos urbanos en un sistema de invernadero. La evaporación del agua contenida en los lodos se evapora durante el período en que se encuentran en el invernadero por medio del calentamiento del ambiente a través de la radiación solar y el viento producido artificialmente. Se utiliza un dispositivo especialmente diseñado para revocar la materia que permite su transporte durante el proceso de secado.

El proceso HUBER SRT permite una operación continua (el lecho de lodos permanece constante), cubriendo toda área de secado. Por medio de las diferentes funciones del revolvente, especialmente de la mezcla de retorno, se crea un lecho de lodos ligeramente húmedo y con poros sobre la mayor parte de la superficie. Con el resultado, se obtiene un producto de características adecuadas (suficientemente seco), de modo que los procesos biológicos que tienden a producir olores se eliminan prácticamente de forma significativa. Sin embargo, los lodos todavía están suficientemente húmedos para no producir partículas (polvo) durante el proceso mecánico.

La alimentación del invernadero con los lodos deshidratados puede adaptarse a las exigencias específicas del proceso. Es posible la introducción manual de los lodos, por ejemplo, por vía de transporte o, alternativamente, a través de un sistema automático directamente de la deshidratación. Los lodos secos pueden ser descargados en un depósito creado en una de las extremidades del invernadero o ser directamente conducidos para la carga de un dispositivo mecánico.



**Figura D. Sistema de secado KULT – HUBER company.**

Ref.: [http://www.ordemengenhheiros.pt/fotos/noticias/brochurakultsrt\\_13174123354ecd2c8bdef76.pdf](http://www.ordemengenhheiros.pt/fotos/noticias/brochurakultsrt_13174123354ecd2c8bdef76.pdf)

### **E. BLACK BLOCK**

El BLACK BLOCK® es un sistema solar híbrido de secado, desarrollado para deshidratar diferentes alimentos y productos agroindustriales (por ejemplo, hierbas aromáticas, frutas, legumbres, hongos o productos industriales como corcho y madera), a través de un proceso de secado automático, de bajo consumo energético y con un adecuado control entre el calor suministrado y la humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado.

Este sistema permite la recogida de datos de temperatura y humedad a través de sensores, para estabilizar el ambiente de secado en los parámetros adecuados a través de un sistema de control automático que da prioridad a la entrada de aire caliente proveniente de los colectores solares, maximizando la utilización de ésta fuente de energía renovable, limpia y gratuita. Durante la noche, un sistema de energía auxiliar se utiliza en conjunto con los equipos que aseguran la continuidad del secado.



**Figura E. Black Block System.**

Ref.: <http://blackblock.eu/pt/homepage/>

<https://www.agroportal.pt/diretorio/black-block-hybrid-solar-drying-systems/>

## F. BUBBLE DRYER – CHATRON COMPANY

Son sistemas de deshidratación solar, modulares y con diferentes tipificaciones para satisfacer las necesidades de secado.

Este sistema ya incluye los "Big Bags" (sacos gigantes) para acondicionar los productos durante el secado, estando debidamente preparados para ser manejados con apilador o con máquinas agrícolas adaptadas para el efecto, siendo posible su aplicación a escala. Los productos a deshidratar pueden ser diversos desde hierbas aromáticas a cereales, frutos, orujos, maderas, cortijos, entre otros.

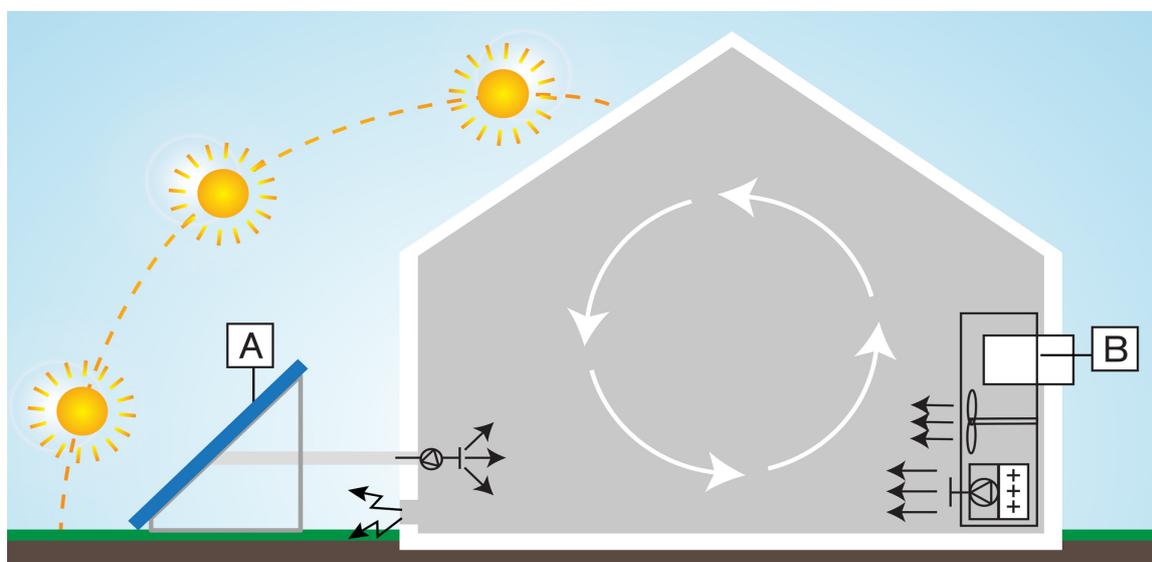


Figura F. Esquema de funcionamiento – Bubble Dryer.

Ref.: <https://www.chatron.pt/pt/agricultura/desidratador-solar-2>

## G. DRY ECOMATE

DryEcoMate es un deshidratador hortícola modular, portátil y de bajo consumo de energía que funciona exclusivamente con energía renovable (solar térmica y fotovoltaica) y puede operar independientemente de las condiciones climáticas instantáneas. Este sistema permite un control adecuado de diferentes factores del proceso. De estos, es de destacar la temperatura del aire de deshidratación y la velocidad de circulación del aire, la radiación solar y la temperatura externa en cada momento a través de la lectura de diferentes parámetros (por ejemplo, temperatura y humedad relativa del aire externo, el aire en la entrada de la

cámara de deshidratación y el aire en la salida de la cámara de deshidratación).

DryEcoMate está equipado con un panel solar térmico, un panel solar fotovoltaico, una cámara de deshidratación, una resistencia eléctrica, ventiladores para forzar la circulación de aire dentro de la cámara, amortiguadores de aire motorizados / válvulas, temperatura y sondas RH y un sistema de control , que permite al equipo operar bajo condiciones optimizadas en cada instante.

### Pre-prototype draft

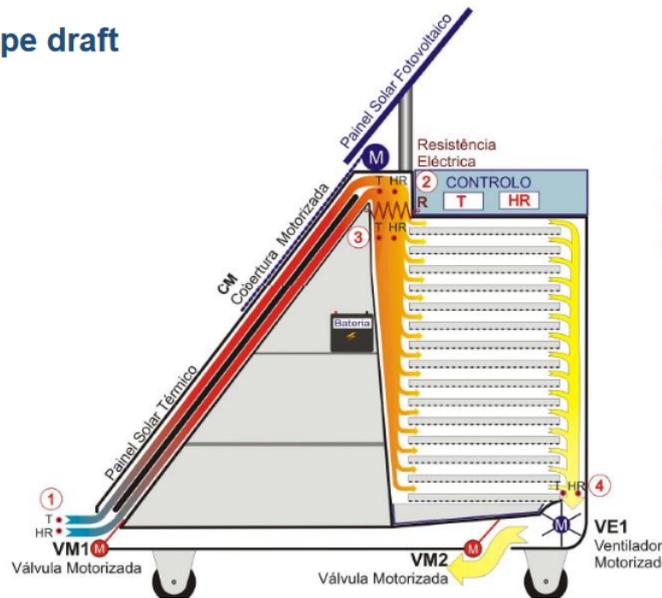


Figura G. Pre-prototipo Dry EcoMate.

Ref.: <http://www.consolfood.org/2018-downloads/>

<http://www.consolfood.org/wp-content/uploads/2018/02/L23%20Joao%20Garcia.pdf>

## H. SECMAD - INETI

El Proyecto SECMAD, que significa "secado de madera con eficiencia energética". El concepto utiliza ventilación natural y mecánica controlada por un sistema de instrumentación y control, responsable por las condiciones ambientales internas y externas.

Los secadores permiten secar 50 m<sup>3</sup> en 33 días, para madera de pino bravo hasta un 12% de humedad. El desempeño del proceso de secado tiene una dependencia estacional y climática significativa, por lo que un sistema de control interactivo es esencial para aprovechar al máximo las condiciones externas favorables

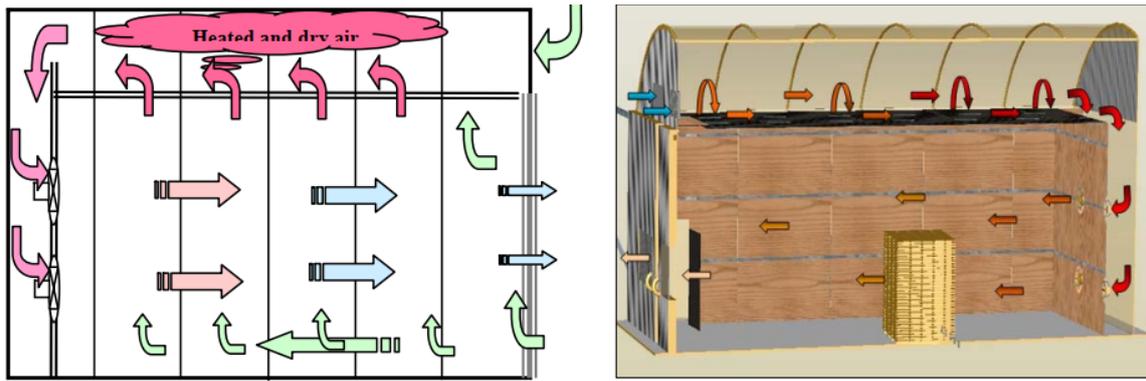


Figura H. Concepto de modelo de calor del secador de horno de madera (locales de corte).