



Interreg

España - Portugal

0029_SECASOL_5_E



UNIÓN EUROPEA
UNIÃO EUROPEIA

Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

Produto do Projeto n.º 2 (PP2)

Soluções técnicas de secagem utilizando energia solar térmica de concentração na depuração de águas residuais e no tratamento de resíduos sólidos urbanos

POCTEP 2014-2020 / Projeto n.º:

0029_SECASOL_5_E

Início do projeto:

01/12/2017

Duração do projeto:

25 meses

| | |
|---|---|
| Projeto SECASOL | |
| 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 | |
| Data de entrega | 15/02/2019 |
| Parceiro responsável | LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia |
| Pessoa responsável | Pedro Azevedo (LNEG) |
| Autor(es) | Victor Mantilla (LNEG), Miguel Miranda (LNEG), David Loureiro (LNEG), Gonzalo Lobo (CENTA), Carlos Aragón (CENTA) |
| Revisto por | |
| Grau de disseminação | Público |

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|----|
| Índice de Figuras | 4 |
| Índice de Tabelas | 6 |
| Nomenclatura..... | 7 |
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1. Enquadramento do projeto SECASOL | 9 |
| 1.2. Processos de secagem no tratamento de águas residuais | 10 |
| 1.3. Processos de secagem no tratamento de resíduos sólidos urbanos | 12 |
| 2. TECNOLOGIAS PARA SECAGEM DE LAMAS DE ETAR E DE PRODUTOS DO PROCESSAMENTO DE RSU | 13 |
| 2.1. Métodos de secagem térmica | 15 |
| 2.2. Família de secadores industriais | 18 |
| 2.3. Vantagens e desvantagens da secagem térmica | 20 |
| 2.4. Secadores industriais mais adequados na integração das tecnologias de energia solar térmica..... | 21 |
| 2.4.1. Secadores instantâneos (<i>Flash Dryers</i>) | 23 |
| 2.4.2. Secadores de <i>Spray</i> | 23 |
| 2.4.3. Secadores de tambor rotativo | 24 |
| 2.4.4. Secadores de leito fluidizado | 25 |
| 2.4.5. Secadores de impacto | 26 |
| 2.4.6. Secadores “ <i>Through</i> ” | 26 |
| 2.4.7. Secadores de transporte | 27 |
| 2.4.8. Secadores de bandeja..... | 28 |
| 2.4.9. Secador solar tipo-estufa | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.5. Condições de valorização de resíduos | 30 |
| 2.5.1. Valorização agrícola de lamas de ETAR..... | 31 |
| 3. TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO SOLAR TÉRMICA PARA PROCESSOS DE SECAGEM..... | 33 |
| 3.1. Coletores solares planos (baixa temperatura) | 34 |
| 3.2. Coletores de tubo de vácuo (baixa-média temperatura) | 36 |
| 3.3. Coletores com concentrador parabólico composto - CPC (baixa-média temperatura)..... | 37 |
| 3.4. Coletores cilíndricos parabólicos (média temperatura) | 39 |
| 3.5. Coletores com refletores lineares de Fresnel (média temperatura)..... | 41 |
| 4. INTEGRAÇÃO DA ENERGIA SOLAR DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSOS DE SECAGEM..... | 42 |
| 4.1. Possíveis esquemas de integração..... | 44 |
| 5. Conclusões | 48 |
| Referências bibliográficas | 49 |
| ANEXOS..... | 53 |
| Anexo I - Exemplos de Secadores Comerciais | 53 |
| Anexo II - Possibilidade de implementação de sistemas de desidratação/secagem através de leitos de macrófitas em ETAR de pequena dimensão | 73 |
| Anexo III - Exemplos de processos de secagem integrados com tecnologias de concentração solar térmica..... | 79 |
| Anexo IV – Exemplos de secadores tipo-estufa | 80 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Curva típica de secagem de lamas.. | 14 |
| Figura 2 - Identificação da tecnologia de concentração solar térmica mais adequada para integração em processos de secagem..... | 22 |
| Figura 3 - Diagrama de processo dos secadores instantâneos..... | 23 |
| Figura 4 - Diagrama do equipamento e processo de secagem com secador de <i>Spray</i> .. | 24 |
| Figura 5 - Processo de secagem com secador de tambor rotativo..... | 24 |
| Figura 6 - Conceito de secagem com leito fluidizado.. | 25 |
| Figura 7 - Esquema do bocal do secador de impacto.. | 26 |
| Figura 8 - Esquema da secagem com secador "Through" .. | 27 |
| Figura 9 - Secadores de transporte.. | 27 |
| Figura 10 - Princípio de funcionamento do secadores de bandeja. | 28 |
| Figura 11 - Secador tipo-estufa com integração de diferentes alternativas..... | 29 |
| Figura 12 - Secador tipo-estufa com sistema regenerativo..... | 30 |
| Figura 13 - Configuração tipo dum coletor solar plano..... | 36 |
| Figura 14 - Coletor solar plano com absorsor seletivo..... | 36 |
| Figura 15 - Coletor de tubo de vácuo.. | 37 |
| Figura 16 - Configuração parabólica truncada do refletor do coletor tipo CPC.. | 38 |
| Figura 17 - Configuração do Refletor CPC aplicado num coletor de tubos de vácuo.. | 38 |
| Figura 18 - Instalação de sistema solar coletivo com utilização de coletor solar do tipo CPC, na configuração de circulação forçada .. | 38 |
| Figura 19 - Tecnologias de coletores solares estacionários e com seguimento solar, em função da temperatura de operação e da gama de temperatura do processo em diferentes setores industriais .. | 40 |
| Figura 20 - Coletores cilindro parabólicos.. | 40 |
| Figura 21 - Tecnologia Fresnel Linear.. | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 22 - Possíveis modos de integração de energia solar térmica em processos industriais. | 43 |
| Figura 23 - Esquema de um sistema de transferência de calor com tecnologia solar utilizando um permutador de calor externo..... | 45 |
| Figura 24 - Esquema com de geração de calor solar a vácuo..... | 45 |
| Figura 25 - Esquema do processo de secagem utilizando óleos térmicos (sintéticos) ou vapor..... | 46 |
| Figura 26 - Comportamento da energia num sistema CSP utilizando armazenamento térmico..... | 47 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Métodos de secagem aplicados a lamas – vantagens e desvantagens, consumo específico e taxa de secagem específica..... | 18 |
| Tabela 2 - Análise comparativa dos diferentes tipos de secagem (secadores)..... | 19 |
| Tabela 3 - Gama de secagem de lamas em função de sua utilização. | 19 |
| Tabela 4 - Características técnicas dos secadores instantâneos..... | 23 |
| Tabela 5 - Características dos secadores do tipo <i>Spray</i> | 24 |
| Tabela 6 - Características dos secadores de tambor rotativo..... | 25 |
| Tabela 7 - Características dos secadores de leito fluidizado. | 25 |
| Tabela 8 - Características dos secadores de impacto..... | 26 |
| Tabela 9 - Características dos secadores tipo " <i>Through</i> "...... | 27 |
| Tabela 10 - Características dos secadores com meio de transporte..... | 27 |
| Tabela 11 - Características dos secadores de bandeja. | 28 |
| Tabela 12 - Características dos secadores tipo-estufa. | 30 |
| Tabela 13 - Algumas características das tecnologias solares, segundo o tipo..... | 34 |
| Tabela 14 - Configurações técnicas de coletores solares a água. | 35 |
| Tabela 15 - Resumo dos conceitos de integração da energia térmica em processos industriais.. | 44 |

Nomenclatura

| | |
|------------|---|
| COV | Composto orgânico volátil |
| CP | Coletores cilindro parabólicos |
| FL | Fresnel Linear |
| HEX | Permutador tipo HEX |
| HEX HTF ar | Permutador de calor tipo HEX |
| HTF | <i>Heat Transfer Fluid</i> |
| PL-1 | Aquecimento solar para calor de processo |
| PL-2 | Aquecimento solar para equipamentos |
| PL-3 | Aquecimento solar com HEX interno |
| PL-4 | Fornecimento de vapor solar a vácuo ou a baixa pressão |
| PL-6 | Aquecimento solar de ar |
| SL-1 | Integração paralela (direta ou indireta) do calor solar |
| SL-2 | Pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira |
| SL-3 | Pré-aquecimento de água de alimentação (make-up) |
| SL-4 | Integração paralela (direta ou indireta) do calor solar |
| SL-5 | <i>Solar return flow boost</i> |
| RC | Recetor central |

1. INTRODUÇÃO

A crescente dificuldade na gestão de lamas provenientes das estações de tratamento de águas residuais (ETAR) e lixiviados provenientes de estações de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem vindo a acentuar-se devido ao aumento das populações e das atividades económicas. Os efluentes enviados para os sistemas de tratamento são submetidos a diferentes processos físico-químicos e biológicos resultando na produção de grandes quantidades de material a tratar (lamas e lixiviados). Assim, devido às quantidades geradas bem como às características que apresentam, verifica-se a necessidade de secar estes produtos por forma a reduzir consideravelmente o seu volume e consecutivamente diminuir os custos com o posterior tratamento, armazenamento e transporte, como também potenciar a sua utilização como produto de valor acrescentado.

A introdução de processos de secagem no processamento de RSU poderá permitir outros benefícios tais como a sua valorização energética sob a forma de combustível derivado de resíduos (CDR) e a redução do volume e massa a dispor em aterro.

O aproveitamento da radiação solar como uma fonte renovável de energia térmica, passível de utilização em diferentes aplicações industriais que necessitam de grandes quantidades de calor, não só nos processos produtivos como também nas várias etapas de tratamento de resíduos, constitui um fator de desenvolvimento económico, social e industrial.

A energia solar térmica pode contribuir significativamente para mitigar as necessidades de calor neste tipo de processos e, desta forma, contribuir para a substituição direta de parte dos combustíveis fósseis utilizados na produção de calor para processos industriais. Processos requerendo temperaturas inferiores a 100 °C poderão ser alimentados por calor produzido por sistemas solares térmicos não concentradores. Necessidades de calor para níveis de temperatura superiores podem ser supridas adequadamente com a implementação das atuais tecnologias de concentração solar.

Neste trabalho são abordados os processos de secagem utilizados no tratamento de águas residuais e resíduos sólidos urbanos bem como as tecnologias existentes para secagem direta de RSU e secagem de lamas de ETAR e lixiviados provenientes de RSU, de modo a reduzir o teor em humidade e favorecer os processos de tratamento subsequentes, considerando, sempre que possível a sua valorização. São abordadas as tecnologias de secagem de lamas de ETAR e RSU com especial incidência nos métodos de secagem tendo em conta os critérios de transferência de calor e massa, a taxa de secagem, a influência e eficiência dos diferentes sistemas de secagem, as vantagens e desvantagens da secagem térmica e os tipos de secadores utilizados.

Será ainda abordada a temática referente às tecnologias de concentração solar térmica aplicada a processos de secagem, apresentadas algumas considerações na sua integração bem como apresentadas as soluções tidas como mais convenientes.

1.1. Enquadramento do projeto SECASOL

O projeto SECASOL tem como principal objetivo a promoção de tecnologias inovadoras para a melhoria da eficiência no processo de secagem de lamas de esgoto e a secagem de resíduos sólidos urbanos através do uso de tecnologias solares no espaço transfronteiriço da Andaluzia-Algarve-Alentejo. Segue os princípios orientadores estabelecidos pela política de coesão e crescimento sustentável da EU, sendo suportado financeiramente pelo programa POCTEP 2014-2020 (refª 0029_SECASOL_5_E: 2017-2019) através dos mecanismos de cooperação transfronteiriça Portugal-Espanha, orientados para a prevenção de riscos e melhoria da gestão dos recursos naturais, com incidência no setor da água e no setor dos resíduos.

Prevê-se que o projeto SECASOL possa ter um impacto muito positivo nas regiões transfronteiriças da sua incidência, onde o enquadramento energético, as condicionantes geográficas e as concentrações massivas de resíduos em áreas urbanas são coincidentes em muitos aspectos. Por outro lado, são também semelhantes, os meios atuais de secagem e a abundância de recurso de energia solar, pelo que o trabalho de cooperação transfronteiriça permitirá enfrentar desafios e oportunidades comuns e a partilha de experiências replicáveis em ambos os lados do território.

Sazonalmente na época estival, a pressão nas áreas urbanas do espaço transfronteiriço da Andaluzia-Algarve-Alentejo é agravada, coincidindo o aumento de população, devido ao fluxo de turismo estrangeiro com as férias de residentes nacionais. Esta situação de pico tem provocado um problema de gestão do tratamento dos resíduos por parte dos serviços municipais e dos operadores concessionados e tem obrigado a soluções de intensificação energética convencional, provocando o aumento de poluição nessas áreas urbanas.

O projeto pretende assim encarar de forma inovadora a problemática associada aos processos de secagem de lamas nos sectores de Tratamento de Águas Residuais e de Secagem de Resíduos Sólidos Urbanos. Pretende potenciar a aplicação de tecnologias solares de concentração a processos industriais e contribuir para superar as barreiras e desvantagens que habitualmente se apresentam na aplicação de energias renováveis em larga escala e reduzir a poluição nessas áreas urbanas transfronteiriças.

A capitalização das potencialidades dos parceiros representativos destes setores no espaço transfronteiriço, empresariais, municipais e científicos, pretende ser uma componente estratégica determinante na projeção dos resultados e conclusões do projeto SECASOL. Procura-se a viabilização técnica e económica de soluções menos contaminantes, fazendo uso muito para além da fase de laboratório de recursos energéticos renováveis.

O plano de trabalho do projeto SECASOL inclui a elaboração de relatórios sobre o *Potencial de aplicação da energia solar térmica de concentração* (PP1), as *Soluções técnicas de secagem com energia solar térmica de concentração* (PP2), o *Mapeamento das competências para gerar conhecimento nestes setores* (PP3), assim como ações e atividades de *Experimentação de protótipos em condições reais de aplicação* (PP10) e o

desenvolvimento de *Modelo de simulação de secador solar térmica de concentração* (PP11).

1.2. Processos de secagem no tratamento de águas residuais

As lamas provenientes de sistemas de tratamento de águas residuais são compostas por um conjunto de matéria orgânica e inorgânica, juntamente com uma elevada percentagem de água. De acordo com informação publicada (Chen et al., 2002; Werther and Ogada, 1999) o teor de humidade na lama pode atingir valores próximos de 99% (m/m) sob a forma de água livre (70% a 75% do conteúdo de água total, associado a fenómenos de floculagem) ou ainda por ligação química/intracelular (cerca de 1% do conteúdo total de água).

Dependendo das suas características, o destino final a dar às lamas provenientes da depuração de águas residuais pode ocorrer por diferentes vias nomeadamente a incineração, a deposição em aterro sanitário ou a reciclagem (esta última por via da compostagem para aproveitamento agrícola). Em todos estes métodos, a pré-secagem das lamas é uma necessidade por várias razões, nomeadamente (Chai, 1997):

- Permite uma redução significativa do teor de água e, conseqüentemente, uma redução da massa e volume de lamas a tratar;
- Redução do impacto ambiental (p. ex. associado ao transporte e emissão de poluentes);
- A secagem a alta temperatura não só permite reduzir a taxa de microrganismos patogénicos existentes nas lamas como também permite a sua estabilização no que respeita a fermentações indesejadas;
- A remoção da água aumenta o poder calorífico das lamas permitindo a sua utilização como fonte adicional de combustível.

Uma adequada seleção do modelo de secagem de lamas de ETAR tem de ter em conta o produto final pretendido bem como as condições técnicas e regulatórias existentes. Desta forma, o tipo de tratamento selecionado deverá ter em consideração:

- a) As características do produto final - este deverá conter uma quantidade mínima de pó devido ao seu carácter orgânico (potencialmente explosivo). Igualmente dever-se-á ter particular atenção ao armazenamento (riscos acrescidos de ignição e/ou incêndio) bem como ao manuseio de lama seca potenciar o aumento da concentração de poeira na atmosfera envolvente (impacto negativo na saúde);
- b) Considerando o exposto em: (i) No caso das instalações andaluzas, para conteúdos de matéria seca superior a 90%, deverá considerar-se o exposto na *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* e (ii) no caso português dever-se-á ter em conta o exposto no Decreto-Lei n.º 276/2009 que estabelece os critérios a seguir para as lamas com teor em matéria seca inferior a 20% e posteriormente o Despacho n.º 8400 –22/07/15.

As condições de operação dos processos de secagem térmica associados ao tratamento de águas residuais foram abordadas no relatório *PPI - Potencial de aplicação da energia solar térmica de concentração aos processos de depuração de águas residuais e de tratamento de resíduos sólidos urbanos* elaborado no âmbito do projeto SECASOL (Mantilla et al., 2018) pelo que não serão abordadas neste documento.

As ETAR são consideradas indústrias que apresentam um elevado risco de explosões e incêndios, devido à formação de gases de digestão gerados no tratamento de águas residuais (misturas explosivas de gás-ar). As lamas secas também apresentam um elevado risco de explosão, facto esse que deve ser tido em conta devido as temperaturas requeridas nos diversos processos de secagem das lamas.

De acordo com Regulamento de Segurança e Saúde no Trabalho na Exploração dos Sistemas Públicos de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais, definem-se como fatores de risco específico da atividade que resultam das seguintes situações:

- a) *Insuficiência de oxigénio atmosférico* – refere que a exposição dos trabalhadores a atmosferas suscetíveis de apresentar insuficiência de oxigénio só é permitida quando seja garantido um teor volumétrico de oxigénio igual ou superior a 17%, salvo na utilização de equipamento de proteção adequado (aparelho de proteção respiratória autónomo);
- b) *Formação de gases ou vapores perigosos* – avaliação dos riscos de existência e/ou formação de gases e definição de valores limites nos meios onde se desenvolvem as atividades que podem apresentar atmosferas contaminadas com gases suscetíveis de constituir risco de intoxicação, asfixia, incêndio ou explosão (p. ex. ozono, cloro, gás sulfídrico, dióxido de carbono e metano, vapores de combustíveis líquidos, vapores de solventes orgânicos, gases combustíveis e monóxido de carbono);
- c) *Reagentes* – deverão ser tomadas medidas específicas no que se refere ao manuseamento ou manipulação de reagentes suscetíveis de provocar riscos de queimaduras, dermatoses, ulcerações ou outras lesões cutâneas (p. ex. óxido de cálcio, hidróxido de cálcio, sais de alumínio, sais férricos ou ferrosos e cloro);
- d) *Águas residuais e lamas* - a sua manipulação deverá ser realizada com especial cuidado devido à formação de cinzas resultantes da incineração de lamas (formação de substância perigosas) e a existência de microrganismos patogénicos (riscos de infeção provenientes do manuseio e no controlo analítico);
- e) *Aumento brusco de caudal e/ou inundações súbitas* – devem ser estabelecidos e acionadas as medidas de evacuação, definidas os eventuais riscos de descargas de emergência e os programas de exploração devem prever medidas específicas a adotar nas situações de inundações súbitas (p. ex. rebentamentos ou de outras avarias de tubagens em pressão);
- f) *Sinalização adequada referente às restrições/riscos no interior das instalações* – locais visitáveis que apresentem riscos de afogamento (p. ex. coletores, captações, câmaras de aspiração de estações elevatórias, reservatórios e órgãos de estações de tratamento, recuperação e armazenagem de biogás, zonas de armazenagem, preparação e aplicação de substâncias e zonas de equipamentos mecânicos e elétricos) e, ainda, a identificação da(s) zona(s) de primeiros socorros.

1.3. Processos de secagem no tratamento de resíduos sólidos urbanos

A secagem solar é uma opção vantajosa quando comparada com os sistemas térmicos de secagem mecânica convencionais dado que utiliza uma fonte de energia renovável. Este aspeto é particularmente interessante para os países que apresentam uma elevada exposição solar, nomeadamente Portugal e Espanha.

Os processos de secagem associados ao tratamento de resíduos sólidos urbanos encontram-se descritos no relatório *PPI - Potencial de aplicação da energia solar térmica de concentração aos processos de depuração de águas residuais e de tratamento de resíduos sólidos urbanos* (Mantilla et al., 2018) pelo que não serão abordados neste documento.

Tendo em conta os processos de tratamento de RSU bem como as condições operacionais e as quantidades de matéria a tratar, poderá ser considerada a utilização de tecnologias de energia solar térmica nos seguintes processos de secagem:

- a) Secagem dos resíduos na saída da unidade do tratamento mecânico biológico (TMB);
- b) Secagem das águas lixiviadas resultantes da infiltração de águas pluviais no aterro sanitário;

As necessidades totais de energia térmica estarão dependentes da quantidade de resíduos e lixiviados a secar, das suas características e das condições ambientais (temperatura e humidade do ar).

É também possível preconizar a utilização de energia solar térmica para a produção de ar quente para processos de tratamento da matéria orgânica (compostagem). O aquecimento deste ar poderá ser feito de forma integrada com a produção de calor para os processos de secagem. Note-se que tipicamente a degradação biológica da matéria orgânica não requer a adição de calor exterior, no entanto, um aumento na temperatura do ar (de 40 até 50 °C) permite um aumento no desempenho do processo. A energia requerida para aquecimento do ar dependerá das condições ambientais (temperatura do ar e humidade) e do caudal de ar necessário ao processo.

2. TECNOLOGIAS PARA SECAGEM DE LAMAS DE ETAR E DE PRODUTOS DO PROCESSAMENTO DE RSU

a) Lamas resultantes de ETAR

As elevadas necessidades de energia associadas aos processos de secagem de lamas provenientes de ETAR e de lixiviados ou materiais resultantes do processamento dos RSU resultam num processo economicamente pouco atrativo quando considerado de forma isolada. Deste modo, os custos elevados associados ao transporte, processamento e disposição final destes materiais – cujo elevado teor de humidade resulta num acréscimo significativo de volume e massa – forçam a procura de soluções que permitam reduzir estes custos (através da redução das quantidades de matéria a tratar). É neste âmbito que as soluções de secagem com recurso a energia solar térmica se afiguram como uma solução renovável de elevado interesse económico e ambiental.

A água que se encontra no estado livre não está ligada às partículas de lama, podendo ser extraída por diferentes processos, nomeadamente por sedimentação (ação gravitacional), sistemas mecânicos, drenagem ou evaporação. A água intersticial/adsorvida encontra-se no interior da matéria sólida (preenchimento de zonas porosas do material) e pode ser removida por ação de forças mecânicas ou pela aplicação de temperaturas elevadas. A água de superfície está ligada na superfície das partículas sólidas por ação de forças intermoleculares (adesão) podendo esta ser removida também por ação de temperatura (embora inferiores às requeridas na remoção da água intersticial). A água de ligação química está fortemente ligada às partículas sólidas e a sua remoção exige força mecânica ou energia térmica.

O processo de secagem térmica das lamas baseia-se na remoção da água através da evaporação (aumento de temperatura do sistema) sendo que, a taxa de evaporação ou a taxa de secagem dependem do teor de humidade existente da lama bem como do tipo ligação que a água apresenta com o material.

Um dos elementos mais cruciais e que permite obter informações sobre o comportamento da lama durante a secagem é a variação da humidade na lama em função do tempo de secagem. Esta variação, tipicamente conhecida como Curva de Secagem, permite verificar o número de fases e a taxa de secagem a que a lama é submetida durante o referido processo.

Segundo alguns autores (Bennamoun, 2012; Bennamoun and Arlabosse, 2013) a taxa de secagem de lamas apresenta 3 fases típicas (Figura 1): a primeira fase corresponde a uma secagem que apresenta uma taxa constante e corresponde à extração da água livre, uma segunda fase que corresponde a uma taxa de secagem inferior e onde se verifica a extração da água intersticial e, ainda, uma terceira fase em que se verifica um ligeiro aumento da taxa de secagem, correspondendo à extração da água de superfície do material. A quantidade de água retida ainda no interior da lama corresponde à água de ligação por via química (sendo esta dependente do tipo de lamas e condições de secagem).

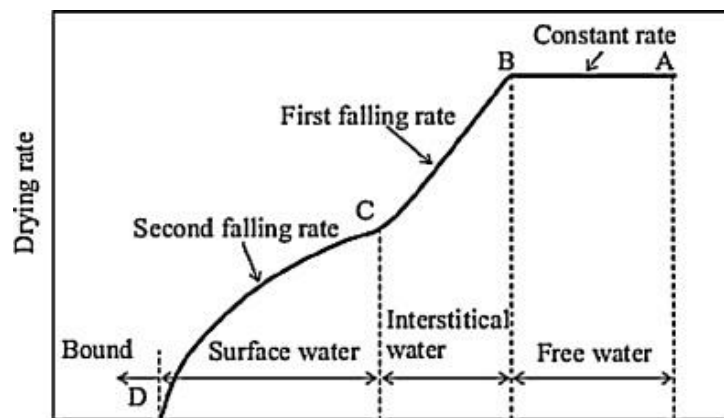


Figura 1 - Curva típica de secagem de lamas. (Bennamoun and Arlabosse, 2013).

A secagem solar é uma opção vantajosa quando comparada com os sistemas térmicos convencionais (secagem mecânica) dado que utiliza uma fonte de energia renovável. Acresce que a secagem solar pode ser implementada em todas as linhas de tratamento, tornando esta solução não só muito versátil como podendo ser economicamente e ambientalmente atrativa. Este aspeto é particularmente interessante para os países que apresentam uma elevada exposição solar, nomeadamente Portugal e Espanha.

A secagem solar está a tornar-se numa opção bastante popular tendo em vista a substituição dos secadores térmicos mecânicos. Os leitos de secagem solar têm sido convertidos em secadores solares do tipo estufa permitindo uma melhor mistura e ventilação das lamas (Mathioudakis et al., 2013). Ainda de acordo com a informação publicada por estes autores, os sistemas de secagem solar permitem a evaporação da água de forma mais eficaz possibilitando a transformação gradual das lamas a secar em grânulos com teores de humidade entre 10 a 15%. Para além da evaporação da água e de uma redução substancial do volume de lama a tratar (80% m/m), o processo de secagem permite ainda a desinfeção parcial das lamas através da redução do conteúdo de agentes patogénicos. Esta ação resulta da exposição à radiação ultravioleta solar e à ação da temperatura.

b) Lixiviados de RSU e RSU para CDR

Os lixiviados provenientes de aterros de resíduos sólidos urbanos caracterizam-se por serem uma complexa mistura líquida de substâncias orgânicas e inorgânicas que apresentam uma elevada toxicidade. Este resíduo é submetido a diferentes processos de tratamento físico-químicos (coagulação/floculação, precipitação química, adsorção com carvão ativado, membranas e osmose inversa) e biológicos (lagoas de estabilização, filtros biológicos aeróbios e anaeróbios, lamas ativadas), podendo estas tecnologias de tratamento estarem condicionadas por aspetos técnico-económicos (Aguilar et al., 2012). Existem ainda outros tipos de tratamento que visam a evaporação do lixiviado (para posterior condensação) tendo em vista um maior grau de eficiência (95% de remoção de poluentes). No que diz respeito aos concentrados, estes rondam os 6% (m/m), sendo posteriormente submetidos a um tratamento final por inertização (estabilização/solidificação).

Nos diferentes tratamentos que são aplicados, incluem-se os Processos Oxidativos Avançados (POA) (pré-tratamento de lixiviado) de modo a permitir a degradação química da matéria orgânica recalcitrante e aumentar a biodegradabilidade do lixiviado. A aplicação de POA visam essencialmente a transformação, por via oxidativa, dos componentes presentes nos lixiviados, em substâncias biológicas degradáveis (ou em substâncias mais facilmente elimináveis pelos processos físico-químicos convencionais) (Airton et al., 2002). Estes processos de tratamento são igualmente aplicados às águas residuais devido às suas características físico-químicas (Babuponnusami and Muthukumar, 2014).

Entre os POA, grande destaque tem sido dado ao uso do peróxido de hidrogênio em presença de sais de ferro, conhecido como o Processo *Fenton* devido, principalmente, ao seu baixo custo e alta eficiência na degradação dos compostos recalcitrantes. Igualmente, a oxidação de compostos orgânicos, por via de ultrassons, tem sido uma solução a considerar devido à rápida taxa de degradação dos contaminantes químicos, bem como o tratamento eletroquímico com vista à destruição de compostos tóxicos e orgânicos biorefratários. Neste último, a oxidação anódica e a electro-oxidação indireta são as técnicas mais utilizadas na mineralização desses poluentes. Em alguns casos poder-se-á considerar a combinação destas técnicas por forma a maximizar o efeito pretendido (Babuponnusami and Muthukumar, 2014; Ebrahiem et al., 2017).

Como anteriormente referido descreve-se no relatório *PPI - Potencial de aplicação da energia solar térmica de concentração aos processos de depuração de águas residuais e de tratamento de resíduos sólidos urbanos* (Mantilla et al., 2018), os aspetos mais relevantes sobre esta temática.

2.1. Métodos de secagem térmica

No processo de depuração de águas residuais verifica-se a formação de um resíduo (lamas de depuração) que devido às suas características físicas e químicas necessita de ser submetido a um processo de secagem.

Esta secagem pode ocorrer por via de três métodos nomeadamente a secagem convectiva, a secagem condutiva ou a secagem solar. Na secagem convectiva, três fases podem ser encontradas nomeadamente a fase de adaptação, fase de taxa de secagem constante e fase de taxa de secagem decrescente. Na fase de secagem condutiva, outros aspetos são tidos em conta, nomeadamente a agitação mecânica constante por forma a renovar o contacto entre a superfície de aquecimento e o produto a secar de modo a manter constante o coeficiente de transferência de calor entre as paredes. Durante este processo a lama passa por três fases distintas: fase húmida, fase viscosa e fase granular.

No entanto e considerando a opção de secagem solar, questões relativas com a variabilidade das condições operatórias que dependem das condições climatéricas (p. ex. radiação solar e temperatura e velocidade do ar) têm de ser devidamente acauteladas uma vez que podem influenciar significativamente a cinética de secagem (alteração das características finais do produto tendo em vista a sua posterior aplicação/valorização).

A seleção do tipo de secador a considerar deverá ter em conta as características iniciais da matéria a secar, as especificações finais requeridas para os produtos bem como as condições de operação. De acordo com as condições de transferência de calor e massa, os métodos de secagem podem ser classificados como sendo:

- a) Sistemas diretos (tambor rotativo, leito fluidizado, tapete de atomização);
- b) Sistemas indiretos (camada fina, disco rotativo e pás rotativas);
- c) Sistemas combinados (combinação de sistemas diretos com indiretos).

No primeiro caso, secadores diretos, verifica-se um contacto direto e intensivo entre o fluido de transferência de calor e o produto a secar (secagem por convecção), sendo também este o fluido responsável pela transferência de massa de água existente. No segundo caso, secadores indiretos, o material a secar está separado do fluido de transferência de calor por uma superfície intermédia (secagem por condução), sendo o calor transferido para o material por condução através de uma superfície de transferência de calor e, por conseguinte, o fluido de transferência de calor não é responsável pela transferência de massa de água, não estando em contacto direto com o produto a secar (Mendes, 2003).

Os secadores combinados, também referidos por especiais, apresentam a particularidade de combinarem as características dos dois sistemas. Neste caso, a secagem ocorre em simultâneo através do aquecimento das paredes circundantes como também através do contacto direto entre o fluido de transferência de calor e o material a secar. O vapor de água formado no processo de secagem é posteriormente arrefecido e recuperado em forma de condensado.

a) Secadores de contacto direto

Nos secadores de contacto direto o fluido de transferência de calor (gases quentes) está em contacto direto com o produto a secar, sendo este processo uma secagem por convecção forçada. Este tipo de secadores apresenta, normalmente, como condições de operação altas temperaturas. Estas condições por vezes constituem um problema devido ao acréscimo do risco de explosão resultante da formação de pó de lamas na atmosfera envolvente. Deste modo, a utilização de secadores convectivos requer equipamento específico para limpeza do ar e desodorização.

A principal vantagem da secagem direta sobre a secagem indireta centra-se na obtenção de partículas mais consistentes e uniformes no produto final. Como desvantagem apresentam uma poluição significativamente mais elevada devido às emissões gasosas produzidas conterem poeiras e compostos voláteis. Para estas situações é necessário proceder à recirculação da lama seca, fator esse dependente do seu grau de desidratação.

As tecnologias que se encontram na categoria de secadores de contacto direto são as seguintes:

1. Secadores pneumáticos (secadores instantâneos);
2. Secadores rotativos ou de tambor;

3. Secadores de leito fluidizado.

b) Secadores indiretos

Nos secadores de contato indireto a secagem é feita principalmente por condução. Como vantagens poder-se-á salientar a redução do odor, o risco de formação de poeiras e a redução de emissões gasosas poluentes (não necessitam de recirculação da lama seca).

Na categoria dos secadores indiretos podemos encontrar os seguintes tipos:

1. Secadores de pás;
2. Secadores de tambor rotativo;
3. Secadores de disco;
4. Secadores de prateleira.

Atualmente existem no mercado uma grande variedade de equipamentos de secagem. Uma breve revisão dos equipamentos existentes e das suas principais características principais pode ser consultada no Anexo I.

Secagem de lamas

De acordo com informação publicada (Bennamoun and Arlabosse, 2013), na secagem de lamas podem ser utilizados secadores de convecção, em sistemas de aquecimento direto ou indireto, através da utilização dos produtos provenientes da combustão de diversos combustíveis (origem fóssil, biomassa e biogás), diferentes tipos de permutadores de calor ou, ainda, a combinação destes sistemas térmicos. Considerando que o consumo específico de energia depende do sistema de secagem, estes autores referem ainda que a taxa de secagem específica pode variar de $0,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (para métodos de secagem convectivos) considerando um secador de atomização, até $30 \text{ kg.m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para o caso de um sistema de secagem de tapete.

Atualmente e do ponto de vista económico, a gestão de uma ETAR prevê a redução do volume e massa de lamas a tratar bem como a sua posterior recuperação para valorização diversa. Tendo em conta estes aspetos, tem-se como objetivo a produção de uma lama substancialmente mais seca, cujos teores de humidade devem ser inferiores a 10% (m/m).

A velocidade de secagem das lamas de ETAR e lixiviados provenientes de RSU depende diretamente dos seguintes fatores:

- Temperatura de secagem e humidade do ar;
- Velocidade e a direção do fluxo de transportador de calor;
- Área de superfície descoberta (superfície de contato com a fonte de calor);
- Constituição e composição do material a secar;
- Tempo de retenção do material no sistema de secagem;
- Características/tipo do processo de secagem.

Na Tabela 1 são resumidos os métodos de secagem aplicados à secagem de lamas, as suas principais características bem como as vantagens e desvantagens que estes apresentam.

Tabela 1 - Métodos de secagem aplicados a lamas – vantagens e desvantagens, consumo específico e taxa de secagem específica. Adaptado de (Bennamoun et al., 2013).

| <i>Método de secagem</i> | <i>Vantagens</i> | <i>Desvantagens</i> | <i>Consumo específico (kWh_t⁻¹)</i> | <i>Taxa de secagem específica (kg m⁻²h⁻¹)</i> |
|--------------------------|--|--|---|--|
| Convectiva | Design que permite uma fácil operação Produto final seco de aplicação agrícola | Tempo de secagem relativamente longo Emissões gasosas (odores) | Secador de tapete (700 a 1140) | Secador de tapete (5 a 30) |
| | | | Secador de tambor (900 a 1100) Secador de atomização (1200 a 1400) | Secador de tambor (3 a 8) Secador de atomização (0,2 a 1) |
| Condutiva | Nenhuma poluição no sistema de transmissão de calor Baixa emissão de odores Concentração de COV ⁽¹⁾ reduzida Redução dos riscos de incêndio e explosão Produto seco com potencial para aplicações industriais | Tempo de secagem relativamente longo A fase viscosa da lama altera a eficiência do secador | Secador de disco (855 a 955) | Secador de disco (7 a 12) |
| | | | Secador de pá (800 a 885) Secador de película fina (800 a 900) | Secador de pás rotativas (15 a 20) Secador de película fina (25 a 35) |
| Solar Direto | Fonte de energia gratuita Lamas livres de agentes patogénicos Produto final seco de aplicação agrícola Permite secar grandes quantidades durante a mesma operação | Dependente da variação das condições climáticas Tempo de secagem relativamente longo Requer grande superfície de coletores | 30 a 200 (podendo atingir valores na ordem dos 1000) | --- |
| Vapor Sobreaquecido | Ausência de emissão de partículas Ausência de emissões voláteis Eliminação de agentes patogénicos Tempos de secagem relativamente curtos Baixo consumo de energia | Requer altas temperaturas de operação | --- | --- |

⁽¹⁾ COV – Composto orgânico volátil

2.2. Família de secadores industriais

Na Tabela 2 é apresentada uma breve descrição das principais características dos secadores usados na secagem de resíduos com humidade bem como as gamas de temperaturas de operação, o teor de matéria seca à entrada e, ainda, os consumos específicos de energia.

Tabela 2 - Análise comparativa dos diferentes tipos de secagem (secadores).

| <i>Tambor por convecção</i> | <i>Condução rotativa</i> | <i>Bandeja vertical</i> | <i>Banda</i> | <i>Camada fina ou mista</i> | <i>Leito fluidizado</i> |
|---|---|--|---|---|--|
| Principais Características | | | | | |
| Calor transferido por uma corrente de ar pré-aquecido, em contato direto com a lama | Tambor horizontal no interior no qual o fluxo de gás passa pelo cilindro juntamente com o material a secar. | O material cai através de bandejas metálicas sucessivas e aquecidas por condução no interior | O material é tratada e depositada numa correia perfurada, exposta a um fluido de transferência de calor (corrente de gases quentes) orientados perpendicularmente | Secagem parcial por contato com superfície aquecido (2/3) e secagem por convecção com ar pré-aquecido circulando dentro do tambor (1/3) | Secagem por convecção, por via de uma corrente de gás quente (recipiente de secagem) |
| Temperatura (°C) | | | | | |
| 300-500 | 100-130 | 100-130 | 55-70 | 200-270 | 80-100 |
| Matéria seca à entrada (%) | | | | | |
| >20 | >20 | >20 | >25 | >5 | >25 |
| Matéria seca à saída (%) | | | | | |
| 90-95 | 90-95 | 90-95 | 85 | 90-95 | 95 |
| Consumo específico de energia (kWh/kg H ₂ O) | | | | | |
| 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,81 – 1,16 | 0,87 |
| Valorização | | | | | |
| Agrícola ou energética | | | | | |

A rentabilidade da secagem de lamas encontra-se dependente da sua utilização final. Se o objetivo das lamas for a valorização agrícola, o grau de secagem que permite a obtenção de uma margem lucrativa deverá ser superior a 60% (em base seca). O mesmo acontece com os sistemas de co-incineração de lamas com resíduos (Flaga, 2003).

A Tabela 3 apresenta o grau de secagem de lamas de acordo com a sua utilização final.

Tabela 3 - Gama de secagem de lamas em função de sua utilização.

| <i>Método de utilização</i> | <i>Grau de secagem</i> | | | <i>Objetivos da secagem</i> |
|-----------------------------|---|---|--|---|
| | <i>30-40%</i> | <i>60-90%</i> | <i>Acima 90%</i> | |
| Agrícola | Não lucrativo (em relação a questões técnicas e económicas) | Rentável | Rentável | Conveniência de transporte e armazenagem. Estabilização e saneamento (acima de 90%) |
| Incineração | Rentável 35-45% em base seca | Não lucrativo (em relação a questões técnicas e económicas) | Rentável (se parte da lama estiver seca e misturada com lama de 35-45% antes de ser enviada a instalação de incineração) | Incineração auto-térmica |
| Co-incineração com resíduos | Não lucrativo (em relação a questões técnicas e económicas) | Rentável | Rentável | Transporte simples, armazenamento e operação da instalação de incineração |

2.3. Vantagens e desvantagens da secagem térmica

Neste subcapítulo são abordadas as principais vantagens e desvantagens do processo de secagem térmica das lamas de ETAR e material derivado do tratamento de RSU de acordo com a informação publicada (David, 2002; Davis, 2002; De Castro, 2002; Galdós Aller, 2001; González Rodríguez, 2001; Perdices, 1999; Permuy Vila, 2002; Pueyo et al., 1999). Note-se que vários destes pontos são característicos da secagem térmica e não exclusivos da utilização de energia solar térmica.

Vantagens

1. Os sistemas mecânicos de desidratação permitem alcançar entre 15 a 35% de matéria seca. Um nível mais alto de secagem requer a quebra da estrutura molecular da lama, seja esta para utilização biológica (compostagem) ou térmica (secagem térmica e incineração). Para a situação de lamas mecanicamente desidratadas (com 20% de matéria seca como um valor médio) a secagem térmica permite reduzir o volume até quatro vezes quando comparada com as lamas desidratadas.
2. A secagem térmica é um processo que permite a estabilização da lama devido à ação do calor. No entanto, quando comparada com os processos de estabilização, a secagem térmica não conduz a uma redução substancial da matéria orgânica volátil presente nas lamas.
3. Elevados níveis de desinfeção são alcançados, na medida em que as altas temperaturas a que a lama é submetida durante o processo de secagem e, em combinação com o tempo de residência dentro do secador, garantem a eliminação ou a inativação dos agentes patogénicos.
4. As instalações tradicionais de secagem ocupam um espaço reduzido comparativamente com a grande capacidade de tratamento que permitem atingir (Perdices, 1999). Note-se, no entanto, que o recurso à utilização de energia solar térmica para produção de calor industrial para secagem necessita de maior de área de instalação quando comparada com os outros sistemas.
5. A água evaporada durante a secagem é condensada e conduzida até o início da estação de tratamento, não só para permitir a redução de lixiviados como também para que os gases de exaustão possam ser tratados antes de serem enviados para a atmosfera.
6. A secagem térmica de lamas conduz a um importante desenvolvimento industrial sendo uma tecnologia atualmente comprovada.
7. A necessidade de energia térmica nos processos convencionais de secagem térmica a altas temperaturas, utilizando combustíveis fósseis, atinge valores na ordem dos 850 *kWh* por tonelada de água evaporada, enquanto a necessidade de energia elétrica ronda valores entre os 70 a 110 *kWh* por tonelada de água evaporada. A secagem solar permite a descarbonização destes processos, aumentando a sua sustentabilidade através da introdução de uma fonte de energia renovável.

8. A temperatura de operação no secador é muito variável, dependendo do mecanismo físico que controla o processo de secagem. A gama de temperaturas pode variar entre os 55 e os 500 °C dependendo do tipo de secador. A secagem térmica permite atingir um teor em matéria seca superior a 85% em todos os casos, podendo ainda atingir valores mais elevados (na ordem dos 95%).

9. A lama seca por via térmica apresenta múltiplas possibilidades de recuperação e/ou disposição final. A sua principal aplicação é, geralmente, sob a forma de fertilizante orgânico, embora também possa ser incinerada ou utilizada em outros sistemas de recuperação de energia.

Desvantagens

1. Elevados custos de investimento e manutenção, muito superiores a outras tecnologias menos intensivas de pós-tratamento de lamas, especialmente no caso de instalações de cogeração associadas.

2. Fatores como segurança e facilidade de operação e manutenção, que são mais difíceis de quantificar e para fazer uma avaliação econômica.

3. Necessidade de um sistema de apoio para garantir a percentagem de secagem desejada em casos especiais

4. Necessidade incluir nestas instalações sistemas de segurança sofisticados, a fim de evitar riscos de incêndio e/ou de explosão por acumulação de poeiras geradas durante o processo.

2.4. Secadores industriais mais adequados na integração das tecnologias de energia solar térmica

Neste subcapítulo será apresentada uma breve descrição dos tipos de secadores convencionais mais comuns e que se consideram como mais adequados à integração das tecnologias de energia solar térmica. De acordo com as condições de temperatura exigidas para cada tipo de secador é identificada a tecnologia de energia solar de térmica mais adequada tendo em conta os seguintes parâmetros operacionais: fluido de transferência de calor e a temperatura de entrada no secador.

No caso dos secadores diretos que usam o ar quente como fluido de transferência de calor - *Heat Transfer Fluid* (HTF), verifica-se a possibilidade de utilização em sistemas cuja temperatura de entrada de ar pode atingir os 650 °C.

Para temperaturas inferiores aos 400 °C, e com recurso a outros fluidos de transferência de calor (diferentes do ar) podem ser usados coletores cilindro parabólicos (CP) ou de tecnologia Fresnel Linear (FL). Nesse caso, no entanto, um permutador de calor nomeado como (HEX HTF ar).

Para sistemas que requerem temperaturas do ar mais elevadas, a opção a adotar seria um sistema recetor central (RC), sistemas esses que são geralmente recetores volumétricos). Nos casos de utilização de ar quente como fluido de transferência de calor verifica-se que o armazenamento de energia térmica é facilitado (em meio sólido) através de um leito de rochas compactadas.

Para os casos em que são utilizados secadores diretos e indiretos usando vapor (sobreaquecido) ou outro HTF, podem ser integrados sistemas cilindro-parabólicos com produção direta de vapor (GDV) para temperaturas até 450 °C, ou sistemas cilindro-parabólicos e refletores lineares de Fresnel integrando um gerador de vapor (HTF-vapor). Para as situações que visam a utilização de secadores indiretos cujo fluido de transferência de calor é o óleo térmico, as tecnologias de concentração solar térmica mais adequadas são os coletores cilindro-parabólicos ou coletores do tipo refletores lineares de Fresnel.

O resumo das tecnologias de concentração solar de média e alta temperaturas que podem ser usadas em processos de secagem é apresentada na Figura 2, tendo em conta o fluido de transferência de calor, a temperatura requerida e a tecnologia mais adequada.

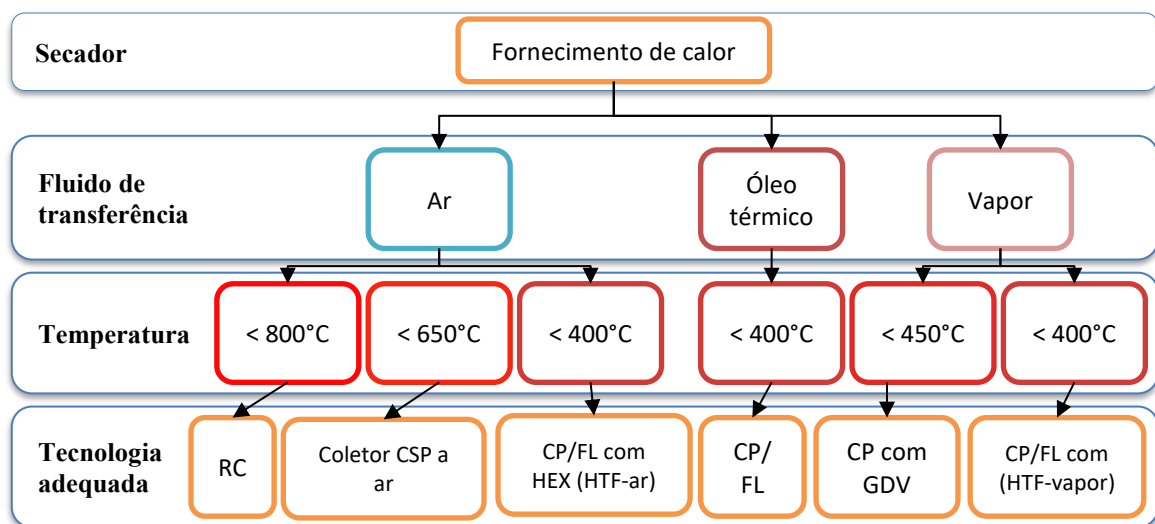


Figura 2 - Identificação da tecnologia de concentração solar térmica mais adequada para integração em processos de secagem. Adaptado de (Crema and Horta, 2014).

A carga térmica ou a dimensão (capacidade) dos secadores são parâmetros igualmente a ter em conta na identificação da tecnologia de concentração solar a implementar. A carga pode variar entre centenas de kW até vários MW. Assim, considera-se que a carga térmica dos processos de secagem depende principalmente da taxa de evaporação exigida para o processo (quantidade de água a ser removida), do tempo requerido e do dimensionamento do secador.

Apresenta-se em seguida e de forma genérica, os diferentes tipos de secadores, as exigências típicas de necessidades térmicas e a tecnologia de concentração solar mais adequada tendo em vista a sua integração tendo em conta a informação publicada por diferentes grupos (Crema and Horta, 2014).

2.4.1. Secadores instantâneos (*Flash Dryers*)

Os secadores instantâneos *Flash Dryers* (Figura 3) igualmente denominados de sistemas de secagem pneumática, são secadores de secagem direta. O material húmido é disperso sob o fluido de transferência de calor (ar ou gás quente) que, por sua vez, permite o seu transporte através de uma conduta ou túnel de secagem. Posteriormente e através de sistemas de separação de partículas (ciclones ou filtros) o material é separado. A temperatura de secagem deve ser a mais elevada possível, sem exceder os limites impostos pelas características térmicas dos equipamentos.

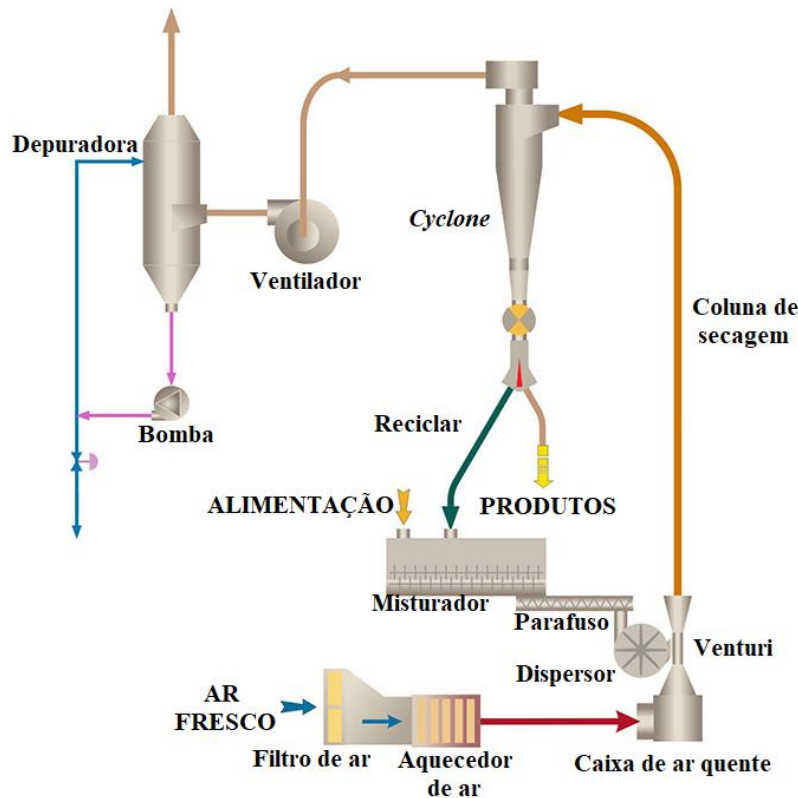


Figura 3 - Diagrama de processo dos secadores instantâneos. Adaptado de (GEA, n.d.).

Tabela 4 - Características técnicas dos secadores instantâneos.

| Tipo de entrada de calor | Meio de secagem/aquecimento | Temperatura de entrada do meio de transferência de calor | Pressão do meio de transferência de calor | Tecnologia CSP adequada |
|--------------------------|-----------------------------|--|---|-------------------------|
| Secagem direta | Ar | 400-600 °C | Pressão atmosférica ou semelhante | CR com recetor a ar |
| | Vapor superaquecido | >230 °C | Alta (25 bar) | CP/FL + HEX GDV |

2.4.2. Secadores de *Spray*

Os secadores do tipo *Spray* (Figura 4 e Tabela 5) são sistemas de secagem diretos que permitem atomizar o material de entrada. Este material é disperso no topo de uma grande câmara de secagem. A secagem ocorre por via térmica, através da formação de gotas que se precipitam no fundo da câmara, sendo as partículas secas separadas posteriormente por ciclones.

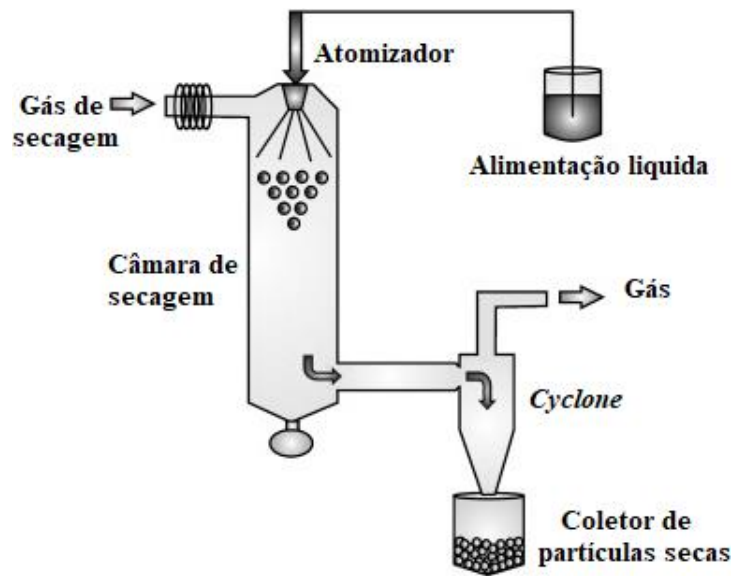


Figura 4 - Diagrama do equipamento e processo de secagem com secador de *Spray*. Adaptado de (Sosnik and Seremeta, 2015).

Tabela 5 - Características dos secadores do tipo *Spray*.

| <i>Tipo de entrada de calor</i> | <i>Meio de secagem/aquecimento</i> | <i>Temperatura de entrada do meio de transferência de calor</i> | <i>Pressão do meio de transferência de calor</i> | <i>Tecnologia CSP adequada</i> |
|---------------------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| Secagem direta | Ar | 200-450  C | Perto da atmosfera | CSP com recetor a ar. CP/FL + HEX |
| | Vapor sobreaquecido | <700  C | Perto da atmosférica | CR (até 550  C) |

2.4.3. Secadores de tambor rotativo

Nos secadores de tambor rotativo (Figura 5 e Tabela 6) o material húmido   seco num tubo cilíndrico rotativo. Neste sistema, o material sólido é transferido pelo efeito combinado do fluxo de ar, da gravidade, da velocidade de rota o e inclina o do escudo.

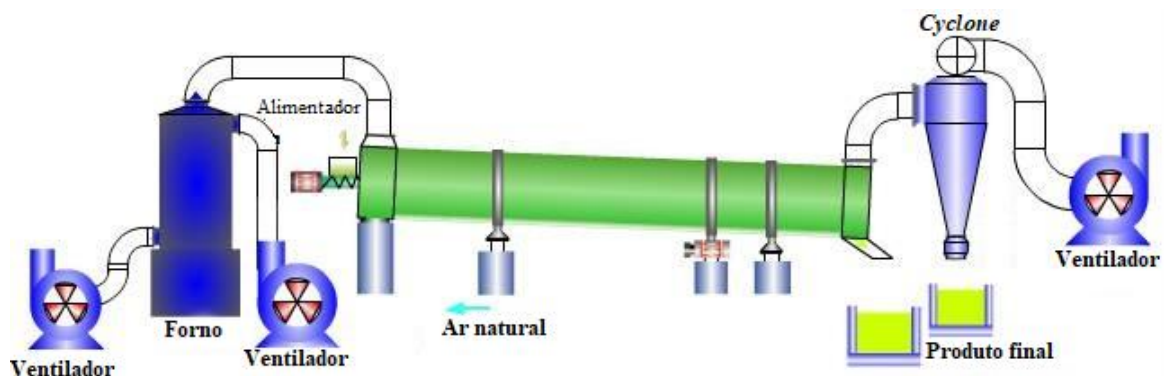


Figura 5 - Processo de secagem com secador de tambor rotativo. Adaptado de (TN-ORIENT, n.d.).

Tabela 6 - Características dos secadores de tambor rotativo.

| <i>Tipo de entrada de calor</i> | <i>Meio de secagem/aquecimento</i> | <i>Temperatura de entrada do meio de transferência de calor</i> | <i>Pressão do meio de transferência de calor</i> | <i>Tecnologia CSP adequada</i> |
|---------------------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| Secagem direta | Ar | 200-600 °C | Pressão atmosférica ou na sua vizinhança | CSP com recetor a ar. CP/FL + HEX |
| | Vapor superaquecido | <300 °C | Baixa ou perto de atmosférica | CP/FL + HEX ou GDV |
| Secagem indireta | Vapor (tubo de vapor) | <300 °C (temperatura da superfície) | Não especificado | CP/FL + HEX ou GDV |
| | Ar / Gases de combustão | Até 700-900 °C | Não especificado | CR com recetor a ar |

2.4.4. Secadores de leito fluidizado

Estes secadores (Figura 6) empregam a fluidização gás-sólido num processo de contato entre duas fases. Primeiro, a fase sólida, sob fluidização é assumida “como um fluido”, e a fase gasosa escoa sobre o leito de partículas a uma velocidade específica por forma a garantir a fluidização. Neste tipo de secador, a secagem ocorre por um mecanismo combinado de transferência de calor e massa. As características dos secadores de leito fluidizado são apresentadas na Tabela 7.

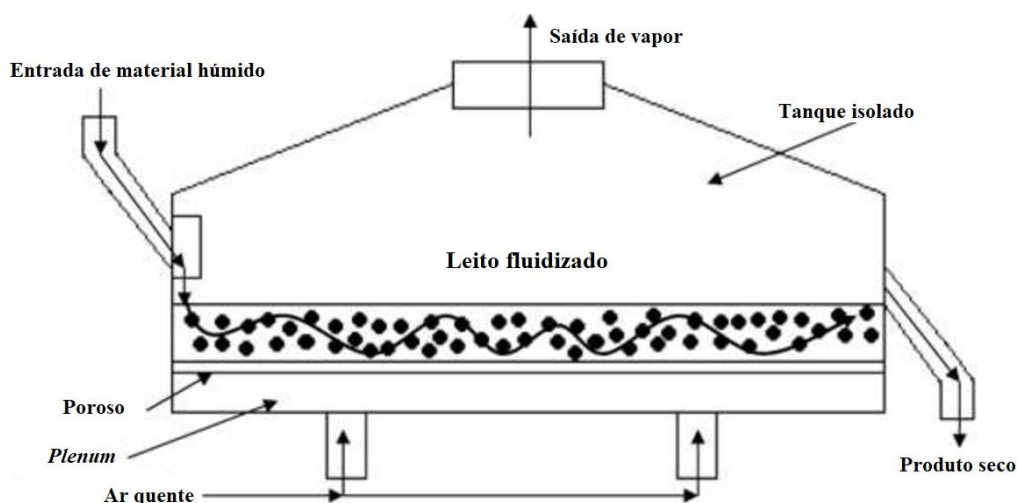


Figura 6 - Conceito de secagem com leito fluidizado. Adaptado de (Murthy and Joshi, 2007).

Tabela 7 - Características dos secadores de leito fluidizado.

| <i>Tipo de entrada de calor</i> | <i>Meio de secagem/aquecimento</i> | <i>Temperatura de entrada do meio de transferência de calor</i> | <i>Pressão do meio de transferência de calor</i> | <i>Tecnologia CSP adequada</i> |
|---------------------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| Secagem direta | Ar | 100-600 °C | Pressão atmosférica ou na sua vizinhança | CSP com recetor a ar. CP/FL + HEX |
| | Vapor sobreaquecido | 50-360 °C | Pressão atmosférica ou na sua vizinhança (<5bar) | CP/FL + HEX ou GDV |
| Secagem indireta | Vapor | <300 °C (temperatura da superfície) | Não especificado | CP/FL + HEX ou GDV |

2.4.5. Secadores de impacto

Na Tabela 8 são apresentadas as características dos secadores de impacto (Figura 7). Estes sistemas utilizam o impacto rotativo para promover a quebra dos materiais aglomerados num tubo de arrasto vertical.

A maioria dos materiais de alimentação húmidos podem ser introduzidos diretamente no secador de impacto. Na entrada do secador, o material de alimentação é exposto aos gases quentes, e a humidade superficial é rapidamente evaporada. A alimentação é arrastada para dentro do secador por via dos gases quentes. A humidade evapora-se à medida que o material passa pelo sistema.

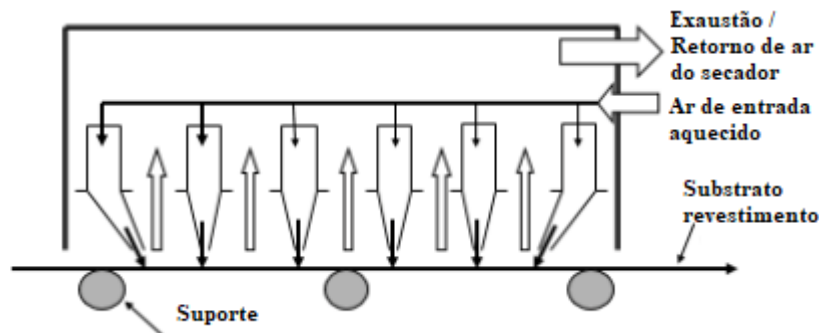


Figura 7 - Esquema do bocal do secador de impacto. Adaptado de (Chemical Process Engineers, n.d.).

Tabela 8 - Características dos secadores de impacto.

| <i>Tipo de entrada de calor</i> | <i>Meio de secagem/aquecimento</i> | <i>Temperatura de entrada do meio de transferência de calor</i> | <i>Pressão do meio de transferência de calor</i> | <i>Tecnologia CSP adequada</i> |
|---------------------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------|
| Secagem direta | Ar | 100-350 °C | Perto da atmosférica | CP/FL + HEX HTF/ar |
| | Vapor sobreaquecido | >100 °C | Perto da atmosférica | CP/FL + HEX ou GDV |

2.4.6. Secadores "Through"

Estes secadores (ver Figura 8) baseiam-se em sistemas de secagem direta (Tabela 9). Neste tipo de sistemas verifica-se a existência de um diferencial de pressão entre o material húmido poroso e a corrente de ar quente de secagem que passa através do material. Estes secadores são semelhantes aos secadores de impacto e rotativos.

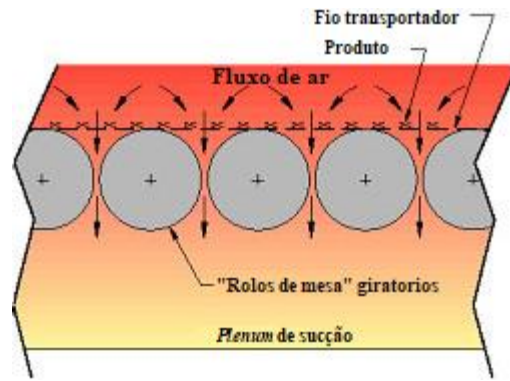


Figura 8 - Esquema da secagem com secador "Through". Adaptado de (GLENRO, n.d.).

Tabela 9 - Características dos secadores tipo "Through".

| Tipo de entrada de calor | Meio de secagem/aquecimento | Temperatura de entrada do meio de transferência de calor | Pressão do meio de transferência de calor | Tecnologia CSP adequada |
|--------------------------|-----------------------------|--|---|-------------------------|
| Secagem direta | Ar | 150-370 °C | Perto da atmosférica | CP/FL + HEX HTF/ar |
| | Vapor sobreaquecido | >100-180 °C | Perto da atmosférica | CP/FL + HEX GDV |

2.4.7. Secadores de transporte

Nos secadores de transporte (Figura 9) o material húmido é transportado por uma correia de aço (através de um sistema de vibração) por uma câmara onde passa o ar quente. Estes sistemas apresentam igualmente a secagem direta como principal característica (Tabela 10).

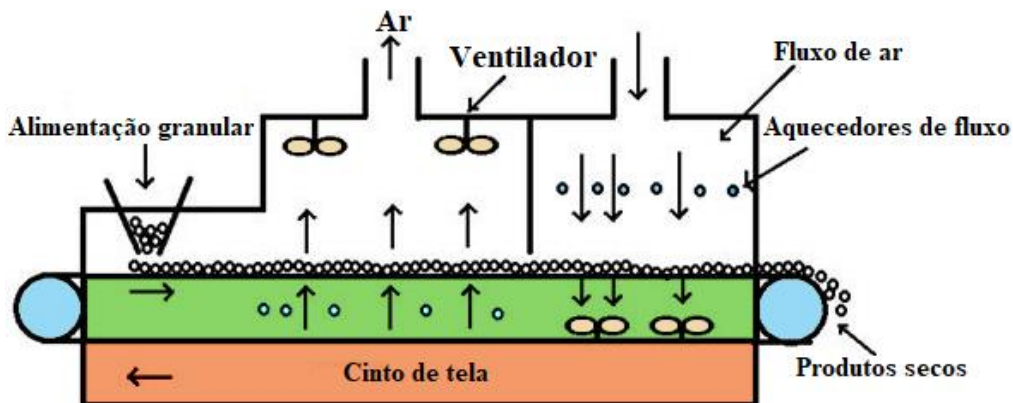


Figura 9 - Secadores de transporte. Adaptado de (NPTEL, n.d.).

Tabela 10 - Características dos secadores com meio de transporte.

| Tipo de entrada de calor | Meio de secagem/aquecimento | Temperatura de entrada do meio de transferência de calor | Pressão do meio de transferência de calor | Tecnologia CSP adequada |
|--------------------------|-----------------------------|--|---|-------------------------|
| Secagem direta | Ar | 50-175 °C | Perto da atmosférica | CP/FL + HEX HTF/ar |
| | Vapor sobreaquecido | >160 °C | média (<5bar) | CP/FL + HEX ou GDV |

2.4.8. Secadores de bandeja

Os secadores de bandeja (Figura 10), também conhecidos como secadores de túneis, são geralmente secadores diretos. O material a secar é colocado em carrinhos ou bandejas, que entram por uma extremidade do túnel e são posteriormente descarregados na outra extremidade (depois de secos) por meio de uma corrente de ar quente. Também existe um tipo de secador de bandejas indireto, no qual o calor é fornecido ao material a secar por via de uma superfície de contato, internamente aquecida por um fluido de transferência térmico (p. ex. óleo ou vapor), as características mais importantes na Tabela 11.

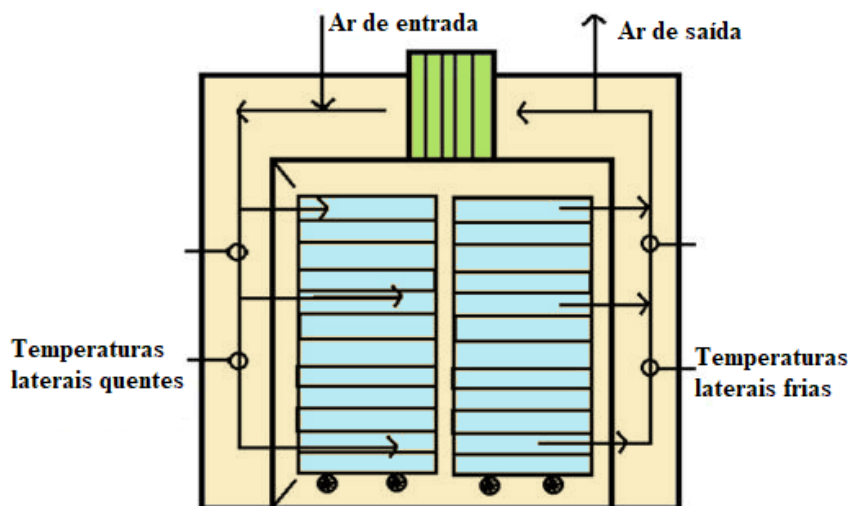


Figura 10 - Princípio de funcionamento do secadores de bandeja. Adaptado de (Pharmawiki, n.d.)

Tabela 11 - Características dos secadores de bandeja.

| <i>Tipo de entrada de calor</i> | <i>Meio de secagem/aquecimento</i> | <i>Temperatura de entrada do meio de transferência de calor</i> | <i>Pressão do meio de transferência de calor</i> | <i>Tecnologia CSP adequada</i> |
|---------------------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------|
| Secagem direta | Ar | 100-200 °C | Perto da atmosférica | CP/FL + HEX |
| Secagem indireta | Vapor /óleo térmico | <300 °C (temperatura da superfície) | Não especificado | CP/FL + HEX ou GDV |

2.4.9. Secador solar tipo-estufa

Este tipo de secador atua como uma estufa (espaço fechado) onde é possível elevar a temperatura do ar de modo artificial. Neste tipo de sistemas, quanto maior a temperatura do ar maior quantidade de vapor de água pode ser transportado. No entanto, a pressão parcial de vapor aumenta com a quantidade de água existente no ar pelo que devem ser utilizados sistemas de ventilação controlada, nomeadamente PLC's (*Process Logical Control*) para um melhor controlo da temperatura e a humidade dentro e fora da estufa.

Os secadores tipo-estufa podem ser concebidos com diferentes especificações nomeadamente:

- Piso radiante;
- Melhor visualização do processo de secagem;

- Zona de temperatura e sem recirculação do produto;
- Secagem por lotes como facilidade de amostragem do produto durante o processo de secagem;
- Sistemas de limpeza e desentupimento de fácil operação.

Com exceção de dias muito húmidos, o processo de secagem tende ainda a ocorrer mesmo com pouca energia do sol.

Dada as características apresentadas por este tipo de secadores, estes podem ser configurados de diferentes formas por forma a melhorar a sua eficiência global. Na Figura 11 são apresentadas algumas alternativas.

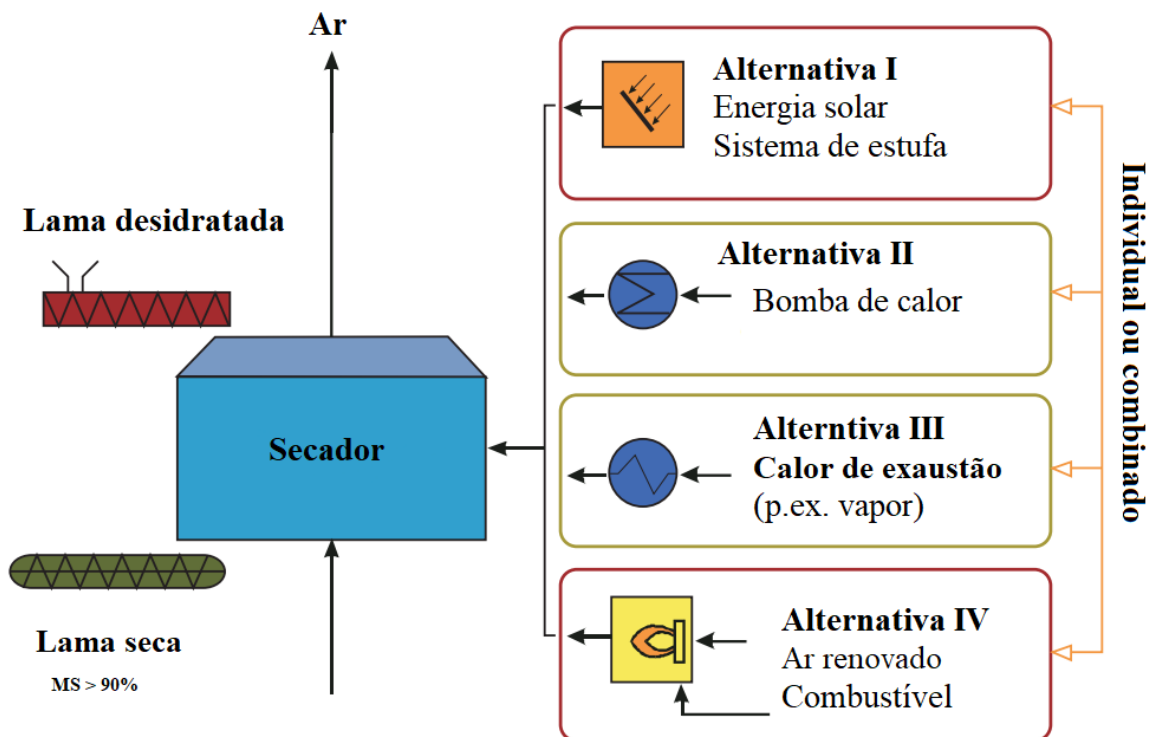


Figura 11 - Secador tipo-estufa com integração de diferentes alternativas. Adaptado de (HUBER Technology, 2001).

No caso da Alternativa I (recurso solar), os secadores tipo-estufa podem ser integrados com sistemas fotovoltaicos (Haque et al., 2019) ou, com coletores CPC (coletores parabólicos compostos) de tubos de vácuo, sendo esta última a tecnologia mais utilizada.

No processo de secagem, a matéria a secar é introduzida por bombagem (desde a zona de armazenamento de lamas até a estufa), sendo posteriormente espalhada no interior da estufa por via de processos mecânicos. No caso dos lixiviados provenientes de RSU, estes podem ser previamente armazenados para posterior integração no secador.

Na Tabela 12 são apresentadas algumas especificidades dos secadores tipo-estufa, sendo a secagem direta a sua principal característica.

Tabela 12 – Principais características dos secadores tipo-estufa.

| <i>Tipo de secagem</i> | <i>Meio de secagem</i> | <i>Temperatura de entrada</i> | <i>Pressão do meio de transferência de calor</i> | <i>Tecnologia CSP adequada</i> |
|------------------------|------------------------|-------------------------------|--|---|
| Directa | Ar e água | 50-120 °C | Não especificado | Não adaptável – Utilizados coletores tipo plano, CPC ou vácuo |

A este tipo de secadores (solar tipo-estufa), pode-se ainda acrescentar um sistema regenerativo. Este sistema funciona na área total da secagem, permite revolver o leito de lamas e, no caso dos processos biológicos, permite uma redução significativa dos odores produzidos. Acresce que este tipo de sistema permite ainda a redução de poeiras resultantes do processo mecânico dado que as lamas ainda se encontram suficientemente húmidas.

Na Figura 12 é apresentado um exemplo deste sistema de secagem. Existem várias entidades que produzem sistemas de secagem, componentes ou protótipos de investigação. Neste caso, poder-se-ão destacar a *Thermo-System*, a *WendeWolf* da IST (IST Anlagenbau GmbH, 1994), a *Heliantis* da Degrémont (Maldonado, 2005) integrado na ETAR da Ponta na ilha de Porto Santo – Portugal (desde 2012) e, ainda, a *KULT* da *HUBER Technology* (Anexo IV).



Figura 12 - Secador tipo-estufa com sistema regenerativo (HUBER Technology, 2001).

No caso dos componentes alguns fabricantes nacionais apresentam: o sistema híbrido *Black Block* utilizado para desidratar alimentos e produtos agroindustriais, o *Bubble Dryer* da Chatron e o *DryEcoMate* (Garcia et al., 2018) cujos modelos se resumem no Anexo IV.

O projeto de investigação SECMAD (Loureiro et al., 2008) desenvolvido pelo INETI, utilizou um secador tipo-estufa com ventilação natural e mecânica com um sistema de instrumentação e controle, responsável pela otimização das condições de ambientais externas e internas do secador.

2.5. Condições de valorização de resíduos

Os resíduos sólidos urbanos encontram-se regulamentados desde 2007, através do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos II (PERSU II, Portaria n.º 187/2007), como ação da política nacional de gestão de resíduos abrangendo o horizonte temporal entre 2007-2012 e de integração das diretivas comunitárias relativamente à justificação da

aplicação em aterro dos resíduos urbanos biodegradáveis e do incentivo e regulamentação da reciclagem e valorização de resíduos de embalagens (MAOTDR, 2007).

Como complemento do PERSU II, foi publicado em 2009 uma estratégia nacional tendo em vista incentivar a preparação da fração resto dos resíduos sólidos e a promoção da sua utilização numa matriz industrial, designada “Estratégia para os Combustíveis Derivados de Resíduos -CDR” (Despacho 21295/2009) (MAOTDREI, 2009).

Dando continuidade à estratégia nacional de RSU, foi aprovado em 2014 o “Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos” compreendendo a meta até 2020 (PERSU 2020, Portaria n.º 187-A/2014) (MAOT, 2014). O PERSU definiu diversos objetivos, reforçando a orientação do PERSU II, no que diz respeito o incremento da preparação para reutilização, da reciclagem e da qualidade dos recicláveis, a eliminação progressiva da deposição de resíduos em aterro e o aumento do contributo do setor para outras estratégias e planos nacionais.

No âmbito do contributo do sector dos RSU em relação a outras estratégias nacionais, concretamente relacionadas com as metas definidas no “Plano Nacional para as Alterações Climáticas – PNAC” (PNAC 2020/2030), foi também considerado no PERSU o incentivo à substituição de combustíveis fósseis por CDR produzidos a partir de RSU. No PNAC 2020/2030 estão definidas como medidas, entre outras, o aumento da percentagem de utilização de combustíveis alternativos no mix energético das indústrias transformadoras, a promoção da penetração de fontes de energias renováveis e no sector dos resíduos a criação de condições para o escoamento e valorização económica dos CDR e a contribuição para o cumprimento das emissões de GEE, promovendo a substituição de combustíveis fósseis por CDR.

2.5.1. Valorização agrícola de lamas de ETAR

a) Portugal

A valorização agrícola de lamas de ETAR encontra-se regulamentada a nível nacional desde 2009 pelo Decreto-Lei n.º 276/2009, estabelecendo o regime de utilização de lamas de depuração provenientes de ETAR domésticas, urbanas e de outras ETAR de composição similar, ou a mistura de lamas constituída exclusivamente a partir deste tipo de resíduos.

O referido diploma aplica-se à utilização em solos agrícolas destes tipos lamas (ETAR) incluindo a obrigatoriedade do produtor ou operador requer uma autorização para aplicação no solo num determinado perímetro de intervenção sujeita à implementação dum Plano de Gestão de Lamas (PGL) aprovado pela Direção Regional de Agricultura e Pescas (DRAP) em função do local de valorização agrícola (DRAP), com parecer favorável da CCDR e da ARH territorialmente competentes, com o objetivo de promover a sua correta utilização e controlar os efeitos nocivos para a saúde pública, a rede hidrográfica, e o ecossistema relacionado como o meio agrário (APA, 2014).

Ao abrigo do Decreto-Lei n.º 73/2011, é da competência da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) territorialmente competente, o licenciamento da atividade de valorização agrícola de lamas exercida por operadores com capacidade técnica comprovada e que sejam titulares de alvará para operações de valorização agrícola de lamas de depuração. nos termos de legislação específica nacional. Consoante o tratamento a efetuar às lamas de ETAR, assim se adequa um regime especial de licenciamento, ajustado ao PGL e à área de espalhamento, devendo o produtor ser titular de alvará para a armazenagem e ou tratamento de lamas.

Apenas é permitida a utilização em solos agrícolas, as lamas que cumpram os valores limite de metais pesados, compostos orgânicos e micro-organismos, devendo ainda ser tido em consideração que a sua introdução em solos cultivados não pode ultrapassar os valores limite de concentração anualmente previstos regulamentarmente, sendo obrigatória a realização periódica de análises às lamas e aos solos por laboratórios acreditados. O Decreto-Lei n.º 276/2009 estabelece que as lamas com teor em matéria seca (MS) inferior a 20% devem ser imediatamente injetadas no solo, ou espalhadas no terreno e ser incorporadas no solo no prazo máximo de 24 horas (eliminação), no caso do uso das lamas na valorização agrícola devem ser considerados os valores limite de concentração de (mg/kg de MS) relativos a metais pesados compostos orgânicos e dioxinas e microrganismos.

A partir de 2015 o Ministério da Agricultura e do Mar e a Secretaria de Estado do Ambiente (Despacho n.º 8400 –22/07/15) criou a Comissão Técnica de Acompanhamento da Diretiva Lamas (CTADL), um órgão nacional de natureza consultiva que congrega os diferentes interesses em torno da valorização agrícola de lamas integra, a credibilização da operação de valorização de resíduos e agilização do regime em vigor, diversos representantes de organismos oficiais de gestão, investigação e de ordenamento do território deste fluxo de resíduos que permita o seu maior controlo.

b) Espanha - Andaluzia

A regulamentação das lamas na Andaluzia foi estabelecida a partir de 1993 de acordo com (Junta de Andalucía, 2018):

“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 un 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. TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO SOLAR TÉRMICA PARA PROCESSOS DE SECAGEM

A energia solar é uma fonte inesgotável, de grande interesse e aplicabilidade sendo uma alternativa às fontes de energia tidas como “não renováveis” ou convencionais. As principais tecnologias que permitem a captação e conversão da radiação solar em energia térmica são apresentadas em seguida.

O principal componente de um sistema de energia solar é o coletor. O coletor solar mais simples é composto por uma superfície negra absorvente onde circula um fluido de modo a permitir a extração do calor produzido pela absorção da irradiação solar.

A seleção do tipo de coletor mais apropriado para um determinado processo depende principalmente da temperatura de operação desejada e das condições climatológicas. A eficiência de um determinado coletor solar diminui na medida em que a temperatura do fluido aumenta ou a radiação solar disponível diminui.

As tecnologias solares podem ser classificadas de forma geral pelo seu nível de temperatura de operação típico, existindo três classes: baixa temperatura; média temperatura; alta temperatura, bem como as características de utilização. A Tabela 13 resume as características das principais tecnologias solares, segundo o tipo, gama de temperatura e utilização típica.

Tabela 13 - Algumas características das tecnologias solares, segundo o tipo.

| <i>Tipo de tecnologia</i> | <i>Gamas de temperatura</i> | <i>Usos</i> |
|---------------------------|-----------------------------|--|
| Baixa temperatura | < 100 °C | Obtenção de água quente sanitária e água ou ar quente para aquecimento de edifícios ou processos industriais de baixa temperatura |
| Média temperatura | 100 – 400 °C | Produção de vapor para processos industriais, secagem, produção de energia elétrica em pequena escala, fotocatalise, dessalinização de água do mar e refrigeração por absorção |
| Alta temperatura | >= 400 °C | Para produção de eletricidade em grande escala |

Existem diversas bases de dados que podem ser consultadas para obter informações específicas sobre os coletores disponíveis no mercado. Para coletores planos e de tubo de vácuo recomenda-se a consulta da base de coletores da *Solar Keymark* (Solarkeymark, 2019). Para coletores concentradores na gama de média temperatura recomenda-se a consulta da base de dados do projeto STAGE-STE (STAGE-STE, 2015).

3.1. Coletores solares planos (baixa temperatura)

Os sistemas solares térmicos podem utilizar diversas tecnologias de aproveitamento da energia solar térmica por intermédio de coletores solares que podem ser do tipo plano, CPC, tubo de vácuo ou concentrador parabólico. Os coletores do tipo plano e CPC são particularmente usados em aplicações de baixa temperatura (< 100 °C), como o aquecimento de piscinas, a preparação de água quente sanitária, aquecimento central ou fornecimento de calor de processo industrial. De acordo com o meio fluido utilizado para a conversão de calor podem os coletores funcionar a ar ou água.

Os coletores planos a ar apresentam menor eficiência em relação aos coletores a água, principalmente devido à reduzida capacidade térmica do ar. São mais usados em configurações de sistemas solares passivos em edifícios ou em sistemas ativos de climatização e secagem. Não são associados, normalmente ao armazenamento em reservatórios, mas podem ser combinados com sistemas regenerativos de leito de pedras ou materiais de mudança de fase ou atuar como fonte fria de uma bomba de calor ar-água de baixa temperatura, cuja aplicação depende muito da competitividade do custo de operação face a outros equipamentos.

Os coletores solares a água, podem incorporar diversas configurações técnicas em função dos sistemas solares térmicos a que estão associados, podendo ser classificados em três grupos de acordo a gama de temperatura e a geração de calor: coletores planos com ou sem cobertura e com tubos de vácuo (Tabela 14).

Tabela 14 - Configurações técnicas de coletores solares a água. Fonte (LNEG, 2016)

| | Coletores com cobertura | Coletores sem cobertura | Coletores de tubo de vácuo |
|-----------------------------------|---------------------------|---|---|
| Temperatura de operação (°C) | 50 – 100 | 25 – 50 | 120 |
| Aplicações principais | AQS, aquecimento ambiente | Piscinas, aquecimento ambiente, pré-AQS | AQS, aquecimento ambiente, arrefecimento solar, processo industrial |
| Produção de energia (kWh/m^3) | 400 – 600 | 300 – 350 | 480 – 650 |
| Custo de operação ($€/m^2$) | 370 | 220 | 880 |

O coletor solar térmico é o componente que converte a irradiação solar em energia térmica útil e sendo composto por uma cobertura em vidro tem a função de produzir o efeito de estufa, reduzir as perdas térmicas por convecção e atribuir ao conjunto a durabilidade necessária e a proteção das intempéries. A configuração típica do coletor solar plano com cobertura inclui uma placa absorvedora, constituída pela chapa associada a um conjunto de tubagens, tem a função de absorver a radiação em calor útil e transmitir ao fluido de circulação. Na parte posterior e nas laterais do conjunto é incorporado isolamento térmico que tem a função de limitar as perdas de energia térmica. A caixa exterior do coletor, geralmente metálica, tem a função de assembler todos os componentes, conferindo resistência mecânica no transporte e instalação e durabilidade e fiabilidade no seu funcionamento e manutenção.

Os coletores solares planos com cobertura atingem temperaturas típicas na ordem dos 80 °C (Guerra, 2015). variando o seu rendimento térmico entre 40 a 60% nesta gama de temperatura. Para aplicações onde são necessárias temperaturas superiores, tipicamente até 120°C, essencialmente como sistema de pré-aquecimento (vapor, por exemplo), deverão ser utilizados coletores planos dotados de superfície absorvedora seletiva e bom isolamento com configuração do tipo CPC ou tubo de vácuo. Na Figura 3 pode-se observar um esquema com a configuração e os componentes de um coletor solar plano.

Os coletores solares planos representam a maior parte das instalações de sistemas solares térmicos para edifícios (Figura 13) na preparação de água quente sanitária (AQS). Permitem um fácil armazenamento de AQS em depósitos isolados existentes nas instalações, são economicamente rentáveis e importantes para a reduzir a dependência da energia consumida derivada de combustíveis fósseis.

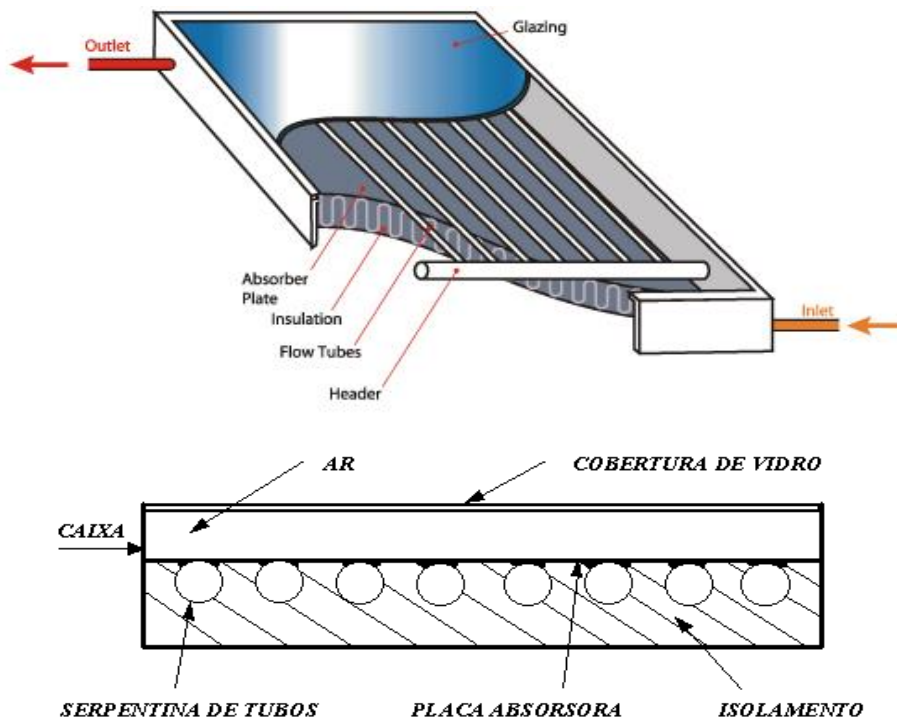


Figura 13 - Configuração tipo dum coletor solar plano. Fonte: LNEG



Figura 14 - Coletor solar plano com absorvedor seletivo. (Fonte: LNEG).

3.2. Coletores de tubo de vácuo (baixa-média temperatura)

Este tipo de coletor solar apresenta uma configuração técnica que possibilita atingir temperatura de operação mais elevada relativamente ao coletor solar plano, entre os 130 a 150°C. É composto por uma grelha de tubos de vácuo transparente, localizando-se no interior de cada conjunto o absorvedor e a tubagem com o fluido de transferência de calor (água ou fluido térmico). A configuração do tubo reduz significativamente as perdas por condução e convecção, permitindo um aumento do rendimento térmico. A grelha de tubos

de calor está ligada a um distribuidor localizado no topo por onde circula o fluido de circulação, que se interliga entre outros coletores no sistema de aquecimento.

Os coletores de tubo de vácuo distribuem-se em duas classes, em função do processo utilizado na transferência de energia térmica para o fluido de circulação:

- Os sistemas de fluxo direto: o fluido de circulação movimenta-se nos próprios tubos de vácuo, existindo uma ligação direta entre estes e o distribuidor;
- Os sistemas de tubo de calor (*heat pipe*): utiliza um fluido secundário em circuito fechado que através do absorvedor segue o ciclo de transferência térmica de evaporação-condensação através do fluido de trabalho no tubo distribuidor.

Os coletores do tipo tubo de vácuo podem exibir refletores estacionários que incrementam a radiação incidente no absorvedor e permitem um melhor desempenho para temperatura de processo mais elevada. Os coletores de tubo a vácuo (Figura 15) são recomendados quando as condições climáticas são mais exigentes (Silván and Silva, 2015).



Figura 15 - Coletor de tubo de vácuo. (Fonte: LNEG).

3.3. Coletores com concentrador parabólico composto - CPC (baixa-média temperatura)

O modelo de coletor solar concentrador parabólico composto (sigla CPC) é uma tecnologia intermédia entre o coletor solar plano e o de tubo de vácuo. O princípio do coletor solar CPC consiste em minimizar a área do absorvedor em relação à área de abertura do coletor à radiação solar, reduzindo assim as perdas de calor típicas de um coletor plano, uma vez que estas são proporcionais à área do absorvedor.

Por outro lado, a configuração parabólica truncada do refletor permite a captação da radiação solar dentro de um certo ângulo da abertura do coletor, através de múltiplas reflexões do percurso ótico (Aiguasol, 2002). O design de cada modelo de coletor CPC passa por um processo de investigação e otimização numérica (*ray-tracing*), segundo a disciplina da ótica não produtora de imagem (*non-imaging optics*) (Winston et al., 2005). Esta configuração parabólica do refletor, está associada a configurações construtivas de modelos de coletores planos (Figura 16) e de tubo de vácuo (Figura 17).

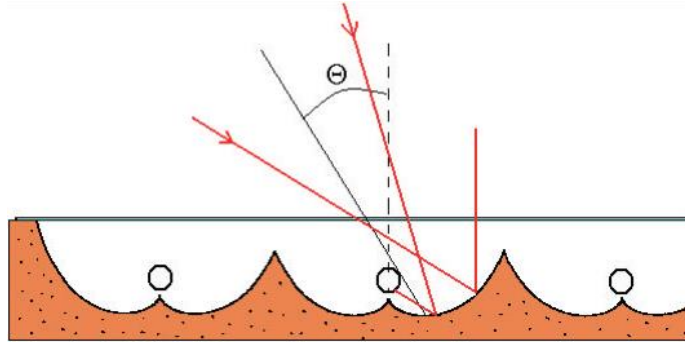


Figura 16 - Configuração parabólica truncada do refletor do coletor tipo CPC. (Winston et al., 2005).



Figura 17 - Configuração do Refletor CPC aplicado num coletor de tubos de vácuo. (Fonte: CENTA).

O amplo ângulo de captação deste tipo de coletor permite a captura da irradiação direta e de parte da irradiação difusa, dependendo esta do ângulo de aceitação do CPC. Por outro lado, a baixa concentração típica destes sistemas permite a sua utilização de forma estacionária, sem necessidade de utilização de sistemas de seguimento (Figura 18).



Figura 18 - Instalação de sistema solar coletivo com utilização de coletor solar do tipo CPC, na configuração de circulação forçada . (Fonte: LNEG).

As instalações solares térmicas exibem diversas configurações tecnológicas cujo rendimento, materiais e durabilidade às condições atmosféricas mais severas, dependem fundamentalmente da certificação de qualidade dos coletores solares. A *Solar Keymark* (ESTIF, 2016) é a primeira marca de qualidade reconhecida internacionalmente segundo a CEN/CELEC para os produtos solares térmicos produzidos em conformidade com os padrões europeus de gestão da qualidade e que cumpram as normativas EN 12975 e EN 12976. O *Solar Keymark* visa reduzir as barreiras comerciais e promover o uso de produtos solares térmicos de alta qualidade no mercado europeu sendo cada vez mais reconhecido como padrão de qualidade em todo o mundo.

3.4. Coletores cilíndricos parabólicos (média temperatura)

O desenvolvimento de tecnologias de concentração solar foi impulsionado nos anos 80 pela criação de centros produtores de eletricidade por via solar (STE), estabelecendo as bases tecnológicas para atividades de investigação e desenvolvimento de produtos. Esta linha de inovação foi conduzida pela tecnologia de coletor concentrador parabólico (*Parabolic Trough Collector - PTC*) e, mais recentemente, pelo conceito de concentração com foco linear, como a tecnologia do tipo refletor linear Fresnel (FL). Fazendo uso do seguimento solar, num eixo ou dois eixos, os coletores PTC usam eficientemente a componente direta da radiação solar (*DNI*) mas não aproveitam a radiação solar difusa.

O coletor concentrador parabólico (PTC) é um sistema de concentração de foco linear com seguimento solar, cuja geometria permite a reflexão de qualquer raio incidente paralelo ao eixo de modo a convergir no foco de parábola. Dependendo do sistema de absorção de radiação solar e do fator de concentração, pode ser adequado para as faixas de média temperatura entre 100°C e 250°C. Permite o seguimento (*tracking*) em torno do eixo longitudinal (onde está localizado o absorvedor) e pode exibir o acoplamento de diversos tipos de absorvedor com diversos fluidos térmicos de circulação (Horta, 2015).

O concentrador do tipo refletor linear de Fresnel (LFR) é um sistema de concentração de foco linear com seguimento solar, cuja geometria está baseada no princípio de Fresnel de divisão da parábola em distintos segmentos deslocados do plano horizontal. No LFR são utilizados múltiplos espelhos individuais num sistema de seguimento de um único eixo em torno do eixo longitudinal. Dependendo do sistema de absorção de radiação solar e do fator de concentração, pode ser adequado para as faixas de média temperatura entre 100°C e 250°C. Permite o seguimento (*tracking*) em torno do eixo longitudinal e precisa de um concentrador secundário localizado em torno do absorvedor para incremento da eficiência ótica do processo.

A seleção da tecnologia de concentração solar mais adequada está dependente da temperatura de operação das perdas térmicas do coletor solar, diretamente relacionada à temperatura das necessidades de calor e associada à estratégia de integração solar adotada na definição do layout do sistema: calor de processo ou nível de abastecimento (Muster, 2015).

Assim, para definição das tecnologias mais adequadas às condições operacionais do projeto térmico, deve-se tomar em consideração o nível de exigência de temperatura de processo em diferentes setores industriais (Lauterbach et al., 2012), assim como a gama mais

adequada de temperaturas de operação das diferentes tecnologias de coletores, conforme pode ser resumido na Figura 19 (considerar em complemento a informação referida na Figura 2).

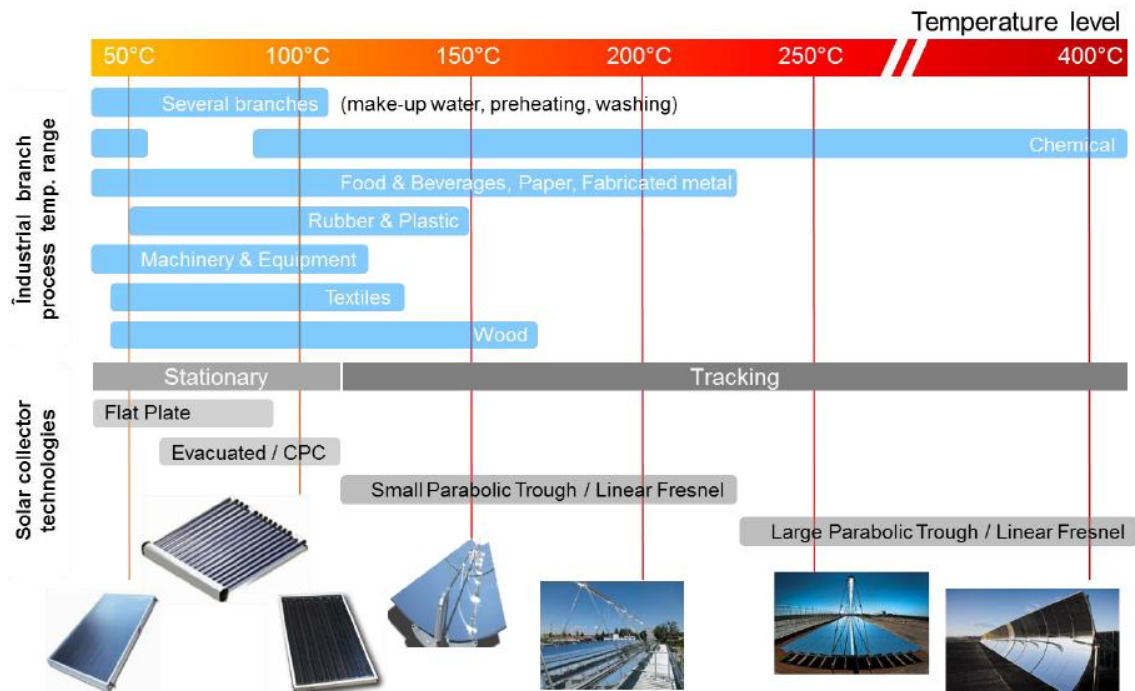


Figura 19 - Tecnologias de coletores solares estacionários e com seguimento solar, em função da temperatura de operação e da gama de temperatura do processo em diferentes setores industriais. (Horta, 2015)

Os concentradores cilindro parabólico apresentam um baixo coeficiente de perdas térmicas, sendo particularmente adequados para aplicações de elevada temperatura. As configurações tecnológicas dos coletores PTC (Figura 20) necessitam de avaliar a importância das perdas óticas e das térmicas, já que é inerente uma interdependência entre ambas. Assim, pode-se afirmar que, a partir de uma eficiência independente da temperatura limite (máxima) (representando apenas perdas óticas), a eficiência instantânea do coletor é diminuída com o aumento dos níveis de temperatura operacional devido à dependência da temperatura das perdas térmicas (Horta, 2015).



Figura 20 - Coletores cilindro parabólicos. (FLABEG, 2015).

3.5. Coletores com refletores lineares de Fresnel (média temperatura)

Os coletores do tipo refletores lineares de Fresnel (Figura 21) possuem espelhos planos ou com ligeira curvatura, seguidores do Sol num só eixo, que concentram irradiação solar num ou mais tubos onde circula um fluido de trabalho que pode atingir temperaturas até 400 °C. Este tipo de tecnologia apresenta um elevado potencial para utilização em diversos processos térmicos (instalações industriais). Estes sistemas apresentam menor rendimento quando comparados com os coletores cilindro-parabólicos, porém apresentam um menor custo de instalação por área (Häberle et al., 2014). Estes sistemas de concentração devem o seu nome ao esquema de montagem dos espelhos, que seguem a ótica de Fresnel, onde, a partir de uma certa distância focal, cada parábola pode ser representada como uma circunferência, permitindo posicionar os espelhos de maneira escalonada.

O sistema pode apresentar um concentrador secundário envolvendo o tubo ou os tubos recetores, contribuindo para aumentar o desempenho do sistema.



Figura 21 - Tecnologia Fresnel Linear. (Fonte: LNEG).

As principais vantagens desta tecnologia são (Silván and Silva, 2015):

- Menor custo quando comparado com outras tecnologias de concentração solar;
- Estrutura mais simples, pois ao contrário dos cilindros parabólicos os espelhos não suportam o tubo recetor;
- Tubo recetor fixo;
- O absorvedor é livre nas extremidades para permitir a expansão devido a altas temperaturas;
- Localização dos espelhos planos perto do solo significa cargas mecânicas mais reduzidas devido ao vento;
- Melhor aproveitamento da superfície ocupada.

4. INTEGRAÇÃO DA ENERGIA SOLAR DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSOS DE SECAGEM

A escolha da tecnologia de conversão de energia solar está dependente da temperatura de operação e do fluido de transferência de calor a utilizar. No entanto, a definição do esquema de integração do sistema solar térmico e do fornecimento de calor solar no processo industrial (neste caso, no processo de secagem) depende das características individuais do processo industrial implementado numa determinada instalação.

Em geral, uma instalação solar industrial consiste num campo de coletores solares através do qual circula um fluido de transferência de calor (água, óleo térmico ou sais fundidos) – o chamado circuito primário. Um sistema de regulação controla esta circulação de acordo com a intensidade da radiação solar direta (DNI) disponível por forma a obter a temperatura de operação desejada. Por meio de um permutador de calor, a energia solar pode ser usada para aquecer líquidos, fluxos de ar ou para a geração de vapor. O acoplamento do sistema solar com o sistema de aquecimento convencional pode ser realizado em diversos pontos do sistema: acoplamento direto a um processo específico, pré-aquecimento de água e geração de vapor no sistema central.

Efetivamente, diferentes conceitos de integração são aplicáveis para a incorporação direta do calor solar no processo industrial ou para a incorporação indireta, através de integração com o sistema de fornecimento de energia. Se a integração é feita ao nível do sistema de fornecimento de energia, o meio de transferência de calor e o respetivo ponto de integração levam automaticamente a um possível conceito de integração. Por outro lado, se a integração é feita diretamente no processo industrial, o tipo de permutador de calor em combinação com sua fonte de alimentação convencional é fundamental para o conceito de integração.

Diferentes conceitos de integração generalizada são apresentados em (Schmitt, 2016) ao nível do sistema de fornecimento de energia e do processo, podendo ser atribuídos a diferentes tipos de consumidores industriais de calor. De acordo com a metodologia definida em (Schmitt, 2016) é possível garantir uma rápida identificação do modo de integração mais adequado à utilização de energia solar térmica para fornecimento de calor num determinado processo considerando as seguintes condições de enquadramento:

- a. Distinção entre fornecimento de energia e nível de processo;
- b. Identificação do meio de transferência de calor no nível de fornecimento;
- c. Identificação da categoria de consumo de calor no nível do processo;
- d. Identificação do modo de aquecimento convencional ao nível do processo.

Considerando estes quatro pontos, os diferentes tipos de integração podem ser classificados e as diferentes formas de integração de calor solar podem ser catalogadas em classes gerais.

A Figura 22 esquematiza as diferentes possibilidades para integração de calor produzido por sistemas solares térmicos em processos industriais, apresentando os esquemas de integração generalizados definidos em (Schmitt, 2016).

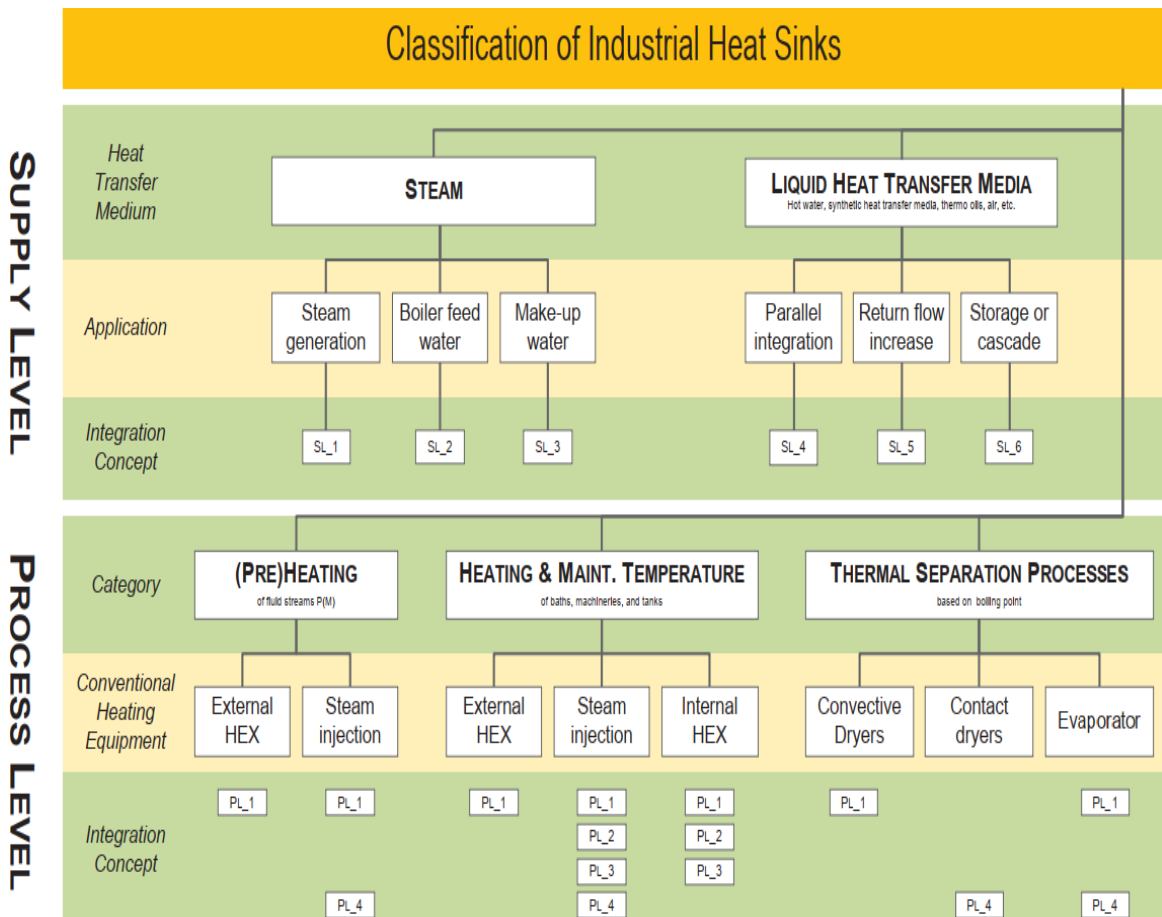


Figura 22 - Possíveis modos de integração de energia solar térmica em processos industriais. (Schmitt, 2016).

Os esquemas de integração de energia solar aplicáveis à integração direta de energia nos processos de secagem analisados no âmbito do projeto SECASOL (lamas de ETAR, lixiviados e RSU/CDR) encontram-se na categoria "processos de separação térmica", efetuando-se uma distinção entre secadores de convecção e de contato - que cobrem a maioria de todas as tecnologias de secagem de lamas e RSU/CDR apresentadas anteriormente - e evaporadores – relevantes para a evaporação e concentração de lixiviados provenientes de aterros sanitários.

Com base na relação entre o tipo de consumo de calor e a forma convencional de transferência de energia térmica, diferentes sistemas de integração podem ser aplicados para aproveitamento do calor solar. Na Tabela 15 apresenta-se uma nomenclatura uniformizada para descrever os diversos esquemas de integração de energia solar resultantes da aplicação da metodologia acima referida.

Tabela 15 - Resumo dos conceitos de integração da energia térmica em processos industriais.
(Schmitt, 2016).

| Nível de integração | Distinção | Conceito de integração de calor solar | | |
|--|---|---------------------------------------|------|---|
| Nível de fornecimento (<i>Supply level</i>) | HTF | Vapor <i>Steam (S)</i> | SL-1 | integração paralela (direta ou indireta) do calor solar |
| | | | SL-2 | pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira |
| | | | SL-3 | pré-aquecimento de água de alimentação (make-up) |
| | | Líquido <i>Liquid (L)</i> | SL-4 | integração paralela (direta ou indireta) do calor solar |
| | | | SL-5 | <i>Solar return flow boost</i> |
| | | | PL-6 | Aquecimento solar de ar |
| Nível de processo (<i>Process level</i>) | Equipamentos convencionais de aquecimento | Permutador externo (E) | PL-1 | aquecimento solar para calor de processo |
| | | | PL-2 | aquecimento solar para equipamentos |
| | | HEX Interno (I) | PL-3 | aquecimento solar com HEX interno |
| | | Fornecimento de vapor (S) | PL-4 | Fornecimento de vapor solar a vácuo ou a baixa pressão |

A título exemplificativo da aplicação desta metodologia e nomenclatura, para a aplicação de secagem solar com secadores do tipo convectivo, as configurações recomendáveis para integração de energia solar ao nível do processo poderiam ser dos tipos *Nível de Processo (PL) – Permutador externo (E) – aquecimento solar do produto (PL1)* ou seja PL-E-PL1 ou *Nível de Processo (PL) - Permutador externo (E) – aquecimento solar com HEX interno (PL3)* ou seja, PL-E-PL3, etc.

Nas Figuras 24 e 25, “ Q_{sol} ” significa calor obtido por tecnologia solar, e “ Q_{conv} ” refere-se ao calor produto das tecnologias convencionais.

4.1. Possíveis esquemas de integração

- a) Integração ao nível do processo com permutador de calor externo e aquecimento dos fluidos de entrada (PL-E-PL1).

Este conceito de integração é um dos mais simples de alcançar, utilizando um permutador de calor adicional, alimentado por energia solar e instalado em série com o permutador de calor convencional, para fornecimento de energia ao processo de secagem. A Figura 23 apresenta o respetivo esquema de princípio.

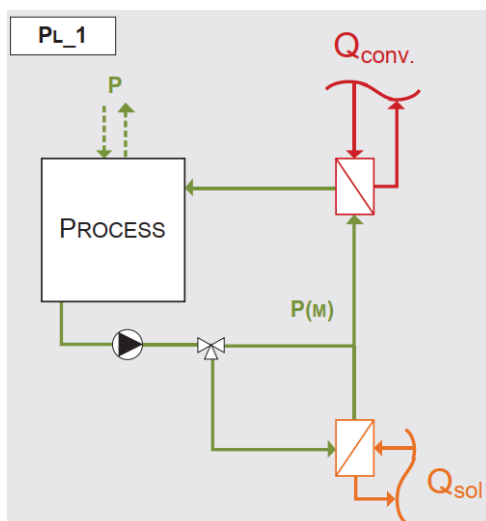


Figura 23 - Esquema de um sistema de transferência de calor com tecnologia solar utilizando um permutador de calor externo. (Schmitt, 2016).

b) Integração ao nível do processo com geração de vapor a vácuo (PL-S-PL4).

Outra possibilidade é a geração de vapor solar com vácuo, pode ser aplicada em processos de evaporação em temperatura de 40 a 80 °C. O esquema de fluxo do processo para este conceito de integração é apresentado na Figura 24.

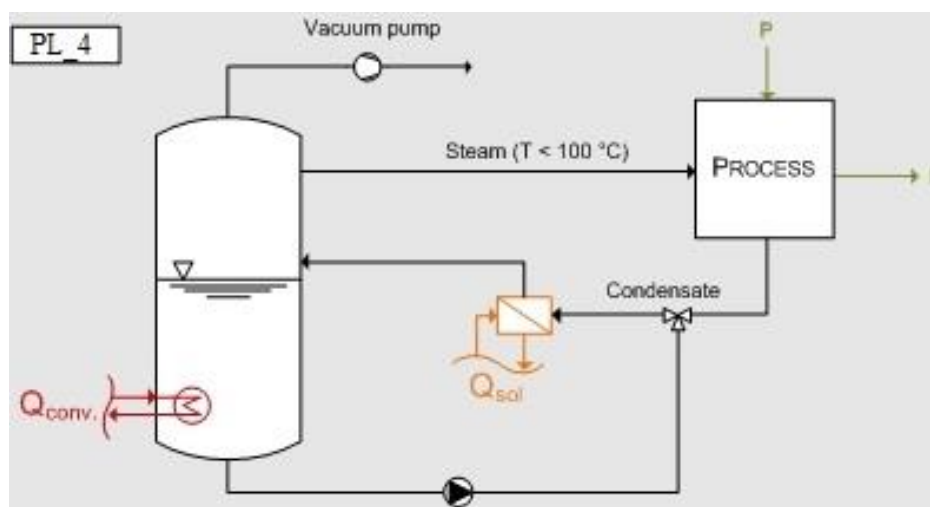


Figura 24 - Esquema com de geração de calor solar a vácuo. (Schmitt, 2016).

c) Integração ao nível do processo com geração de vapor a baixa pressão (PL-S-PL4)

Para a produção de vapor solar com pressão reduzida de 1,5 a 3 bar (110-135 °C) é necessária uma caldeira alimentada com calor proveniente do sistema solar. A água de alimentação ou condensado é introduzida na caldeira, evaporada e usada para aquecer o processo de secagem. Portanto, o consumo por vapor convencional para aquecimento por injeção é reduzido (Figura 25).

A única diferença é o nível de temperatura mais baixa em comparação com os sistemas de vapor convencionais da indústria.

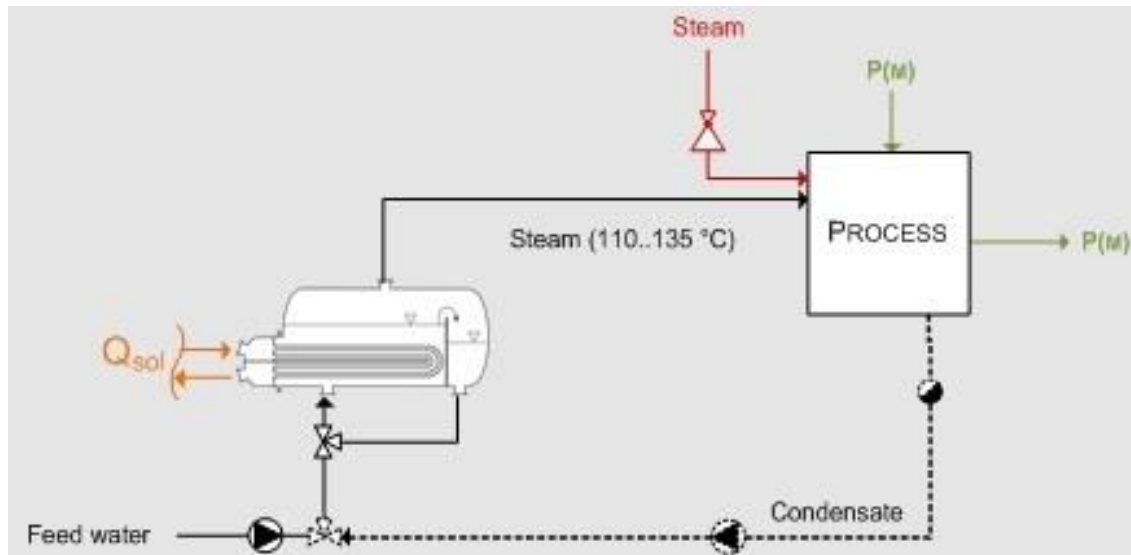


Figura 25 - Esquema do processo de secagem utilizando óleos térmicos (sintéticos) ou vapor. (Schmitt, 2016).

Armazenamento de energia térmica

O armazenamento da energia solar térmica pode ser parte integrante do sistema solar, dependendo da quantidade de material a secar e dos parâmetros considerados na concepção do sistema solar e do seu modo de operação.

Os sistemas de energia solar para geração de energia térmica podem ser projetados com ou sem armazenamento da energia gerada no campo solar. A decisão de considerar o armazenamento da energia produzida pela instalação solar depende da relação entre a produção de energia solar e as necessidades térmicas do processo industrial. Quando o consumo de energia do processo é muito maior do que a produção solar, o armazenamento pode ser eliminado e a energia solar pode alimentar diretamente o processo ou o sistema existente de produção de calor.

Incluir sistemas de armazenamento de calor em conjunto com as tecnologias de concentração solar permite que o sistema continue a trabalhar na ausência parcial ou total de irradiância solar. A título exemplificativo, a Figura 26 apresenta o comportamento da energia produzida e armazenada numa central solar termoelétrica de 50MW dotada de um sistema de armazenamento de energia térmica.

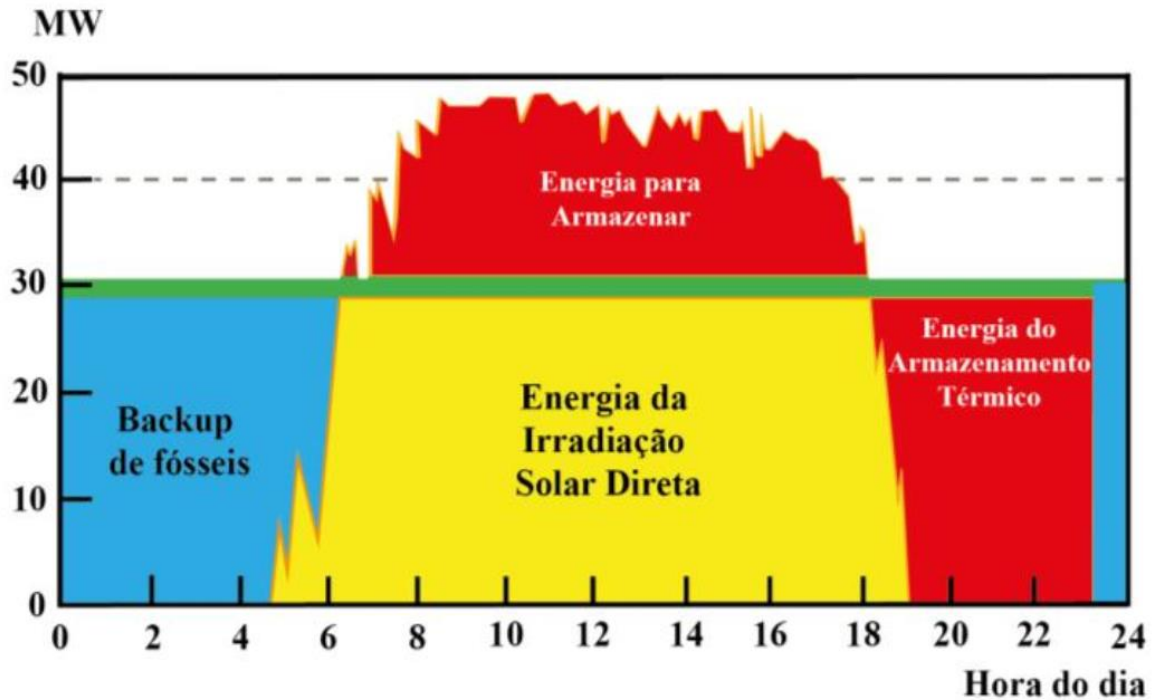


Figura 26 - Comportamento da energia num sistema CSP utilizando armazenamento térmico.
Adaptado de (Ginley and Parilla, 2013).

Atualmente, o armazenamento térmico de energia é feito por meio de um método de retenção de calor sensível, em tanques com um fluido de armazenamento de energia (água, óleo térmico ou sais fundidos) ou módulos de cerâmica, por exemplo.

O calor armazenado pode ser utilizado sempre que a irradiação solar diminuir – seja durante a noite ou por causa de nebulosidade – permitindo um fornecimento estável de energia em alturas com menor disponibilidade do recurso solar.

5. Conclusões

Neste relatório é apresentado o enquadramento temático do projeto SECASOL que visa a promoção de tecnologias inovadoras na melhoria da eficiência dos processos de secagem de lamas de esgoto e secagem de resíduos sólidos urbanos com recurso a tecnologias solares no espaço transfronteiriço da Andaluzia-Algarve-Alentejo.

Tendo em conta as principais conclusões apresentadas no documento *Potencial de aplicação da energia solar térmica de concentração* - (PP1), o objetivo do presente trabalho é identificar e apresentar informação fundamental relativa às possíveis soluções técnicas de secagem com recurso à energia solar térmica de concentração em processos de depuração de águas residuais e de tratamento de resíduos sólidos urbanos.

Para tal foram identificados e analisados os problemas decorrentes dos processos de secagem de lamas nos sectores de Tratamento de Águas Residuais e de Secagem de Resíduos Sólidos Urbanos, avaliada a viabilidade técnica na implementação de tecnologias solares de concentração em processos industriais, tendo como base a atual estrutura dos processos de secagem. Foram igualmente identificadas as diferentes tecnologias e tipologias de secagem tendo em conta os critérios de transferência de calor e massa, as taxas de secagem, a influência e eficiência dos diferentes sistemas de secagem e os requisitos do produto final considerando a sua valorização.

São também apresentados os sistemas de secagem mais adequados na integração da energia solar térmica, abordado o enquadramento legal relativo às condições de valorização de resíduos nas regiões em objeto de estudo. Em complemento, apresentaram-se as diferentes tecnologias de concentração solar térmica e abordou-se a sua integração nos processos industriais de secagem tendo em conta diferentes aspetos operacionais nomeadamente: a temperatura de operação, o tipo de fluido de transferência de calor a utilizar, equacionadas as diferentes possibilidades de integração da componente térmica de acordo com os sistemas utilizados e apresentadas as soluções tidas como mais convenientes.

Apesar de os processos de tratamento apresentarem características estruturais e condições operacionais diferentes e, ainda, os produtos finais apresentarem características distintas, pode concluir-se que a utilização de sistemas de energia solar térmica de concentração na secagem destes resíduos não é condicionada por esses aspetos.

Referências 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 Improvments 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., Akrotos, 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

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.

ANEXOS

Anexo I - Exemplos de Secadores Comerciais

Este anexo apresenta um resumo dos principais fabricantes de secadores que podem ser utilizados na secagem térmica das lamas resultantes das ETAR e na secagem dos produtos resultantes do tratamento de resíduos sólidos urbanos.

Todas as informações foram obtidas dos sites dos fabricantes, portanto, os dados e as características de cada secador e tecnologia são de responsabilidade do mesmo.

As tecnologias para secagem de resíduos são variadas e abrangentes. A Tabela A resume os dados de secagem comercial localizados classificados pelo tipo de transmissão de energia usada.

Tabela A. Lista de fabricantes de secadores

| MARCA | DIRETO | INDIRETO | 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 direta

BioCon™ usa um sistema inovador para depositar as lamas húmidas em forma de linhas finas na primeira banda de secagem. Este sistema garante uma grande área superficial de exposição das lamas ao ar de secagem enquanto ele circula dentro do secador.

BioCon™ opera numa gama de temperatura de ar seco entre 120-170 °C, sendo que na primeira gama as temperaturas variam entre os 80-100 °C na banda final. O tempo de permanência das lamas dentro do secador é superior a 60 minutos, permitindo assim que estas estejam de acordo com os requisitos da Classe A relativa à redução de microrganismos patogênicos da *United States Environmental Protection Agency* (US EPA).

- Uma lama com matéria seca superior a 90% é obtida;
- Operação segura devido a baixas temperaturas da secagem, e uma emissão mínima de poeiras (processo é acreditado como NO ATEX);
- Flexível em termos de energia e fonte de calor usada;
- Não há emissão de odores para o exterior durante o processo de secagem devido à operação em depressão do circuito fechado de secagem do ar;
- Projetado para operar de forma intermitente ou contínua;
- Baixo custo de operação e manutenção;
- As lamas secas e granuladas são obtidas em conformidade com os requisitos de saneamento da Classe A da EPA dos EUA (bio sólidos);
- Pode ser facilmente combinado com o Sistema de Recuperação de Energia (BERS) e com o Sistema de Troca de Energia (BEES).

http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/secado_termico/

Esboço e material audiovisual (<https://youtu.be/24Rjkiczz5U>)

B. SUEZ

Tipo de secador: indireto e direto, rotativo e banda.

Desenvolvido pelo grupo francês Suez, que atua principalmente nos setores de tratamento de água e gestão de resíduos sólidos urbanos. Anteriormente, era uma divisão operativa da Suez original, uma empresa que foi dividida em 2008, para permitir a sua fusão com a Gaz de France, criando a GDF Suez, atualmente Engie e Suez Environnement.

INNODRY® 2E é uma combinação inovadora e patenteada de tecnologias que combina as vantagens de secadores diretos e indiretos, com desempenho inigualável de eficiência energética em um ambiente sem poeira.

INNODRY® 2E também foi projetado para garantir os mais altos padrões de segurança operacional.

INNODRY® 2E utiliza duas etapas para secagem: a primeira é a secagem indireta (evaporador de película fina) e a segunda é a tecnologia de secagem direta (secagem de bandas). A conformação da lama granulada é obtida após o primeiro estágio, com o cortador, quando a lama ainda está na fase plástica, evitando assim a formação de poeira.

Devido ao sistema de recuperação de calor, parte do excesso de energia do primeiro estágio é recuperada para aquecer o segundo estágio.

O produto final é a lama seco na forma de grânulos, com um nível de secagem de 65% a 90%, de acordo com os requisitos. INNODRY® 2E produz um granulado com uma densidade de até 600 kg/m^3 , que é higiênico, biologicamente estável, livre de poeira e pode ser armazenado indefinidamente. O tamanho dos grânulos pode ser adaptado para se adequar ao uso final

Fase 1: Evaporador de filme fino

O Evaporador de Filme Fino (TFE) consiste num cilindro, contra cuja parede interna a lama se estende, formando uma fina camada sob o efeito da velocidade periférica do rotor central. As lâminas, localizadas no rotor central, estendem e empurram a lama da entrada para a saída do TFE. As paredes do TFE são aquecidas com óleo quente ou vapor. A secagem da lama após o TFE é de cerca de 45%. O vapor extraído do TFE é usado para aquecer o ar do secador de correia.

Fase 2: Secador de banda

Os grânulos formados no cortador são depositados no secador de correia através de um transportador rotativo que distribui os grânulos de uma maneira homogênea ao longo de toda a largura da correia.

O progresso da correia é regulado para garantir que os grânulos não sejam expostos a qualquer movimento que possa fazer com que eles se esfreguem, praticamente evitando a poeira. A velocidade da banda pode ser ajustada para corresponder à secagem solicitada. A lama é mantida a uma temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ no secador de bandas, antes de ser refrigerado até uma temperatura final de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

O secador de bandas é dimensionado para se adaptar ao nível de sólidos secos necessários na sua saída (65 a 90%). O secador de bandas opera com uma pressão levemente negativa, o que evita a emissão de odores, e sua operação pode ser verificada através de inúmeras portas de acesso ao longo de cada banda.

Extrusão de lammas:

Na saída do TFE, a lama, ainda na fase plástica e maleável, cai diretamente no dispositivo de extrusão (cortador).

É pressionado através de uma grade perfurada, que permite a criação de "espaguete", cujo

comprimento flutua de acordo com o conteúdo de fibra da lama ou do produto. A extrusora é limpa regularmente com um sistema automático.

O INNODRY® 2E estabelece novos padrões de segurança para centrais de secagem, já que foi projetado para operar em temperaturas abaixo de 110 °C, em um ambiente livre de poeira. Conseqüentemente, não há risco de ignição e explosão de grânulos. A combinação desses dois fatores permite uma operação completamente segura da central.

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

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

Esboço e material audiovisual (<https://www.youtube.com/watch?v=EXxcz7-a9KI>)

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

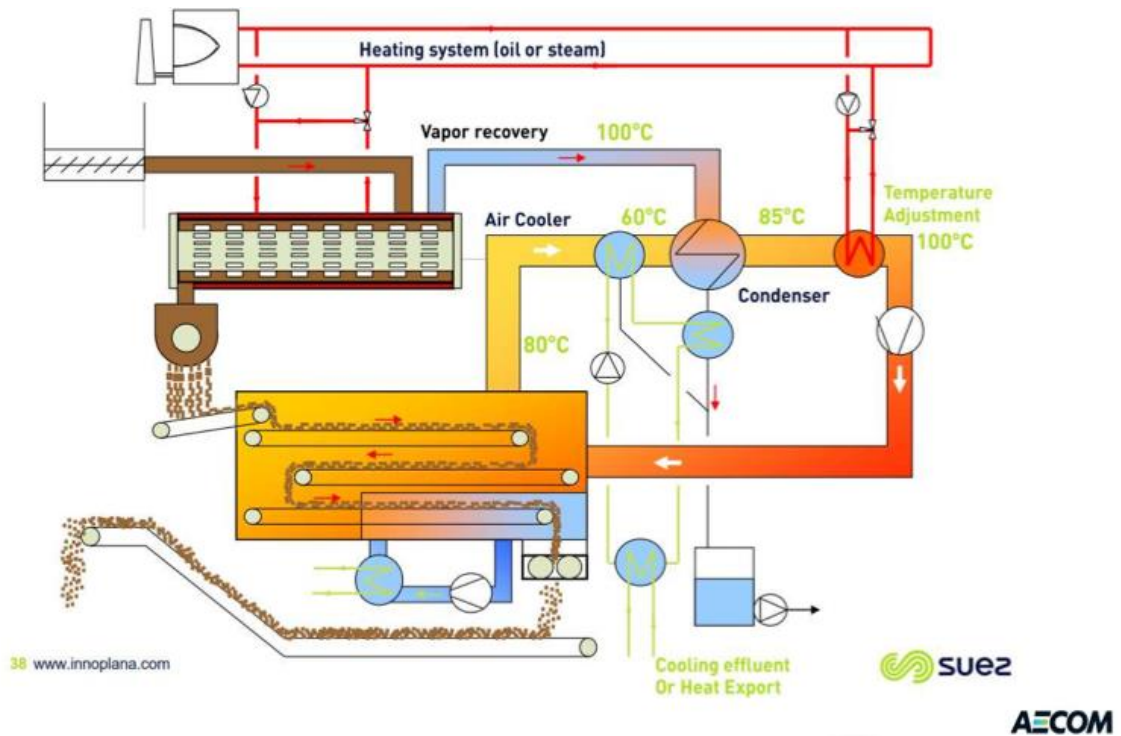


Figura A. Two Stage Dewatering and Drying

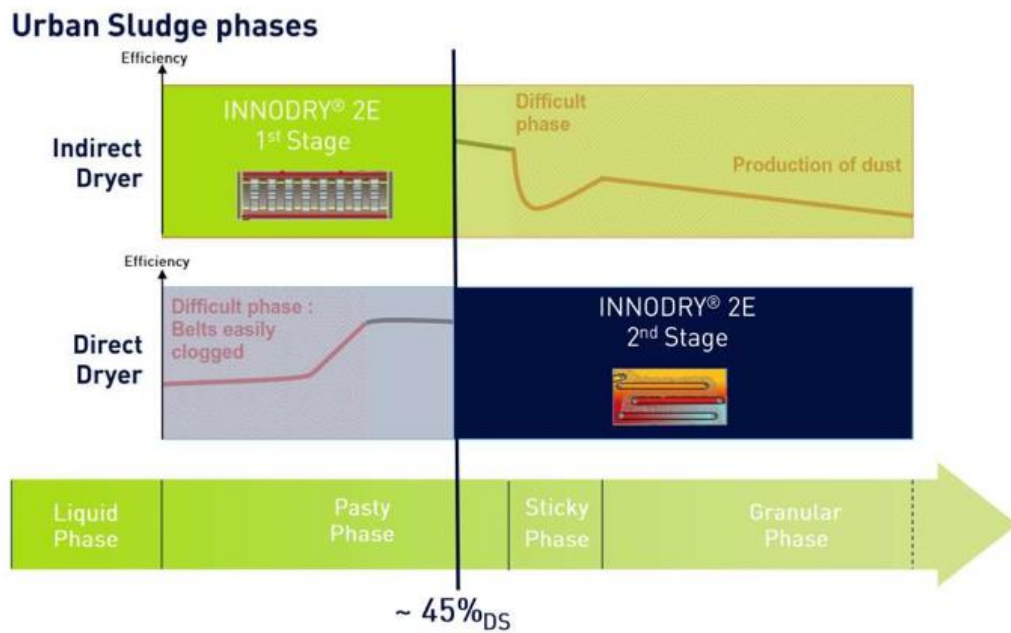


Figura B. Energy Savings Potential

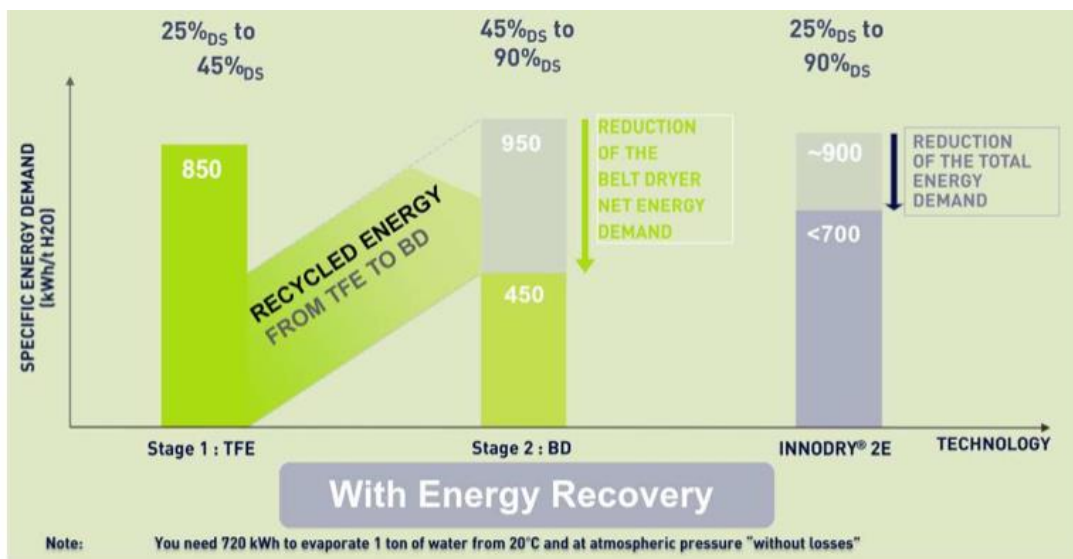


Figura C. Energy Savings Potential with Energy Recovery

C. ANDRITZ

Tipo de secador: lâminas rotativas indiretas

A transmissão térmica contínua indireta ocorre dentro do secador de lâmina.

- Alta eficiência térmica;
- Tambor rotativo MPS especial (sistema de passo múltiplo);
- Conteúdo de humidade de saída controlada devido ao design interno do tambor específico;

- Tempo de secado flexível para material leve e pesado;
- Ampla experiencia.
-

Esboço e 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/uploads/docs/ANDRITZ_Gouda_Paddle_brochure_def_m ail.pdf

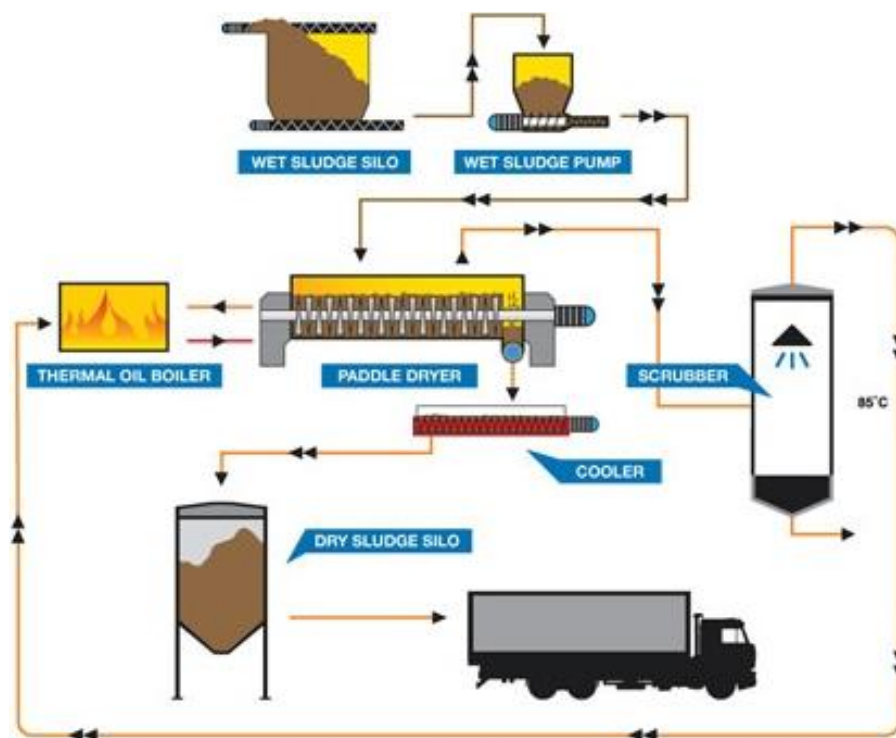


Figura D. Secador/refrigerador do eixo da lâmina dupla

D. THERMO-SYSTEM

Tipo de secador: estufa solar com técnica de mistura

Necessidade de superfície disponível. Dependendo das condições do local, o clima, o teor de massa seca (MS) e as características da lama podem ser secos por m^2 e somente com operação solar (sem recuperação de calor residual) as seguintes quantidades anuais de lama:

Lama desidratada (25-30 % MS): 0,5-3 t lama/ m^2

Consumo energético elétrico: 20-30 kWh/t de água extraída

Capacidade: 1000 a 600 000 habitantes

www.thermo-system.com

Esboço y material audiovisual:

http://www.andritzgouda.com/es/index.php/proceslijn/Sludge_treatment_process/

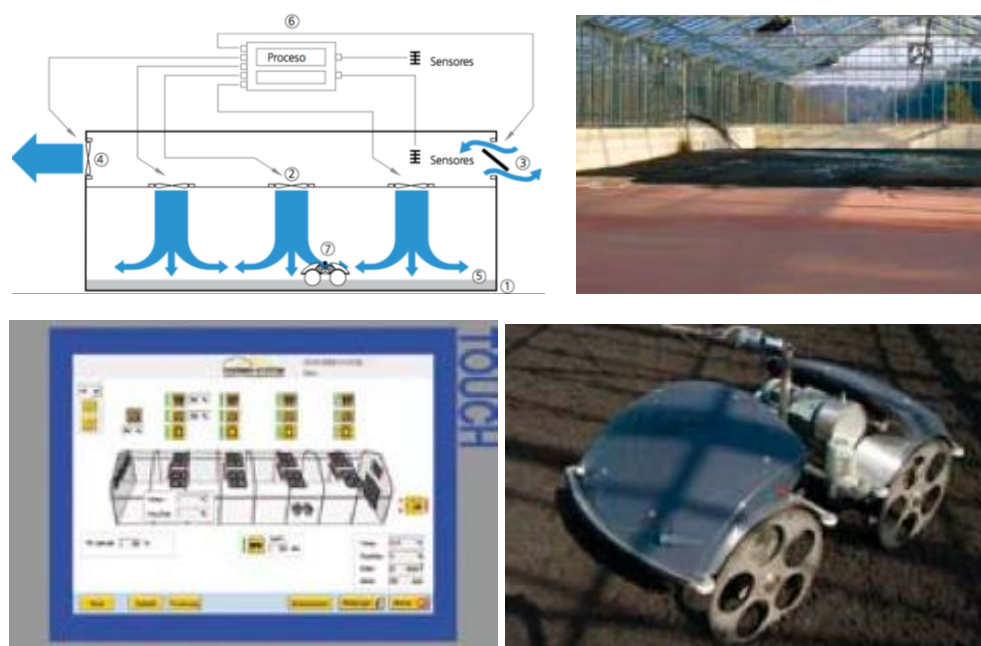


Figura E. Diagrama do processo Thermo-System

E. APISA

Tipo de secador: Direto de banda

Consiste numa banda contínua formada por peças de metal perfuradas, encerradas em um túnel através do qual o ar quente é introduzido. Os secadores podem ser 1, 2 ou 3 bandas sobrepostas. Os usuais são secadores de dois andares que oferecem maior eficiência

energética e uma taxa muito baixa de emissão de partículas sólidas na atmosfera.

APISA possui um contrato de desenvolvimento tecnológico e comercialização, recíproco, com a empresa italiana SCOLARI SRL com ampla experiência no ramo de secadores de bandas.

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

Esboço e material audiovisual

Ref.: www.apisa.info/directorio_productos.php?id=9&idioma=es



Figura F. Instalação de secagem industrial (directo de banda)

F. SCOLARI SL

Tipo de secador: Direto de banda

Sistema de secagem de ciclo contínuo ou alternado, composto por 1 faixa móvel, normalmente utilizada com ar de processo a baixa temperatura e para capacidades de evaporação pequenas e médias. O material a secar é colocado, por meio de funil ou banda de alimentação inclinada, na faixa de secagem, formada por perfis perfurados, que permitem a passagem do ar quente do processo.

O ar saturado de umidade é aspirado e evacuado para à atmosfera após ser limpo de poeira por um sistema de alto desempenho. A velocidade da banda e o tempo de exposição do material podem variar automaticamente, dependendo da humidade programada para o produto. No trecho final da banda é possível ter uma zona de resfriamento.

Os secadores de banda - série 1T BT - são projetadas e feitas para permitir a recuperação de calor de plantas de cogeração. A série 1T BT é adequada para ser inserida tanto em

linhas de gaseificação onde a potencia térmica disponível pode ser muito limitada (100kW) e em sistemas com alta potência térmica (5MW).

Projetada para recuperar e reutilizar energia térmica de água quente com baixa temperatura. Ciclos com controle automático da humidade final

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

Esboço e material audiovisual

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

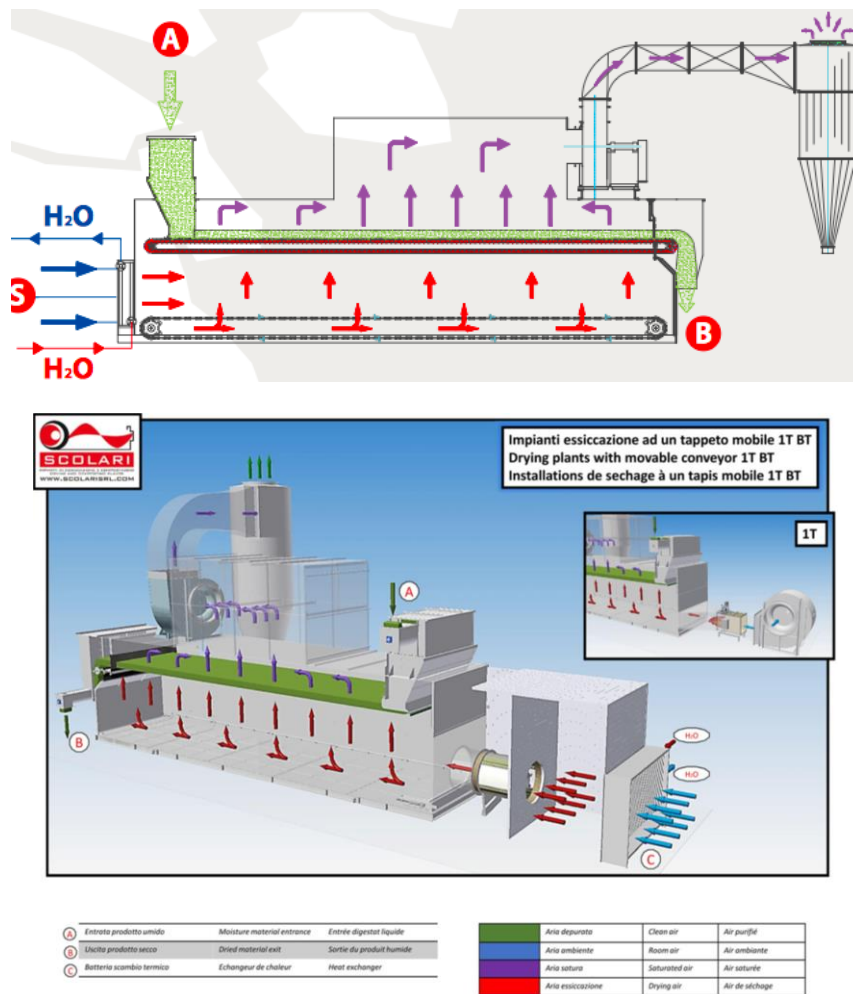


Figura G. Instalação de secagem industrial (directo de banda)

G. INGETECSA

Tipo de secador: Direto /indireto de banda

Tipo de contribuição de energia:

- Aquecimento indireto: com vapor, água quente ou óleo térmico, no secador através de permutadores de calor internos;
- Aquecimento direto: com queimadores de combustível ou gás natural, que projetam a chama diretamente no módulo do secador;
- Aquecimento indireto ou direto, a partir do exterior: os permutadores ou queimadores estão alojados do lado de fora, possivelmente em um local não afetado por restrições de segurança.

Tipos de banda:

- Banda de arame inoxidável, guiada por correntes;
- Banda de placas perfuradas e articuladas, guiadas por correntes;
- Banda de arame sem correntes;
- Banda de tecido metálico com cabos autoguiados;
- Banda de placas flexíveis, guiadas por correntes.

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

Esboço e material audiovisual

Ref.: http://www.ingetecsa.com/files/Fichas/Secadero_de_banda.pdf

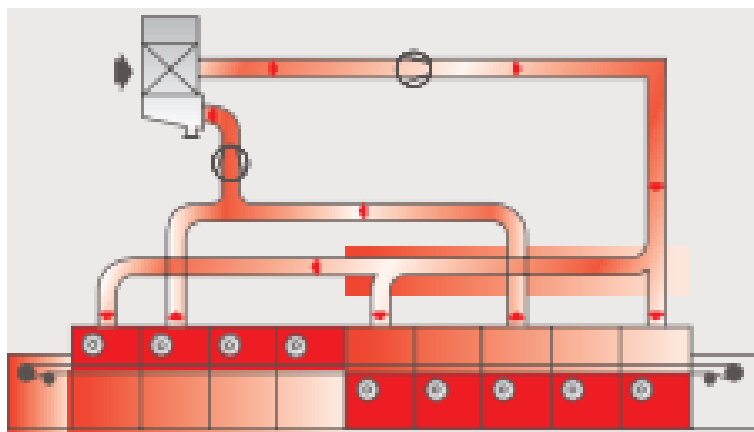


Figura H. Instalação de secagem industrial (direto/indireto de banda)

H. GMF-GOUDA

Andritz Gouda (Former GMF-Gouda) é um fabricante de equipamento de secagem. O Grupo Andritz adquiriu Royal GMF-Gouda em outubro de 2012.

I. VOMM

Tipo de secador: direto e indireto de turbina

Em geral, o sistema é operado em circuito fechado, com uma ligeira depressão, concebidos para o tratamento contínuo de vários produtos, tais como líquidos orgânicos e inorgânicos, diluídos ou lamas concentradas, independentemente da quantidade de água contida e da viscosidade.

A aplicação da tecnologia de Turbo VoMM na área do ambiente, proporciona um tratamento térmico do produto com uma combinação de permuta de calor por condução e convecção, garantindo excelentes resultados em termos de eficiência de energia e o tempo de processamento para preservar a qualidade e estabilidade do produto seco.

A fonte de calor pode ser uma unidade dedicada (caldeira de gás natural ou biogás), ou tirando vantagem do calor residual dos processos industriais ou equipamento de produção de energia (motor de combustão interna, caldeiras, turbinas a gás, fornos etc).

O processo de secagem ocorre numa fase, sem a necessidade de misturar o produto húmido com o produto seco na saída, para a remoção da massa. Evitando o consumo caro de gases inertes e sempre de acordo com os padrões ATEX.

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

J. THEILEN MASCHINENBAU GMBH

Tipo de secador: Direto de banda

Durante décadas, os secadores de banda no modo de recirculação de ar para secagem contínua de material a granel foram a primeira escolha. O fluxo de ar que atua na grande área de superfície de muitas partículas individuais é energeticamente eficiente e absorve a humidade, e o ar húmido dentro do secador.

O produto é distribuído em uma correia transportadora sem fim permeável ao ar e o ar quente é introduzido. O ar de secagem circula e satura a cada passo através da camada do produto. Uma parte específica do ar de secagem é reabastecida com ar fresco e, ao mesmo tempo, os vapores correspondentes são removidos. Para uma eficiência energética ideal, o ar de secagem é direcionado contra o fluxo do produto.

No caso de ser necessário um tratamento uniforme em toda a altura da camada de produto, a direção do ar muda pelo menos uma vez de cima para baixo. Frequentemente segue-se uma seção de resfriamento. Aqui, o ar frio passa de cima para baixo através do produto. O ar de exaustão aquecido pode ser usado para a seção de secagem. No caso de processos operacionais muito lentos, nossos secadores de banda podem ser projetados como sistemas de varias bandas.

Esboço e material audiovisual



Figura I. Instalação de secagem industrial (direto de banda)

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

K. SMS

Tipo de secador: de filme fino rotativo indireto

O núcleo da instalação é o secador horizontal de filme fino. Dependendo da aplicação, a capacidade de evaporação por secador é de até 8 toneladas de água por hora.

As vantagens deste sistema são:

- Operação de 1 estágio que passa a fase pegajosa ou pastosa;
- Nenhuma mistura subsequente de produto seco;
- Quantidade mínima de gás de escape.

Todas estas vantagens fazem com que os secadores de polpa de filme fino sejam muito bem-sucedidos. Mais de 100 máquinas estão instaladas em todo o mundo.

A principal característica da secagem por contato é a transmissão direta de calor através do contato do produto com a superfície de aquecimento. Portanto, o ar quente não é necessário na secagem de contato. Portanto, o tratamento do ar de exaustão é minimizado e não há perda de energia com o ar saindo do sistema. Nosso portfólio de produtos inclui uma ampla gama de secadores de contato para aplicar as vantagens da secagem de contato em uma ampla variedade de produtos alimentícios:

Princípio de funcionamento

Os secadores horizontais de filme fino operam continuamente como secadores de contato e são usados para uma ampla gama de aplicações sob vácuo, pressão atmosférica e sob repressão. Consistem numa cobertura aquecida disposta horizontalmente com tampas de extremidade e um rotor com lâminas aparafusadas. O produto molhado que é alimentado através do bocal de entrada é captado pelas pás do rotor, aplicado na parede quente e transportado simultaneamente para o bocal de saída na extremidade oposta do corpo. Os vapores gerados são transmitidos na direção oposta ao fluxo do produto e deixam o secador próximo ao bocal de alimentação. A capacidade de evaporação e transporte é adaptada pelo arranjo correto das pás do rotor.

As partículas retidas na zona seca são removidas na zona húmida. Níveis de umidade inferiores a 1% podem ser alcançados. O tempo de permanência do produto é tipicamente entre 5 e 15 minutos.

Os secadores horizontais de filme fino também são adequados para outras aplicações além da secagem, como resfriamento de partículas sólidas e fusão do produto.

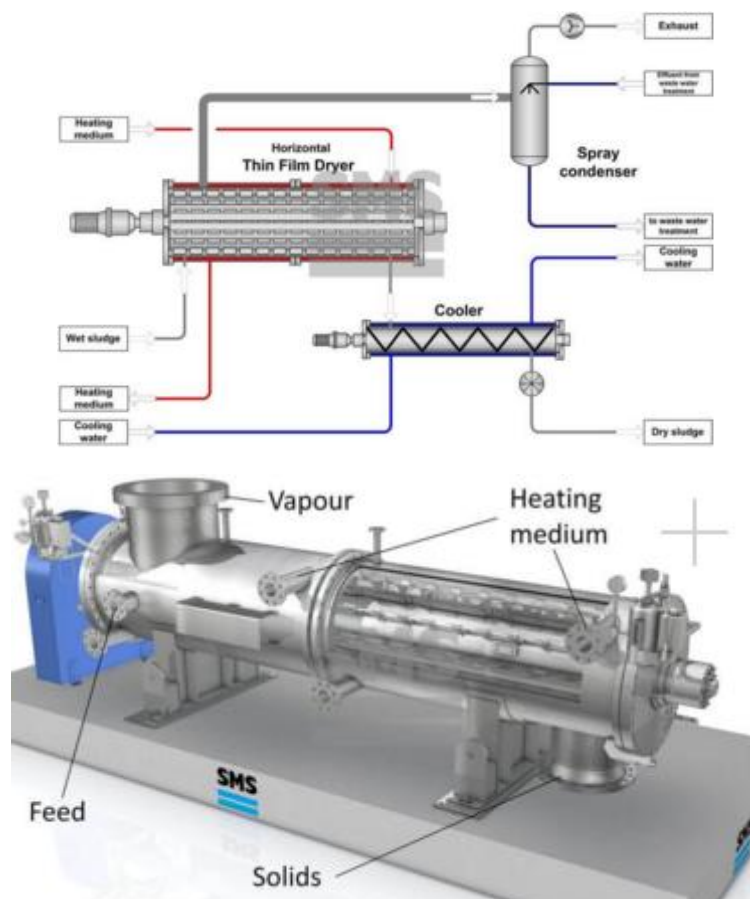


Figura J. Instalação de secagem industrial (filme fino rotativo indireto)

Esboço e material audiovisual

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

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

Tipo de secador: direto de banda

O sistema STC de secagem térmica, utiliza ar quente a baixa temperatura, reduz a produção de lamas em 70% e melhora as possibilidades de reuso agrícola e na recuperação de energia. A baixa temperatura de trabalho, entre 65-80 °C, permite o uso de energia residual de outros processos e o uso da bomba de calor.

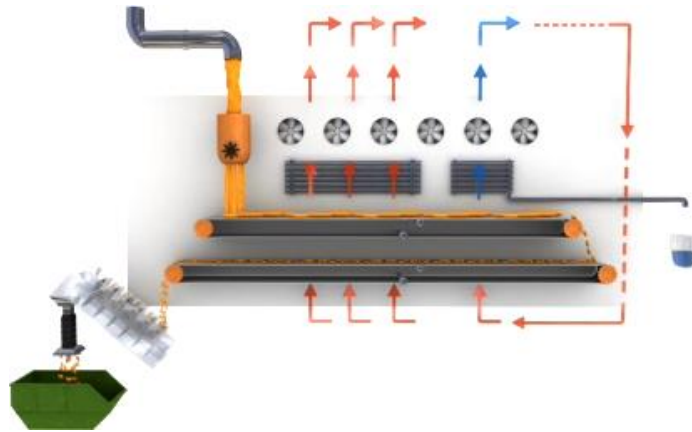


Figura J. Instalação de secagem industrial (direto de banda)

http://www.secadolodos.com/600000_es/Aqualogy-Sistemas-de-Transferencia-de-Calor/

Esboço e material audiovisual

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

M. WATERMARK

Tipo de secador: Direto de banda

O secador de lama contínuo é projetado para ser usado em conjunto com um filtro prensa. A área filtrante produzida pela prensa de filtro é vertida na tremonha de recepção do secador de lamas (A). As escovas empurram a área do filtro através de uma superfície de aço inoxidável, diminuindo o tamanho do material e configurando-o para aumentar a área de superfície e secar eficientemente (B, C).

Em seguida, o material em forma de macarrão cai sobre uma tira contínua de malha de aço inoxidável, onde passa sob uma série de aquecedores infravermelhos para secagem (D). O calor é produzido por gás natural ou LP, enquanto o ar ambiente é expelido através da câmara de calor por um ventilador montado na entrada do lavador úmido (E). Após uma redução significativa, o material granular seco deixa o secador em um recipiente para extração.

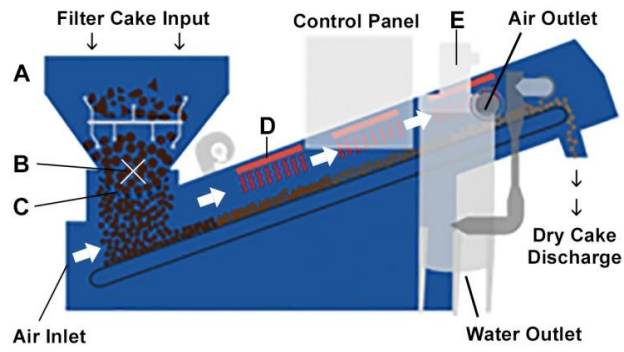


Figura L. Material granular seco

http://www.mwwatermark.com/en_US/products/sludge-dewatering-equipment/

Esboço e material audiovisual

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

N. EVOQUA

Tipo de secador: Direto de banda

Com características semelhantes ao secador anterior.

Esboço e material audiovisual



Figura M. Instalação de secagem industrial (direto de banda)

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

O. ZHENGZHOU TAIDA

Tipo de secador: Direto rotativo



Figura N. Instalação de secagem industrial (direto rotativo)

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

Esboço e material audiovisual

P. PNHIX

Tipo de secador: Direto de banda

Fabricante de bombas de calor

Esboço e material audiovisual

http://www.phnix.com/products/info_2_itemid_195_cid_18_lcid_4.html?gclid=EAIaIQobChMik5Lfu_2m3wIVikPTCh3DAQx-EAAYAiAAEgLgBvD_BwE

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

Tipo de secador: Direto rotativo



Figura O. Instalação de secagem industrial (direto rotativo)

Esboço e material audiovisual

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

R. GRYPHON

Tipo de secador: Direto de banda

O Gryphon é o secador mais eficiente do mercado, simplesmente porque:

- 1) Secagem por pressão diferencial.
- 2) Recirculação do fluxo de ar para promover a estabilização e eliminar o uso de ar ambiente frio e húmido.
- 3) Pré-aquecimento do ar reciclado através de tubos internos dentro do secador.

A Gryphon Environmental, LLC oferece tecnologia de secagem avançada, consistindo de um secador de banda contínuo que usa injeção de ar comprimido e vácuo quente para alcançar a máxima eficiência.

O resultado termodinâmico é uma rápida expansão do ar à medida que ele passa pelos resíduos para promover a eliminação da água por evaporação e um processo chamado secagem em fluxo contínuo. A eficiência energética geral permite que os clientes sequem suspensões a uma fração dos custos tradicionais. Com custos operacionais e de capital mais baixos, nossa tecnologia é a primeira a gerar retornos significativos de investimento, ao

mesmo tempo em que oferece automação avançada e capacidade máxima para expansão e flexibilidade de processos.

As unidades instaladas em Gryphon são os sistemas mais eficientes disponíveis, geralmente exigindo menos de 2,1 MMBTU de energia térmica por tonelada de água captada. A análise de terceiros mostrou uma redução de 45% no custo em relação às soluções de secagem anteriores.

Isso é possível com o uso de nosso projeto diferencial de pressão patenteado.

Os diferenciais de pressão desempenham duas funções principais na conservação de energia. O primeiro é permitir o aquecimento da corrente de ar enquanto o ar se condensou ligeiramente. Por sua natureza, o ar condensado obviamente tem um ACFM menor (pés cúbicos reais por minuto). Também é um pouco mais denso porque as moléculas estão mais próximas. Isso promove melhor transferência de calor por queimadores de gás natural online.

Em segundo lugar, e mais importante, o ar quente e condensado tem uma umidade relativa (RH) inferior a 1%. Isso é crucial, já que é a umidade relativa do ar que é injetada nos biosólidos para secagem e, naturalmente, absorverá umidade.

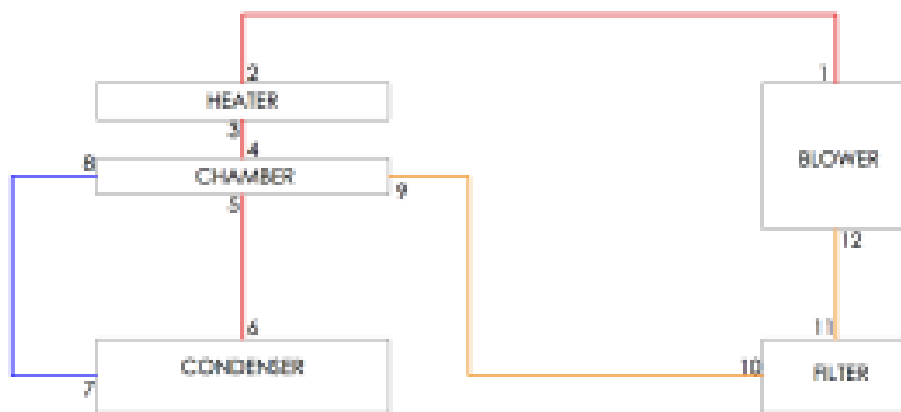


Figura P. Esquema de princípio de tecnologia de secador (direto de banda)

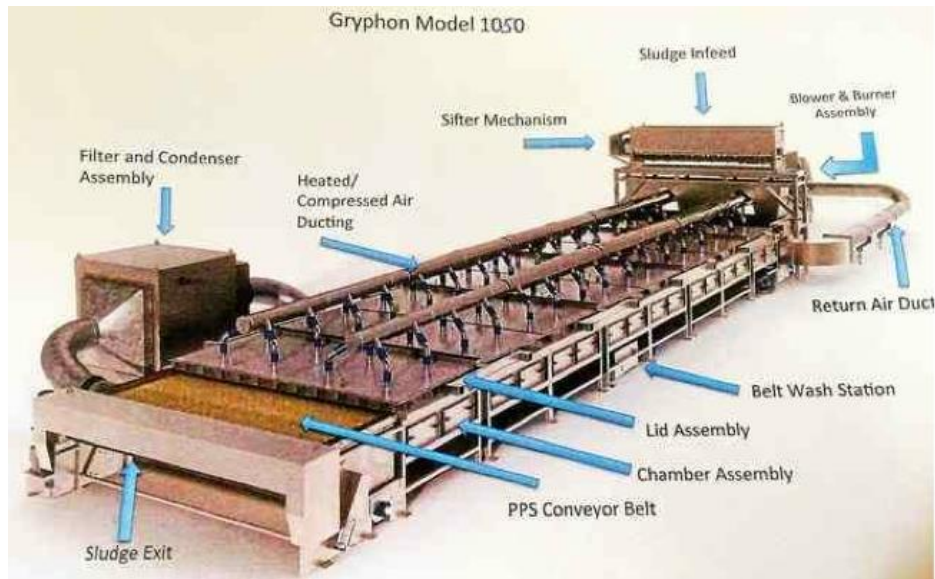


Figura Q. Primeira instalação planejada em Pottstown, PA

<http://2gryphon.com/>

Esboço e material audiovisual

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

S. KOMLINE-SANDERSON PADDLE DRYING

Tipo de secador: Indireto de parafuso rotativo

O secador de pás K-S é usado em todo o mundo para secar uma variedade de lamas, biosólidos e subprodutos, para gerar produtos secos estáveis, reduzir os custos de descarte e converter resíduos em subprodutos comercializáveis. Nas estações de tratamento de águas residuais municipais (MWWTP), o sistema de secadores de pás KS produz biosólidos de classe A, em conformidade com os regulamentos E3 503, que permitem que o material granular seco seja utilizado benéficamente como fertilizante de liberação lenta ou em terra. Os resíduos secos também têm sido usados como combustível em caldeiras e fornos de cimento.

Aquecido indiretamente com vapor ou fluido térmico circulante (óleo quente), o secador de pás K-S tem uma eficiência térmica de aproximadamente 98%. O gás não condensável no secador que pode exigir tratamento para odores é mínimo.

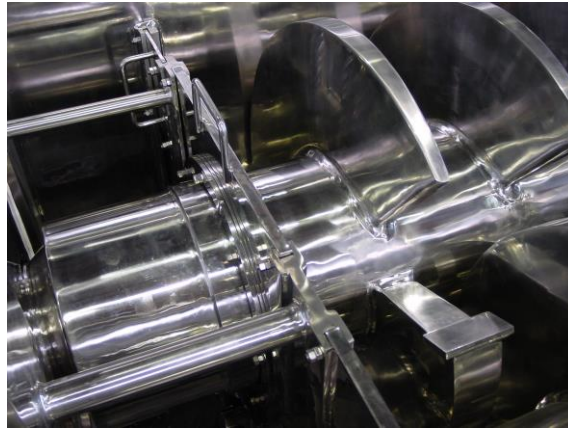
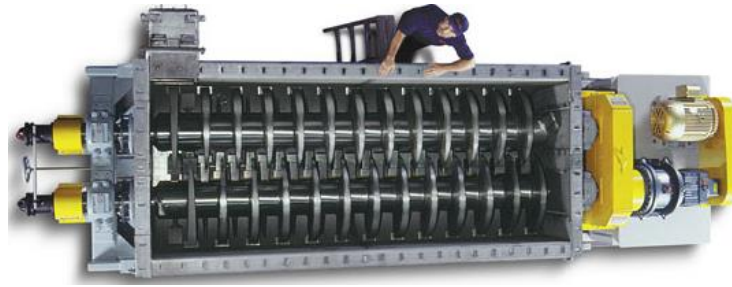


Figura R. Parafuso rotativo do sistema de secagem

http://www.komline.com/products/paddle_dryer_processor.html#Design

Esboço e material audiovisual

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

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

T. SERNAGIOTTO

Ele projetou e construiu vários tipos de secadores para o tratamento de lodo, tanto municipais quanto industriais. Entre eles, o modelo CTD (secador convectivo de tambor rotativo).

Anexo II - Possibilidade de implementação de sistemas de desidratação/secagem através de leitos de macrófitas em ETAR de pequena dimensão

A gestão integrada de sistemas que visem não só o tratamento de resíduos bem como o controlo de poluição poderá ser conseguido através do recurso a sistemas de tratamento descentralizados e que garantam os objetivos de qualidade pretendida com baixos consumos de recursos. Deste modo, a utilização de soluções naturais, nomeadamente de leitos de macrófitas, no tratamento das descargas de excedentes de sistemas de drenagem de águas residuais, pode constituir uma mais-valia em situações específicas devido às vantagens que apresenta, nomeadamente de ordem económica, ambiental e social (integração paisagista).

A tecnologia de tratamento por via de leitos de macrófitas apresenta uma simplicidade de operação e manutenção, baixos consumos de recursos e, ainda, eficiências de remoção significativas, principalmente no que se refere a: carência bioquímica de oxigénio, carência química de oxigénio e sólidos. A presença da vegetação influencia ainda outros parâmetros do funcionamento dos leitos, nomeadamente a temperatura da água, a condutividade hidráulica, o pH e ainda o potencial *redox* (USEPA, 2000).

Os leitos de macrófitas promovem o tratamento biológico das águas residuais através de processos naturais apresentando diversas variantes, dependendo principalmente do tipo de escoamento que apresentam através do leito. Os mecanismos que promovem a melhoria da qualidade do efluente são diversos podendo-se destacar (IWA, 2000).

- a) Sedimentação da matéria particulada em suspensão;
- b) Filtração e precipitação química através do contacto da fração líquida com o substrato e resíduos que compõem o leito;
- c) Reações químicas que decorrem do processo;
- d) Adsorção e trocas iónicas que ocorrem à superfície (p. ex. das plantas, do substrato, dos sedimentos e dos resíduos que se formam);
- e) Decomposição, transformação e consumo dos nutrientes e poluentes pelos microrganismos e plantas presentes no leito;
- f) Ciclo de vida natural dos microrganismos patogénicos.

A aplicação de leitos de macrófitas em ETAR permite melhorar a gestão de lamas desidratadas em ETAR (dependendo da área disponível para o efeito) sendo geralmente associada a pequenas comunidades rurais devido essencialmente a:

- a) Reduzida produção de lamas;
- b) Reduzidos encargos de operação e manutenção;
- c) Relativa facilidade de construção;
- d) Processo de tratamento estável e capaz de suportar variações significativas de caudais e/ou cargas poluentes.

A desidratação das lamas ocorre por percolação da água através das camadas superiores de lama e do meio filtrante, sendo acelerada pela evapotranspiração e pela evaporação a partir da superfície das lamas. A oscilação dos caules, por ação do vento, e um sistema de fixação constituído por rizomas facilitam a abertura de pequenos canais de drenagem através do leito de lamas. A água recolhida no fundo dos leitos é reconduzida à ETAR. O reduzido fornecimento de oxigénio que atravessa as lamas, quer através das plantas e suas raízes, quer por difusão através da interface ar-lama, vai permitir oxidar gradualmente as lamas, ocorrendo uma redução dos sólidos voláteis (SV) e um aumento de sólidos fixos (SF), obtendo-se como resultado uma lama desidratada com teor de sólidos totais (ST) até 50% do valor inicial.

Os leitos apresentam, de forma genérica, três componentes principais:

- a) A componente fixa onde se inclui a matriz, a zona da rizosfera e os biofilmes (agregados microbianos que se desenvolvem espontaneamente nas superfícies sólidas);
- b) A componente hídrica que inclui o afluente, a água dentro da matriz, o efluente e todos os poluentes associados a estas três componentes;
- c) A componente atmosférica que permite regular o movimento das frações gasosas para o interior e exterior da matriz, meio e solo da componente hídrica.

Na Tabela A são apresentados alguns dos mecanismos físicos, químicos e biológicos de depuração.

Tabela A- Mecanismos físicos, químicos e biológicos de depuração.

| <i>Parâmetro</i> | <i>Mecanismos Físicos</i> | <i>Mecanismos Químicos</i> | <i>Mecanismos Biológicos</i> |
|---|------------------------------|--|--|
| Sólidos suspensos | Sedimentação | --- | Degradação Microbiana |
| Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO ₅) | Sedimentação | --- | Degradação Microbiana |
| Carência Química de Oxigénio (CQO) | Sedimentação | --- | Degradação Microbiana |
| Metais | Sedimentação | Precipitação; Adsorção; Troca Iónica | Captação por via dos microorganismos e plantas |
| Hidrocarbonetos fósseis | Volatilização | Adsorção | Degradação Microbiana; Captação por via das plantas |
| Hidrocarbonetos sintéticos | Sedimentação e Volatilização | Adsorção; Volatilização (NH ₄) | Degradação Microbiana; Captação por via das plantas |
| Compostos azotados | Sedimentação | Precipitação; Adsorção | Captação e transformação por via dos microorganismos; Captação por via das plantas |
| Fósforo (orgânico e inorgânico) | Sedimentação | --- | Captação por via dos microorganismos e plantas |
| Organismos patogénicos | Sedimentação | --- | Mortalidade Natural; Predação microbiana |

A eficiência dos processos de remoção de poluentes pode ser afetada por uma variedade de fatores inerentes ao próprio processo de remoção (Escosteguy et al., 2008). No entanto, poder-se-á considerar como mais influenciadores as concentrações de CBO₅, CQO e sólidos suspensos, a espessura e porosidade do leito, as espécies de plantas utilizadas e,

ainda, os parâmetros ambientais (p. ex. precipitação, vento, exposição solar), as condições oxidação-redução existentes nos leitos e as fases anaeróbias e aeróbias.

Outro aspeto a ter em conta é o balanço hidráulico, onde é requerido conhecer os processos de transporte e retenção de água no meio. Estes, são por vezes de elevada complexidade dado que a superfície do sistema está, de forma continuada, exposta a fluxos de energia que, por sua vez, criam ciclos de temperatura, humidade relativa e evaporação. Deste modo, o conhecimento adequado do comportamento e do balanço hidráulico é fundamental para uma avaliação correta da eficiência de depuração.

Como critérios a ter em conta na escolha de espécies a utilizar e tendo em conta um crescimento rápido, poder-se-á destacar:

- a) Considerando alturas de leitos superiores a 0,6 m deve optar-se por *Phragmites*, cujas raízes conseguem atingir profundidades de cerca de 1 m;
- b) Permitir o desenvolvimento rápido das raízes uma vez que esse fator está normalmente relacionado com a presença de nutrientes (crescimento em profundidade à medida que a concentração de nutrientes diminui);
- c) Sempre que os afluentes possam apresentar altos teores de sódio é recomendável a utilização de caniços como *Phragmites australis* ou *Phragmites vulgaris* (como é o caso das águas residuais em povoações do litoral onde podem ocorrer infiltrações de águas salobras);
- d) Leitos de fácil controlo e que tenham um elevado rendimento na depuração das águas residuais e na eliminação de nutrientes;
- e) Leitos que tenham uma elevada resistência à salinidade presente nas águas residuais (estas tendem a variar ao longo do processo de tratamento devido às reações que vão ocorrendo).

Relativamente aos critérios que determinam o dimensionamento e o modo do tratamento a ter em conta, dever-se-á ter em conta os seguintes aspetos:

- a) Topografia do terreno - escolha de locais planos ou com declive reduzido (de modo a evitar gastos com sistemas de bombagem) evitando zonas húmidas artificiais (leitos propensos a cheias);
- b) Preservação da área envolvente (levantamento prévio do uso do solo e suas condicionantes);
- c) Condições climáticas (mesmo prevendo um caudal de águas residuais afluente ao sistema, a modelação do balanço à água deve abranger variações semanais ou mensais bem como as variações de temperatura);
- d) Tempo de retenção hidráulico (tendo em conta a eficiência de remoção dos poluentes) e carga hidráulica;
- e) Carga e coeficientes de remoção dos poluentes;
- f) Área, geometria do leito e taxa de inundação;
- g) Condutividade hidráulica (dependendo do tipo de enchimento utilizado, p. ex. areia grosseira, areão, gravilha e outros).

Na Tabela B são apresentadas algumas vantagens e desvantagens da utilização deste tipo de sistemas:

Tabela B - Vantagens versus Desvantagens.

| <i>Vantagens</i> | <i>Desvantagens</i> |
|---|---|
| Tecnologia que apresenta custos de construção e operação reduzidos quando comparados com os sistemas convencionais (p. ex. lamas ativadas ou leitos percoladores) | Necessidade de utilização de maiores áreas para implantação que os sistemas convencionais (p. ex. lamas ativadas ou leitos percoladores) |
| Menores áreas de implantação que os sistemas de lagunagem de estabilização (sem recurso à utilização de plantas) | Possível colmatação do leito devido à presença de elevadas concentrações de matéria orgânica e matéria sólida |
| Elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica, matéria sólida, nutrientes (compostos azotados e fósforo) e metais pesados | Para atingir eficiências de tratamento mais elevadas é necessário um período de funcionamento mais elevado (dois a três anos após o início da exploração) |
| Fácil operação e manutenção e gastos de energia reduzidos | Apresenta eficiências sazonais muito influenciadas pelas épocas vegetativas e não vegetativas |
| Boa adaptabilidade (às condições geográficas mais amenas) | Dependendo do sistema utilizado, verifica-se uma elevada probabilidade no aparecimento de roedores e insetos (nomeadamente mosquitos) |
| Reduzida emissão de odores (sistemas com escoamento sub-superficial) | A eficiência de remoção de fosforo e azoto das macrófitas depende do tipo de efluente (sendo algumas mais eficientes para compostos específicos) |
| Dispensa a utilização de químicos e possibilidade de reutilização do efluente final | A eficiência das macrófitas em remover íons de efluentes depende (também) do tipo de espécie e de cultivo utilizado (embora o monocultivo seja predominantemente empregado, sistemas com várias espécies podem ser mais eficientes) |
| Boa tolerância a variações de cargas hidráulicas, orgânicas e inorgânicas | |
| Impacte visual positivo | |

ETAR de Alcoutim

No caso da ETAR de Alcoutim está previsto que o acumular de lamas nos leitos de macrófitas por um período de referência mínimo de 3 a 5 anos, de modo a minimizar não os transportes a realizar, como também melhorar a qualidade da lama final, designadamente a nível dos parâmetros microbiológicos.

O princípio base assenta em alimentar a lama pelo meio filtrante, para retenção dos sólidos, enquanto o teor de água é reduzido. Para tal, ter-se-á que ter em conta determinados critérios de dimensionamento, nomeadamente a determinação do número de leitos necessários e a sua altura, o tipo de sistema de alimentação e drenagem/arejamento e, ainda, o tipo de enchimento a considerar.

No entanto, para pequenos aglomerados o número de leitos pode variar sendo recomendado existir pelo menos 4 leitos considerando uma rotação adequada durante a fase de enchimento. A área superficial recomendada depende da população servida, pelo que, o valor deverá encontrar-se entre 0,12 a 0,24 m²/habitante-equivalente.

Considerando que a altura do leito ideal deve situar-se entre 1,5 a 1,6 m e, considerando ainda que se deve adicionar cerca de 20 cm para o bordo livre, bem como que a altura de lama no leito aumenta cerca de 10 cm/ano, o tempo necessário para se atingir cerca de 1 metro de altura de leito ronda os 8 a 10 anos.

O sistema de alimentação deve garantir a distribuição uniforme da lama pelo leito de plantas, sendo a configuração variável de país para país. O sistema de alimentação através de tubagens garante uma distribuição mais uniforme do que o sistema que alimenta os leitos na extremidade. Quanto ao sistema de drenagem/arejamento, este deve ter cerca de 1% de inclinação de forma a permitir a drenagem das escorrências e garantir algum arejamento (Figura A).

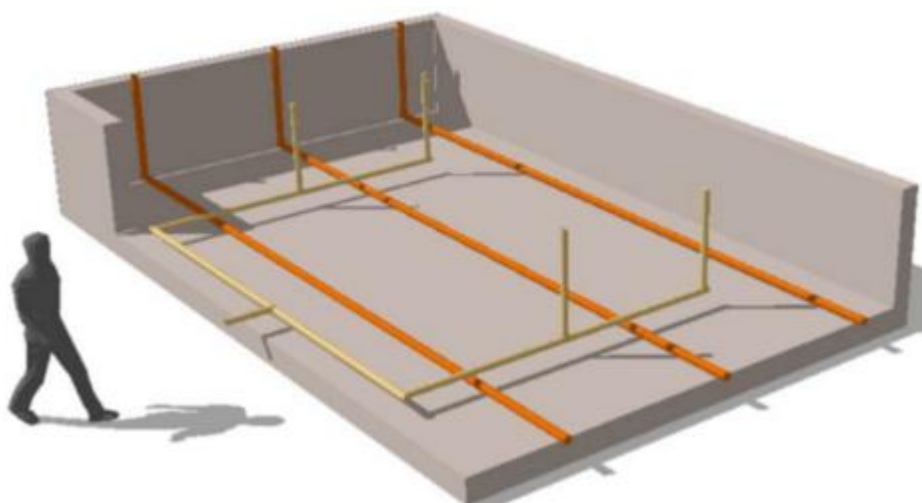


Figura A - Configuração do sistema de alimentação e drenagem/arejamento.

Na Figura B é apresentado um esquema geral da matriz de enchimento de um leito de macrófitas. A altura do meio filtrante deve compreender-se entre 30 e 60 cm, em que a primeira camada deve conter pedras de 5 cm de diâmetro, para proteção das tubagens com uma altura de 15-20 cm, seguida de camada filtrante de gravilha com diâmetro entre os 2 a 10 mm e altura de 20-30 cm e, finalmente, uma camada de areia com cerca de 0,5 a 1 mm e uma altura entre 10-15 cm, como meio filtrante e de suporte para as plantas.

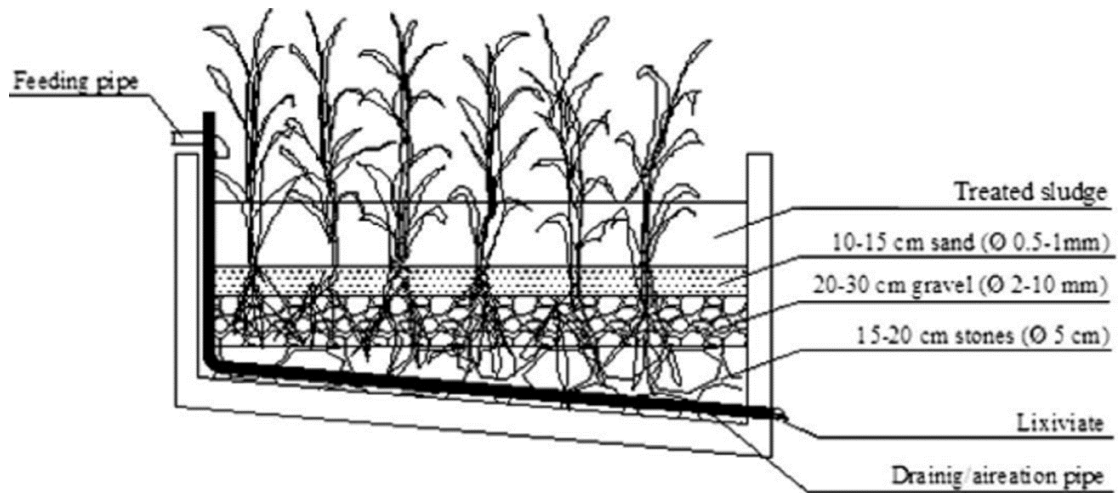


Figura B - Matriz de enchimento de um leito de macrófitas. Adaptado de (Melidis et al., 2010).

As plantas a utilizar preferentemente deverão ser macrófitas emergentes, nomeadamente, a *phragmites australis* contemplando uma configuração ao nível do espaçamento de 4 plantas/m². A presença das macrófitas intensifica os processos de desidratação e permite também uma redução nos valores de carência química e bioquímica de oxigénio.

Na fase de arranque, após a plantação das macrófitas, recomenda-se que as cargas aplicadas aos leitos, nos primeiros meses, sejam menores de modo a promover o crescimento e desenvolvimento da vegetação. O carregamento dos leitos com lama e o repouso são regulados de acordo com as necessidades de retirar as lamas em excesso da ETAR.

A fase de vazamento dos leitos só deve ocorrer ao fim de seis meses de repouso, não só para permitir a mineralização da lama, como também para que os microrganismos patogénicos possam ser eliminados. O primeiro leito é retirado ao fim de 8 a 9 anos e o último ao fim de 11 a 12 anos, pelo que a vegetação deve ser cortada antes da fase de vazamento dos leitos. As lamas são retiradas dos leitos por via de sistemas mecânicos permanecendo unicamente o filtro e as raízes das plantas.

Anexo III - Exemplos de processos de secagem integrados com tecnologias de concentração solar térmica

A título exemplificativo é apresentado um sistema de concentração solar térmica integrado num processo de secagem de lamas provenientes de uma ETAR. Este sistema, instalado em Surprise (Arizona, EUA) no ano de 2017 foi desenvolvido pela empresa Heat2Hydro, com objetivo de reduzir o teor de água das lamas e diminuir os custos operacionais associados ao transporte das lamas (HelioCSP, 2017). O sistema deverá alcançar os 5 MW térmicos até 2019.

Para a fase de demonstração foram utilizados dois coletores cilindro-parabólicos do fabricante canadiano Rackam, com um comprimento aproximado de 33,6 metros cada e uma área de captação total de 150 m². A potência térmica do sistema é de 98 kW, sendo a água é aquecida a 121 °C a 5 bar e circulada através de tubos subterrâneos para um tanque de armazenamento. Daí a água quente circula por tubos colocados no interior dos canteiros com lamas (ver Figura A).



Figura A - Estação piloto para a secagem de lamas de ETAR em Surprise - Arizona (USA).

Anexo IV – Exemplos de secadores tipo-estufa

A. THERMO-SYSTEM

Esta tecnologia (Figura A) caracteriza-se pela utilização da energia solar na secagem das lamas. Para além de reduzir a massa e volume das lamas no fim do processo, este produto apresenta como características a ausência de odores (inodoro), é biologicamente estável e facilmente armazenado.

No entanto, este sistema apresenta como requisito a necessidade de uma área adequada ao processo de secagem. Se for utilizado aquecimento externo (p. ex. de centrais de aquecimento comuns, instalações de biogás, aquecimento auxiliar, etc.), um espaço consideravelmente menor será necessário.

O *Thermo-System* possui um controlador de microprocessador para controlo adequado do sistema, tendo em conta as condições climáticas existentes e as propriedades das lamas a tratar.

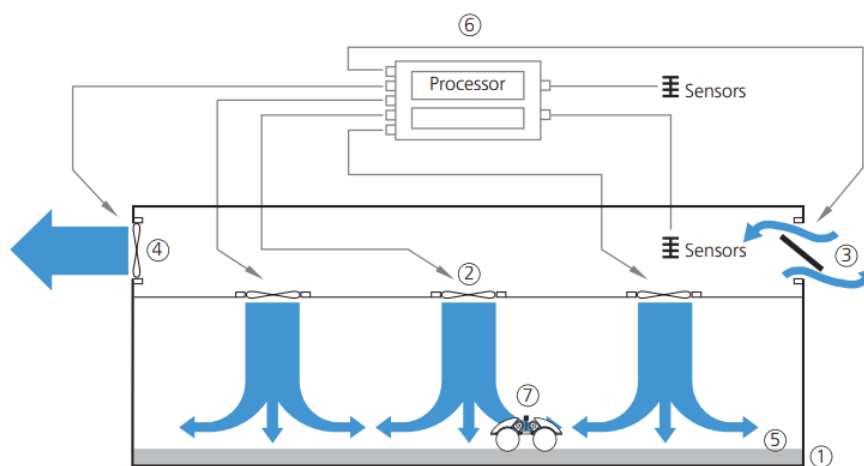


Figura A. *Thermo-System*.

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

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

B. WendeWolf

Este sistema apresenta como principal componente do secador a máquina de inversão e transporte, denominada de WendeWolf®. A máquina funciona no meio de duas paredes paralelas, com 12 m de distância, 0,85 m de altura e um comprimento que pode chegar aos 120 m. A parte central é composta por um tambor no qual são fixados diferentes pentes e pás que cortam a superfície da lama, permitindo o arejamento da parte inferior (interior). O tambor pode ser colocado a uma altura de 50 cm do chão por intermédio de um motor central e dois suportes dentados ligados entre si.

A unidade pode mover e girar em ambas as direções sendo controlada por motores. Estes sistemas estão totalmente equipados com sensores e unidades de controle.



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

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

C. Heliantis – Dregremont technologies

Esta tecnologia foi instalada na ETAR da Ponta - ilha de Porto Santo.

O princípio de funcionamento baseia-se na troca térmica entre a superfície das lamas e a atmosfera envolvente. A máquina giratória revolve o produto a secar (escarificação de operação automática), promovendo a aeração das lamas e mantendo-as em fase aeróbica. Este sistema permite que a lama apanhe sol durante o dia e apresenta como vantagens:

- Favorecimento da evaporação da água contida nas lamas, sendo o meio aquecido por via da radiação térmica e pelos materiais utilizados no telhado.
- Renovação do ar ambiente, saturado com humidade, com ar mais seco por via da ventilação (natural ou forçada) para o leito de lama.



Figura C. Sistema Heliantis na secagem de lamas de ETAR 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

O princípio básico do processo HUBER SRT consiste na secagem das lamas de esgotos urbanos em sistema de estufa. A evaporação da água contida nas lamas é evaporada durante o período em que estas se encontram na estufa por via do aquecimento do ambiente através da radiação solar e pelo vento produzido artificialmente. É utilizado um dispositivo especialmente concebido para revolver a matéria que permite ainda o seu transporte durante o processo de secagem.

O processo HUBER SRT permite uma operação contínua (o leito de lamas permanece constante), cobrindo toda área de secagem. Por meio das diferentes funções do revolvedor, especialmente da mistura de retorno, é criado um leito de lamas ligeiramente húmido e com poros sobre a maior parte da superfície. Com resultado, obtém-se um produto de características adequadas (suficientemente seco), de modo a que os processos biológicos que tendem a produzir odores são praticamente eliminados de forma significativa. No entanto, as lamas ainda estão suficientemente húmidas de modo a não produzirem partículas (poeiras) durante o processo mecânico.

A alimentação da estufa com as lamas desidratadas pode ser adaptada às exigências específicas do processo. É possível a introdução manual das lamas, por exemplo, por via de uma transportadora ou, em alternativa, através de um sistema automático diretamente da desidratação. As lamas secas podem ser descarregadas num depósito criado numa das extremidades da estufa ou serem diretamente conduzidas para a estação de transporte por um dispositivo mecânico.

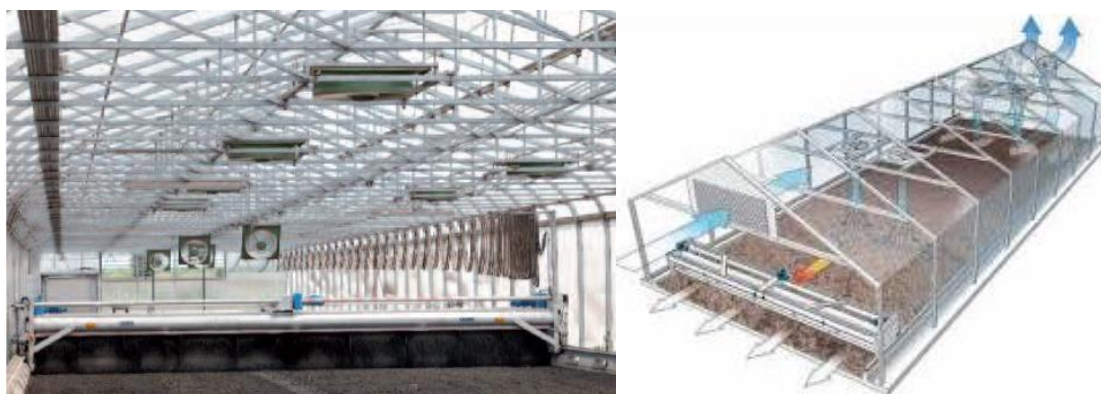


Figura D. Sistema de secagem KULT – HUBER company.

Ref.:

http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/noticias/brochurakultsrt_13174123354ecd2c8bdef76.pdf

E. BLACK BLOCK

O BLACK BLOCK® é um sistema solar híbrido de secagem, desenvolvido para desidratar diferentes alimentos e produtos agroindustriais (p. ex. ervas aromáticas, frutas, legumes, cogumelos ou produtos industriais como cortiça e madeira), através de um processo de

secagem automático, de baixo consumo energético e com um adequado controlo entre o calor fornecido e a humidade relativa do ar no interior da câmara de secagem.

Este sistema permite a recolha de dados de temperatura e humidade através de sensores, de modo a estabilizar o ambiente de secagem nos parâmetros adequados através de um sistema de controlo automático que dá prioridade à entrada de ar quente proveniente dos coletores solares, maximizando a utilização desta fonte de energia renovável, limpa e gratuita. Durante a noite, um sistema de energia auxiliar é utilizado em conjunto com os equipamentos que asseguram a continuidade da secagem.

Esboço e material audiovisual



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

São sistemas de desidratação solar, modulares e com diferentes tipificações por forma a irem ao encontro das necessidades de secagem.

Este sistema já inclui os “Big Bags” (sacos gigantes) para acondicionar os produtos durante a secagem, estando devidamente preparados para serem manuseados com empilhador ou com máquinas agrícolas adaptada para o efeito, sendo possível a sua aplicação em escala. Os produtos a desidratar podem ser diversos desde ervas aromáticas a cereais, frutos, bagaços, madeiras, cortiças, entre outros.

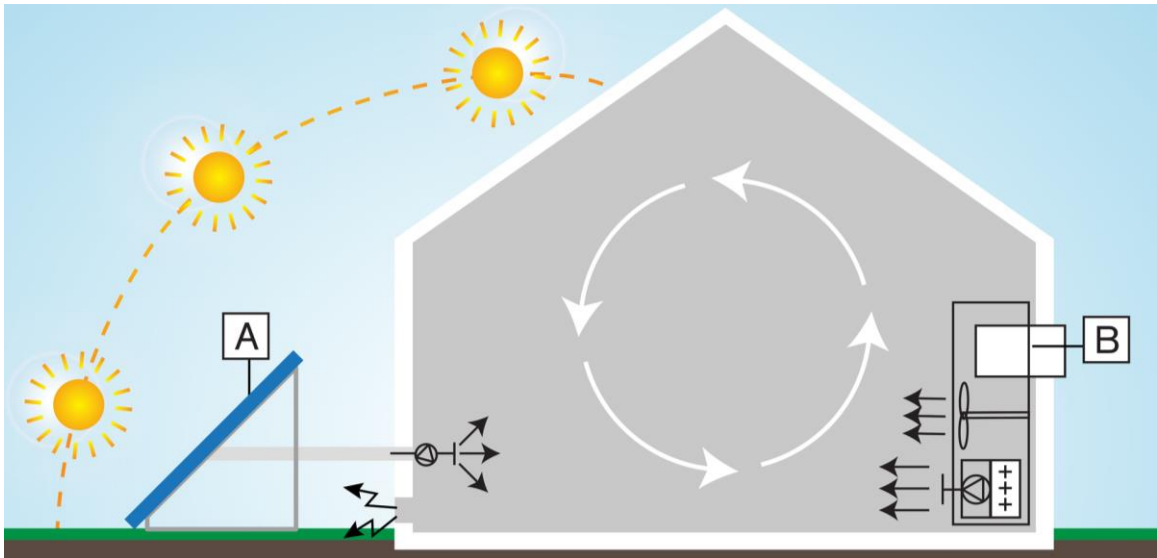


Figura F. Esquema de funcionamento – Bubble Dryer.

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

G. Dry EcoMate

DryEcoMate é um desidratador hortícola modular, portátil e de baixo consumo de energia que funciona exclusivamente com energia renovável (solar térmica e fotovoltaica) e pode operar independentemente das condições climáticas instantâneas. Este sistema permite um controlo adequado de diferentes factores do processo. Destes, poder-se-ão destacar a temperatura do ar de desidratação e a velocidade de circulação do ar, a radiação solar e a temperatura externa em cada momento através da leitura de diferentes parâmetros (p. ex. temperatura e humidade relativa do ar externo, o ar na entrada da câmara de desidratação e o ar na saída da câmara de desidratação).

DryEcoMate é equipado com um painel solar térmico, um painel solar fotovoltaico, uma câmara de desidratação, uma resistência elétrica, ventiladores para forçar a circulação de ar dentro da câmara, amortecedores de ar motorizados/válvulas, temperatura e sondas RH e um sistema de controlo, que permite ao equipamento operar sob condições otimizadas em cada instante.

Pre-prototype draft

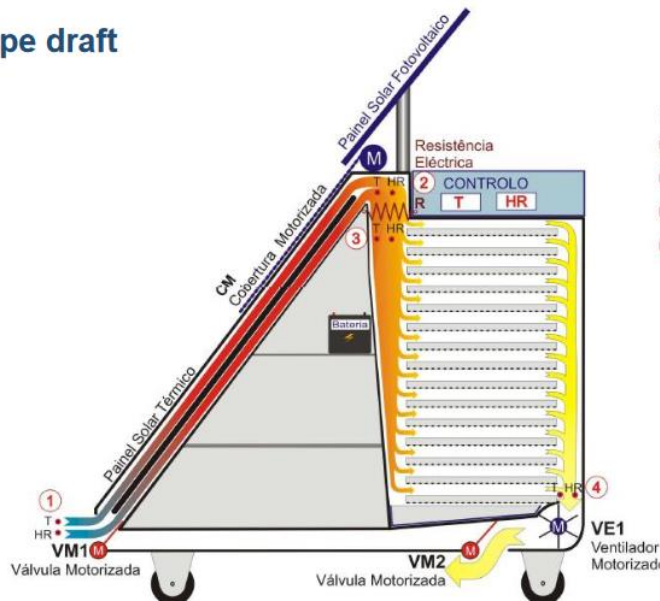


Figura G. Pre-prototipo Dry EcoMate.

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

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

H. SECMAD – INETI

O Projeto SECMAD, que significa “secagem de madeira com eficiência energética”. O conceito utiliza ventilação natural e mecânica controlada por um sistema de instrumentação e controle, responsável pelas condições ambientais internas e externas.

Os secadores permitem secar 50 m³ em 33 dias, para madeira de pinheiro-bravo até 12% de humidade. O desempenho do processo de secagem tem uma dependência sazonal e climática significativa, portanto, um sistema de controle interativo é essencial para aproveitar ao máximo as condições externas favoráveis.

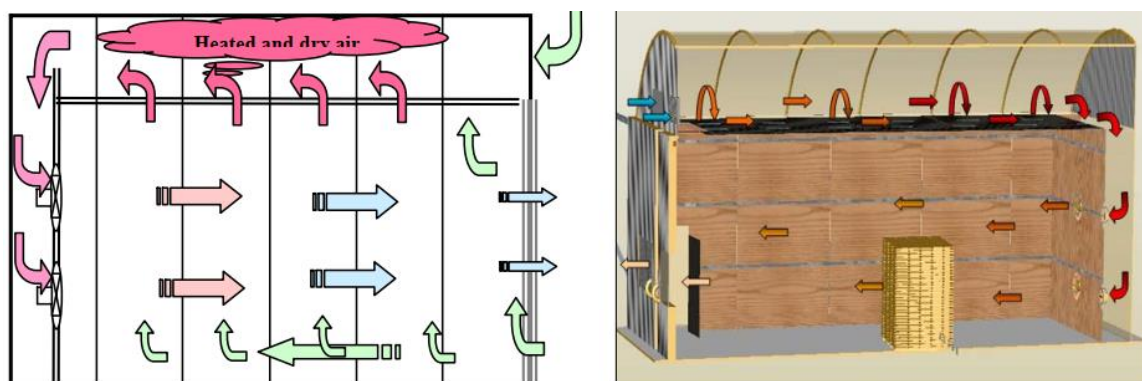


Figura H. Conceito de modelo de calor do secador de forno de madeira (locais de corte).

Ref.:

<http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/1585/1/Towards%20a%20competitive%20use%20of%20solar%20-%20paper.pdf>