

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**

**ENERGIA SOLAR TÉRMICA PARA O PROCESSO DE SECAGEM EM**  
**LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

**ROSYVAN KLEBER DANTAS TORRES**

São Paulo  
2017

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**

**ENERGIA SOLAR TÉRMICA PARA O PROCESSO DE SECAGEM EM**  
**LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

**ROSYVAN KLEBER DANTAS TORRES**

Monografia apresentada ao Programa de Educação continua da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração distribuída e Eficiência Energética.

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA USP**

**ROSYVAN KLEBER DANTAS TORRES**

**ENERGIA SOLAR TÉRMICA PARA O PROCESSO DE SECAGEM EM**  
**LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

Monografia apresentada ao Programa de Educação continua da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Energia Solar, Energia Solar Térmica.

Orientador: Prof. Daniel Setrak Sowmy

TORRES, ROSYVAN  
ENERGIA SOLAR TÉRMICA PARA O PROCESSO DE SECAGEM EM  
LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES / R. TORRES --  
São Paulo, 2017.  
114 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída  
e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.  
Universidade de São Paulo. Escola  
Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada  
em Engenharia II.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por terem me dado a base para buscar meus sonhos e ideais mesmo diante das dificuldades.

Agradeço aos amigos que fiz durante o curso, pelas horas de descontração e pela ajuda durante as aulas e trabalhos.

Agradeço aos professores do curso e à USP por tornar possível a realização do curso.

Agradeço ao Prof. Daniel Setrak Sowmy pela orientação na monografia.

Agradeço a minha esposa pelo apoio desempenhado ao longo de todo o curso, pela paciência diante dos momentos de irritabilidade, pelo carinho e amor fornecidos durante os anos que deixaram os dias mais leves e fáceis de enfrentar, mesmo diante das mais diversas dificuldades.

E por fim, agradeço a Deus, por todas as realizações até aqui alcançadas, e agora pela realização de finalização do curso de especialização.

## RESUMO

Existem basicamente dois métodos comuns de secagem de lodo, secagem térmica e secagem solar. Enquanto a secagem térmica requer grande quantidade de energia, a secagem solar normalmente não pode atingir o requisito de 90% de secagem de lodo. Os estudos da literatura enfatizam os benefícios da secagem solar utilizada como "secador solar de estufa" para reduzir a demanda de energia, mas esses secadores não conseguem atingir 90% de secagem de lodo sem qualquer calor auxiliar.

Os processos de secagem podem ser realizados naturalmente, a partir do emprego de leitos de secagem, estruturas econômicas e de fácil operação que, entretanto, requerem extensas áreas e se caracterizam por serem demorados. Já os sistemas mecanizados, agregam maior valor na aquisição, implantação e operação, mas possuem a vantagem de menor tempo e espaço operacional. Diante disso, o presente trabalho busca avaliar o uso de coletores solares como fonte de calor auxiliar nesse processo.

Palavras-chave: lodo; secagem térmica, secagem solar, extensas áreas, otimização de custos, secador solar de estufa, coletores solares, secagem de lodo, secador térmico.

## **ABSTRACT**

There are basically two common methods of sludge drying, thermal drying and solar drying. While a second temperature requires large amounts of energy, solar drying typically cannot require the request for 90% sludge drying. Literature studies emphasize solar drying products as "solar greenhouse dryer" to reduce energy demand, but these are not achieved. 90% sludge drying without any auxiliary heat.

The drying processes can be carried out naturally, from leasing jobs, economic structures and easy operation, between, require extensive areas and are characterized by being time consuming. Mechanized systems, however, add greater value to acquisition, deployment, and operation, but have the advantage of shorter time and operating space. Therefore, the present work to evaluate the use of solar collectors as auxiliary heat source in the process.

**Keywords:** sludge; Thermal drying, solar drying, extensive areas, cost optimization, solar oven dryer, solar collectors, sludge drying, thermal dryer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Atlas Solarimétrico do Brasil.....	34
Figura 2.2	Espectro de Radiação de Acordo com o Comprimento de Onda.. .....	35
Figura 2.3	Modelo de Coletor Solar Aberto.....	36
Figura 2.4	Secção Típica de um Coletor Solar Plano Fechado.....	37
Figura 2.5	Modelo de Tubo a Vácuo Heat Pipe.....	38
Figura 2.6	Circulação e Absorção de Calor do Sistema U-Tube.....	39
Figura 2.7	Coletor Solar de Tubos a Vácuo Tipo Water-in-Glass.....	40
Figura 2.8	Tubo a Vácuo e sua Constituição por Camadas.....	41
Figura 2.9	Modelo de Reservatório Térmico.....	42
Figura 2.10	Sistema de Termossifão com Placas e Reservatório.....	43
Figura 2.11	Balanço de Massa Geral para o Teor de Água no Lodo.....	44
Figura 2.12	Curva de Umidade de Equilíbrio.....	53
Figura 2.13	Curva de Umidade de Equilíbrio de Vários Materiais.....	55
Figura 2.14	Secagem Sob Condições Constantes do meio de Secagem.....	57
Figura 2.15	Curva do Teor de Umidade em Função do Tempo de Secagem.....	58
Figura 2.16	Curva de Velocidade de Secagem em Função do tempo.....	58
Figura 2.17	Curva Típica de Velocidade de Secagem em Função da Umidade do Sólido.....	59
Figura 2.18	Esquemática do Processo de Secagem Direta ou Convectiva.....	66
Figura 2.19	Esquemática do Processo de Secagem Indireta ou Conductiva.....	67
Figura 2.20	Exemplo de Secador Rotativo.....	72
Figura 2.21	Secador Transportador de Esteira (Túnel).....	74
Figura 2.22	Secador de Soleiras Múltiplas.....	75
Figura 2.23	Esquema Geral de uma Planta de Secagem Solar .....	76
Figura 2.24	Leito Modificado com a Rede de Tubos Galvanizados.....	78
Figura 2.25	Esquema de um Sistema de Secagem Solar de Estufa.....	79
Figura 2.26	Vista da Planta de Secagem Solar de Estufa de Palma de Maiorca na Espanha.....	82
Figura 2.27	Visão da Planta de Secagem Solar de Lodo em Manágua/ Nicarágua.....	83



Figura 2.28 Visão da Planta de Secagem Solar de Lodo em Manágua/ Nicarágua.....	83
Figura 2.29 Fábrica de Tratamento de Águas Residuais de Fethiye – Unidade de Secagem Solar de Estufa .....	84
Figura 2.30 Sistema de secagem solar em estufa (Huber).....	85
Figura 2.31 Distribuição de lodo molhado, secagem e carga de lamas secas na estação de secagem solar de Palma de Mallorca.....	85
Figura 2.32 Fábrica de tratamento de águas residuais de Fethiye - Unidade de secagem solar .....	86
Figura 2.33 Aquecimento auxiliar de sistemas de secagem solar em estufa.....	87
Figura 3.1 ETE1- (UASB-AC).....	92
Figura 3.2 ETE2- (DP-LAC-DL).....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Características dos Secadores Diretos e Indiretos.....	70
Tabela 2.2 Custos para a Secagem Solar de 21 Toneladas/dia de Lodo do Relatório de Viabilidade de Antalaya.....	88
Tabela 3.1 Descrição dos Sistemas Avaliados para cada uma das Estações e Tratamento.....	93
Tabela 3.2 Dados Iniciais para a Realização dos Cálculos .....	94
Tabela 4.1 Resumo dos Resultados Obtidos ETE 1.....	100
Tabela 4.2 Resumo dos Resultados Obtidos ETE 2.....	101
Tabela 4.3 Indicadores Analisados.....	103
Tabela 5.1 Características do esgoto e vazão de projeto.....	113
Tabela 5.2 Parâmetros de projeto – Lodo ativado .....	113
Tabela 5.3 Parâmetros de projeto – Lodo ativado.....	114
Tabela 5.4 Parâmetros do decantador primário.....	114
Tabela 5.5 Parâmetros de projeto - Tanque de aeração após decantador Primário.....	114
Tabela 5.6 Parâmetros para os decantadores secundários - Tanque de Aeração após UASB.....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPEX	<i>Capital expenditure</i> (Investimento em bens de capital)
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
ECO92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETAR's	Estação de Tratamento de Águas Residuais
ETE's	Estações de Tratamento de Efluentes
LAC	Lodo ativado convencional
NBR	Norma Brasileira
OPEX	<i>Operational expenditure</i> (Despesas operacionais)
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

CFU	Coliform Fecal Unit
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DS	Densidade de Sólidos
DSC	Dry Content Solid
DSf	Densidade de Sólidos Finais
DSI	Densidade de Sólidos Iniciais
DL	Digestor anaeróbico de Lodo
DP	Decantador primário
kcal	Kilocaloria
kg/h	Kilograma por Hora
kJ	KiloJoule
kw/h	Kilowatts por Hora
MJ	Mega Joule
m <sup>2</sup>	Metro Quadrado
MPN	Most Probable Number
R\$	Reais
SS	Sólidos Suspensos
Ton	Tonelada
TS	Teor de Sólidos
US\$	Dólar
€	Euros

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	16
1.1. Objetivo .....	16
1.2. Motivação e Justificativa.....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1. Problemática do Lodo.....	18
2.1.1. Classificação de Lodos Gerados em ETE's.....	21
2.1.2. Composição dos Lodos de ETE's.....	22
2.2. Processamento dos Lodos de ETE's.....	22
2.2.1. Adensamento .....	23
2.2.2. Estabilização .....	24
2.2.3. Condicionamento.....	25
2.2.4. Desaguamento .....	25
2.2.5. Higienização .....	27
2.2.6. Disposição Final .....	28
2.3. Energias Renováveis.....	31
2.3.1. Energia Solar.....	32
2.3.1.1 Energia Solar Térmica.....	32
2.3.2. Radiação Solar.....	33
2.4. Sistemas de Coletores Solares.....	35
2.4.1. Coletores Solares Concentrados.....	35
2.4.2. Coletores Solares Planos .....	36
2.4.2.1 Coletor Solar Plano Aberto.....	36
2.4.2.2 Coletor Solar Plano Fechado .....	37
2.4.3. Coletor Solar de Tubos a Vácuo.....	37
2.4.3.1 Coletor Solar de Tubo a Vácuo Tipo Heat -Pipe .....	38
2.4.3.2 Coletor Solar de Tubo a Vácuo Tipo U-Tube.....	39
2.4.3.3 Coletor Solar de Tubo a Vácuo Tipo All-Glass ou Water in Glass.....	39
2.4.4. Reservatório Térmico .....	41

2.5.	Técnicas e Métodos de Secagem de Lodo.....	43
2.6.	Secagem Térmica de Lodo.....	45
2.6.1.	Conceitos Gerais.....	45
2.6.1.1	Associação Água-Sólidos no Lodo.....	46
2.6.2.	Terminologia.....	47
2.6.3.	Umidade de Um Sólido.....	49
2.6.4.	Condição de Equilíbrio de um Sólido Úmido com o Meio de Secagem.....	51
2.6.5.	Secagem sob Condições do Meio de Seca.....	56
2.6.5.1.	Período de Velocidade de Secagem Constante.....	60
2.6.5.2.	Período de Velocidade de Secagem Decrescente.....	61
2.6.5.3.	Secagem sob Condições Variáveis.....	63
2.7.	Formas de Transferência de Calor.....	65
2.7.1.	Processo de Secagem por Convecção .....	65
2.7.2.	Processo de Secagem por Condução.....	66
2.7.3.	Processo de Secagem por Radiação.....	67
2.8.	Consumo de Energia Térmica.....	68
2.9.	Secadores .....	69
2.9.1.	Secadores Rotativos.....	72
2.9.1.1	Secadores Rotativos Diretos.....	73
2.9.1.2.	Secadores Rotativos Indiretos.....	73
2.9.2.	Secadores Tipo Esteira (Túnel) .....	74
2.9.3.	Secadores de Soleiras Múltiplas.....	74
2.9.4.	Planta de Secagem Solar .....	75
2.10.	Sistemas de Secagem Solar Convencionais.....	76
2.10.1.	Secador Solar com Estufa.....	78
2.11.	Aplicações de Secadores Solares de Estufa.....	81
2.12.	Parâmetros de Projeto de um Secador Solar de Estufa .....	84
2.12.1.	Uso de Calor Auxiliar em Aquecedores Solares de Estufa.....	87
2.12.	Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV).....	89
2.12.1.	Classificação dos Custos.....	90
2.12.2.	Análise de Viabilidade Econômica.....	90

2.12.3.	Método do valor Presente Líquido.....	90
3.	METODOLOGIA.....	91
3.1.	Descrição das Estações de Tratamento Avaliadas no Trabalho.....	91
3.1.1.	ETE-1: Reator UASB Seguido por Lodo Ativado Convencional.....	91
3.1.2.	ETE-2: Lodo Ativado Convencional Seguido de Digestor de Lodo.....	92
3.2.	Alternativas para Avaliação dos Sistemas de Secagem Térmica.....	93
3.3.	Cálculo do Custo Operacional Diário.....	96
3.3.1.	Custo com Disposição Final de Lodo.....	96
3.3.2.	Custo de Operação e Manutenção.....	97
3.3.3.	Custo com Energia Elétrica.....	97
3.3.4.	Custo com Gás Natural.....	98
3.3.5.	Cálculo do valor Presente do Custo Operacional.....	99
3.4.	Custos de Investimento no Sistema de Secagem Térmica.....	99
3.5.	Custo Total do Sistema Avaliado.....	100
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	100
4.1.	Interpretação dos resultados das tabelas 4.1 e 4.2.....	102
4.2.	Economia Observada no Sistema Solar.....	103
5.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
	ANEXOS.....	112

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar a energia solar térmica, como uma alternativa de fonte de calor auxiliar no processo de secagem de lodo.

### 1.2. Motivação e Justificativas

A secagem térmica consiste em, através da aplicação de calor, possibilitar a redução do percentual de umidade contida no lodo. O lodo afluyente é composto de 95 - 98% de água (variando de acordo com o tratamento pré-empregado), segundo (ANDREOLI; e outros, 2001). Com a redução da umidade tem-se uma redução de volume quase de mesma proporção, visto que não é possível remover totalmente a umidade, restando cerca de 5 - 10%, segundo (DAVID, 2002). Sendo que ainda com o aquecimento, os organismos patogênicos são eliminados.

A desidratação, a secagem e o espessamento são três técnicas para remover a água dos lodos. Essas técnicas podem remover água em até 32%, 6% e 63%, respectivamente (FLAGA, 2007). A secagem tem uma série de vantagens em comparação com a desidratação e o espessamento. Pode remover mais água do que a desidratação e o espessamento, o que resulta em um volume de lodo mínimo. Reduzir o volume de lodo diminui o custo de transporte. Além disso, lodo seco com secagem térmica não precisa de estabilização ou remoção de patógenos. A lama seca pode ser armazenada com facilidade e segurança (FLAGA, 2007). Além disso, o lodo seco é preferível ao molhado porque pode ser usado como uma fonte de combustível alternativa em uma instalação de combustão ou como um condicionador de solo na agricultura (STASTA, 2006; FLAGA, 2007). Para atingir todos esses benefícios, a técnica de secagem mais utilizada é a secagem térmica. Um secador térmico é uma máquina, que funciona com o princípio da troca de calor. Ele usa um combustível fóssil para aquecer a superfície de secagem ou o ar de secagem (FLAGA, 2007). As emissões e os



custos de alta energia são as desvantagens de um secador térmico. Para reduzir o alto custo, pode-se utilizar a integração de sistemas de co-geração, o uso de calor residual ou a adição de energia solar. Neste estudo, a opção de secagem por energia solar é avaliada para a secagem de lodo.

Atualmente, a radiação solar é a fonte de energia renovável mais comum. A secagem solar com estufa é uma abordagem para usar a energia solar para lodo seco. O secador solar com efeito de estufa é construído como estufa de tipo túnel, as lamas no secador estão em constantes revolvimento e o ar no secador do túnel em constante ventilação. O secador solar com efeito de estufa é mais barato, a operação é fácil e não precisa de mão-de-obra qualificada quando comparada aos secadores térmicos (RITTERBUSCH et al.,2012). No entanto, este sistema não pode atingir 90% de DS (Densidade de Sólidos) a qualquer momento, em qualquer região. Portanto, esse sistema deve ser suportado com energia adicional. O uso de coletores solares pode ser uma alternativa para obter energia adicional para atingir 90% de DS ou para minimizar a área de secagem de lodo requerida. A secagem de frutas e vegetais geralmente usa coletores solares para alcançar alta proporção de secagem em pouco tempo (SANDLER, 2006). No entanto, há falta de estudos sobre a secagem de lodo com coletores solares e / ou combinação de coletores solares com secagem solar em estufa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem o objetivo de trazer uma pesquisa realizada junto à literatura acerca do tema trabalhado, secagem térmica solar de lodos de efluentes. Versará inicialmente sobre os problemas encontrados no descarte e disposição final dos lodos, dirigindo-se posteriormente para sua geração, processamento e caracterização, para uma compreensão sobre o produto que está sendo estudado. Em seguida teremos um detalhamento do processo de secagem térmica e secagem térmica solar.

### 2.1 Problemática do Lodo

A disposição final dos resíduos sólidos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes industriais e sanitários (lodos) tem sido debatida com frequência devido o esgotamento dos aterros sanitários, que está entre as opções de destinações finais mais usuais para tais resíduos, e o constante aumento do volume gerado, advindo do avanço quantitativo dos tratamentos de esgotos.

BORGES ET AL. (2008) destaca que a disposição final de lodos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes industriais e sanitários desponta como um problema de abrangência mundial. Borges et al. (2008) sugere ainda que utilizar o resíduo final do tratamento de lodo como matéria-prima alternativa em alguns processos pode representar uma solução econômica e ambientalmente viável.

LEE E SANTOS (2011) reforçam que o gerenciamento do lodo é um problema atual e de preocupação mundial, devido ao grande volume gerado de material por dia.

Afirmam ainda que o volume gerado de lodo esteja aumentando de tal maneira, que somente os usos tradicionais de destinação final do lodo serão inviáveis econômica e ambientalmente.

Os resíduos de saneamento são os resíduos gerados nas atividades de saneamento básico, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos. O assunto sobre a administração e gerenciamento corretos desses resíduos é tão importante ambiental, econômica e socialmente, que está presente na Agenda 21 dos países, estabelecida após a realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente (CNUMAD), em 1992 no Rio de Janeiro (ECO-92), (LEE e SANTOS, 2011).

Segundo SPERLING et al. (2001) o gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é muito complexo e representa um alto custo, que, se mal executado, pode vir a comprometer os benefícios sanitários e ambientais aguardados destes sistemas.

A sociedade e as agências ambientais têm aplicado exigências crescentes por padrões de qualidade ambiental melhores, e isso tem se refletido nos gestores públicos e privados dos serviços de saneamento (SPERLING et al., 2001). Por isso, atualmente, em vários estados brasileiros, os órgãos ambientais já estão exigindo a definição técnica da disposição final do lodo nos processos de licenciamento das Estações de Tratamento de Efluentes - ETE's (PINHEIRO, 2012).

Segundo a legislação de muitos países, incluindo a brasileira, a responsabilidade pelos danos que podem ser causados pelo destino inadequado e irresponsável dos lodos de ETE's é sempre dos geradores do resíduo, que podem vir a ser enquadrados na lei de crimes ambientais (ANDREOLI et al., 2001).

O termo "lodo" é utilizado para se referir aos subprodutos sólidos do tratamento de esgotos, segundo SPERLING et al. (2001). Contudo tal autor sugere também denominá-lo biossólido, com base no tratamento adotado que

consiste em processos biológicos. Parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, pertencendo à biomassa microbiana, denominada também de lodo biológico ou secundário, que é composto principalmente de sólidos biológicos, o que justifica esta denominação. Porém no presente trabalho adotaremos o termo lodo para designar tais subprodutos.

O lodo de esgoto tipicamente apresenta 95 - 98% de água. 70 a 80% dos sólidos contidos no lodo são matéria orgânica, incluindo óleos e graxas. Podem também ser encontradas quantidades razoáveis de contaminantes, refletindo as características do esgoto afluyente as ETE's (SANTOS et al., 2012). Ocorrendo a redução da quantidade de água do lodo, tem-se uma redução concomitante do volume deste, o que representa um fator positivo para sua disposição final.

SPERLING et al. (2001) afirma que o lodo representa apenas de 1% a 2% do volume do esgoto tratado, contudo seu custo abrange geralmente entre 20% e 60% do total gasto com a operação de uma ETE. Além do impacto econômico do tratamento do lodo, a sua disposição final é uma operação bastante complexa, que, por muitas vezes, ultrapassa os limites das ETE's.

SANTOS et al. (2012) menciona a necessidade de caracterizar o lodo efluente de ETE's, para que seja possível a sua caracterização, cadastro e classificação, sendo possível assim escolher a solução mais coerente para sua disposição final. Pois as características do lodo são diretamente influenciadas pela origem do esgoto, carregando traços dos processos e substâncias formadoras e, quando doméstico, características intrínsecas ao modo de vida da população.

Além disso, PINHEIRO (2012) ressalta que cada tecnologia de tratamento irá gerar lodos com características e volumes distintos, sendo necessário considerar tal informação no momento de escolha do tratamento que será adotado.

Para SANIN et al. (2010) a única generalização que pode ser feita acerca de lodos é que eles são diferentes e justifica que se todos os lodos fossem os mesmos, não haveria necessidade de sofisticados métodos de caracterização e análise, ou o desenvolvimento de métodos para a concepção de operações de manuseio e descarte de lodo.

Dessa forma, a quantidade e as características dos lodos produzidos são definidas pela qualidade dos esgotos e pela opção de tratamento de esgotos adotada. Os mecanismos de gestão desses resíduos devem ser previstos já no período de concepção do sistema, evitando assim, transtornos e impactos ambientais negativos vinculados à falta de planejamento e de estratégia para disposição ou reutilização desses resíduos (ANDREOLI et al., 2001).

#### 2.1.1. Classificação de Lodos Gerados em ETE

Segundo ANDREOLI et al., (2006) para os processos convencionais de tratamento de esgoto, o lodo gerado ao longo das etapas é classificado conforme a fase de tratamento onde foram originados. A classificação pode ser feita em lodo primário, secundário e químico podendo ser digerido ou não. O lodo primário é aquele removido dos decantadores primários.

Apresenta características que são variáveis e dependem do grau de adensamento que é proporcionado nos decantadores. Possui uma concentração de sólidos secos variando entre 2 e 6% e sua produção é da ordem de 35 g SS/(hab.dia) a 40 g SS/(hab.dia) (ANDREOLI, 2001).

O lodo primário é altamente putrescível, o que gera maus odores. Além disso, apresenta uma grande quantidade de microrganismos, que podem causar diversos tipos de doenças caso entre em contato com o ser humano (DAVID, 2002).

O lodo secundário pode ser definido como aquele originado através dos processos de conversão biológica em tratamento por lodo ativado e posteriormente separado através de decantadores secundários (JORDAO; PESSÔA, 2014). Esse

lodo é a própria biomassa que cresceu à custa do alimento fornecido pelo esgoto doméstico. Apresenta uma concentração de sólidos secos variando entre 0,6 e 1% e a sua produção é da ordem de 25 g SS/(hab.dia) a 35 g SS/(hab.dia) (ANDREOLI, 2001).

### 2.1.2. Composição dos lodos gerados em ETE'S

Os lodos brutos obtidos a partir do tratamento de efluentes consistem em 95 a 99% de água. A parte restante é o lodo sólido com diferentes composições dependendo do tipo e características do efluente, da tecnologia de tratamento aplicada e das condições operacionais (HOUDKOVÁ et al., 2008). O lodo bruto típico consiste em 60,27% de carbono, 6,51% de hidrogênio, 24,89% de oxigênio, 8,35% de nitrogênio e 0% de enxofre (HOUDKOVÁ et al., 2008). Após a digestão, os valores mudam para 62,70% de carbono, 8,27% de hidrogênio, 19,45% de oxigênio, 7,38% de nitrogênio e 2,22% de enxofre, respectivamente (HOUDKOVÁ et al., 2008).

O conteúdo de lodo seco das ETE's é semelhante à composição do carvão marrom, que tem 21 MJ / kg de poder calorífico (STASTA et al., 2006). O lodo também inclui compostos de fósforo e potássio. Os valores típicos dos lodos de efluentes estabilizados são 3,3% de nitrogênio, 2,3% de fósforo e 0,3% de potássio (TCHOBANOGLOUS et al., 2003; HARRINGTON, 2013). Embora esses valores sejam menores em comparação com fertilizantes para uso agrícola típico (5% de nitrogênio, 10 % de fósforo e 10% de potássio), o lodo fornece nutrientes suficientes para o bom crescimento das plantas (METCALF, 2003). Para se beneficiar das partículas sólidas de lodo, o obstáculo do alto teor de água deve ser reduzido.

### 2.2. Processamento do Lodo de ETE's

As principais etapas do gerenciamento tradicional do lodo, segundo SPERLING et al. (2001), são:

- Adensamento: para remoção de umidade;

- Estabilização: para remoção de matéria orgânica;
- Condicionamento: preparação para a desidratação;
- Desaguamento: para remoção de umidade;
- Higienização: para remoção de organismos patogênicos;
- Disposição final: descarte dos subprodutos.

O processo de secagem térmica atua unindo algumas destas etapas, resultando em uma diminuição do número destas. O desaguamento e a higienização ocorrem simultaneamente, e a etapa de condicionamento pode-se fazer desnecessária. Também está em desenvolvimento técnicas de secagem térmica que permitirão a entrada do lodo bruto, unindo todo o tratamento do lodo em apenas uma etapa (SPERLING et al., 2001).

#### 2.2.1. Adensamento

O adensamento consiste em um processo físico para concentração de sólidos no lodo, buscando reduzir sua umidade, e por consequência, seu volume (SPERLING et al., 2001). Para PINHEIRO (2012) o adensamento também pode ser denominado de espessamento e busca a redução do volume do lodo para facilitar seu manuseio, processamento e destino final.

Segundo ANDREOLI et al. (2001) o adensamento é mais utilizado nos processos de tratamento primário, lodos ativados e filtros biológicos percoladores, sendo de suma importância para o dimensionamento e para a operação dos digestores e para o manuseio do lodo, em vista que o comportamento do lodo varia com o teor de sólidos.

Os principais processos utilizados para o adensamento do lodo são: adensador por gravidade, adensador por flotação, adensador por centrifugação e adensador de esteiras (PINHEIRO, 2012).

### 2.2.2 Estabilização

Para SPERLING et al. (2001) a estabilização busca atenuar o inconveniente de maus odores nas etapas posteriores do tratamento do lodo. Esta redução é possível através da remoção da matéria orgânica biodegradável presente no lodo. Já para ANDREOLI et al. (2001), além da redução de maus odores, o processo de estabilização do lodo prevê também a redução de patógenos. Contudo, a importância destes fatores está associada as demais etapas de destinação final do lodo, precisando ser definida de forma articulada com seu uso pós-tratamento (ANDREOLI et al., 2001).

Ainda para ANDREOLI et al. (2001), quanto mais o lodo se assemelhar à matéria orgânica “fresca”, maior será seu potencial de putrefação e produção de maus odores. Maior também será a quantidade de microrganismos patogênicos, devido à grande quantidade desses microrganismos presentes nos efluentes. À medida que este lodo passa por processos de biotransformação, alguns de seus componentes orgânicos, com maior propensão a biodegradação, são transformados, e o lodo passa a ser considerado estabilizado, apresentando odor menos ofensivo e menor concentração de patógenos.

SPERLING et al. (2001) divide os processos de estabilização em 3 categorias:

- Estabilização biológica: promove a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica através da utilização de bactérias específicas;
- Estabilização química: a estabilização ocorre por meio da oxidação química da matéria orgânica;
- Estabilização térmica: ocorre através da aplicação de calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados.



### 2.2.3 Condicionamento

O condicionamento é um processo no qual a adição de produtos químicos visa aumentar a aptidão do lodo para o desaguamento e melhorar a captura de sólidos nos sistemas de desidratação do lodo (SPERLING et al., 2001). ANDREOLI et al. (2001) sugere que, além da adição de produtos químicos, o condicionamento também poderá ser realizado através de tratamento térmico.

Segundo ANDREOLI et al. (2001) este processo busca modificar o tamanho e a distribuição das partículas, as cargas de superfície e a interação das partículas no lodo. Ainda para este autor o principal objetivo do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas, através da envoltura das partículas pequenas em agregados maiores, pois a presença de partículas finas e colóides faz com que o lodo apresente reduzida aptidão ao desaguamento e acabam por gerar uma demanda maior de produtos químicos no processo de condicionamento.

Essa envoltura de partículas finas em agregados maiores se dá através da neutralização ou desestabilização das forças químicas ou físicas atuantes nas partículas finas e no material particulado em suspensão, imersos em meio líquido, isso permite que as partículas pequenas se unam para formar agregados maiores (DAVID, 2002).

SPERLING et al. (2001) menciona que lodos ativados ou lodos mistos apresentam dificuldades para atingir uma concentração de sólidos totais superior a 4% ou 6% sem utilizar condicionadores.

Os principais coagulantes utilizados são sais metálicos, a cal e os polímeros orgânicos (SPERLING et al., 2001).

### 2.2.4 Desaguamento

O objetivo do desaguamento ou desidratação é remover a água e reduzir ainda mais o volume, gerando um lodo com comportamento mais próximo

ao de um sólido. Esta etapa pode ser realizada por métodos naturais ou mecânicos e tem impacto importante nos custos de transporte e destino final, além de influenciar no manuseio do lodo, de acordo com a umidade final deste após essa etapa (SPERLING et al., 2001).

As principais razões para se realizar o desaguamento, segundo SPERLING et al. (2001) são:

- Redução do custo de transporte do resíduo final até o local de destinação final;
- Melhores condições de manuseio do lodo, devido à maior facilidade de transporte do lodo desaguado;
- Aumento do poder calorífico do lodo, por meio da diminuição do teor de umidade, visando um processo de incineração;
- Redução do volume para posterior disposição em aterros sanitários ou uso agrícola;
- Redução da produção de lixiviados, quando disposto em aterros sanitários.

Para ANDREOLI et al. (2001) a escolha do processo de desaguamento a ser aplicado dependerá do tipo de lodo e da área disponível. Não havendo restrições quanto à área, e tratando-se de ETE's de pequeno porte, processos naturais, como leitos de secagem, são sugeridos como uma boa alternativa. Já para ETE's de médio e grande porte, situadas em áreas urbanizadas e com pouca área disponível, os processos de desaguamento mecânico são alternativas mais cabíveis.

Os processos de desaguamento mais usuais no Brasil são os leitos de secagem, as lagoas de lodos, as centrífugas, as prensas desaguadoras e os filtros-prensa (ANDREOLI et al., 2001).

### 2.2.5 Higienização

A higienização ou desinfecção do lodo não é uma etapa obrigatória, pois dependerá da destinação final adotada para o lodo, como usos agrícolas. A higienização busca a eliminação dos microrganismos patogênicos presentes no lodo (SPERLING et al., 2001).

O lodo de esgoto doméstico concentra a maioria dos organismos presentes no esgoto afluente as ETE's, podendo apresentar-se como uma ameaça a saúde pública. Estes microrganismos são oriundos principalmente do material fecal contido no esgoto, que carrega as características sanitárias da população produtora, traduzindo desta forma o perfil de saúde desta população (ANDREOLI et al., 2001).

Para ANDREOLI et al. (2001), a higienização do lodo envolve processos que podem ser físicos, químicos ou biológicos, buscando sempre a redução de patógenos. Os processos que mais se destacam são a digestão aeróbia, digestão anaeróbia, compostagem, radiação beta e gama, pasteurização, tratamento térmico e caleação.

Pode-se tratar como alternativas mais econômicas os processos de caleação, compostagem e tratamento térmico com fonte de energia alternativa, segundo ANDREOLI et al. (2001). Ainda para este, tais processos tem como base utilizar três fatores que apresentam a capacidade de higienizar o lodo, são eles: pH, temperatura e radiação solar.

A caleação utiliza o princípio de aumento do pH, pois os microrganismos patogênicos quando expostos a níveis extremos de pH tendem a ser destruídos. Contudo este método de higienização acarreta o aumento do volume e do peso correspondente que serão dispostos, além de ser necessária uma posterior correção de pH caso o destino final seja o uso agrícola (ANDREOLI et al., 2001).

O processo de higienização através da compostagem faz uso do aumento da temperatura ocasionado pela própria atividade microbiológica para eliminação dos patógenos. Este processo é bastante difundido, mas também não há redução significativa do volume a ser descartado (ANDREOLI et al., 2001).

Para ANDREOLI et al. (2001) o método mais flexível no que tange aplicação e que surge como solução para uma melhor estabilização e desinfecção do lodo é o tratamento térmico através da secagem térmica, pois utiliza-se do princípio de elevação da temperatura, que responde com a eliminação dos microrganismos patogênicos, além de reduzir o volume através da perda de água. Outra vantagem deste método pode ser percebida quando a disposição final do resíduo for a agricultura, em vista que não há o inconveniente de correção de pH. O processo de secagem térmica, objeto de análise deste trabalho, será mais amplamente discutido no item 2.6.

#### 2.2.6 Disposição Final

A escolha da disposição final dos lodos de ETE's é uma tarefa normalmente complexa, porque envolve aspectos técnicos, econômicos, ambientais e legais que vão além da área da estação. O custo investido nesta etapa da destinação do lodo das ETE's é bastante elevado, logo este deve ser inserido no planejamento e projeto de uma ETE desde sua concepção, sendo gerido de forma vinculada com a qualidade do efluente a ser tratado, o tipo de tratamento a ser adotado e o processamento do lodo (SPERLING et al., 2001).

Em muitos países, segundo SPERLING et al. (2001) a prática de disposição em aterros sanitários já não é considerada uma prática sustentável, pois representa a cada dia, custos maiores em função do aumento das distâncias de transporte e restrições ambientais. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos só podem ser dispostos em aterros os rejeitos (resíduos que não apresentam possibilidade de tratamento e recuperação).

SPERLING et al. (2001) sugere então a reciclagem como o processo

que apresenta maior perspectiva de evolução, por tratar-se de uma alternativa econômica e ambientalmente adequada. Dentro dessa visão, o uso agrícola surge como uma boa alternativa, desde que utilizado com orientação técnica, de forma a garantir a segurança sanitária e ambiental e também os ganhos do produtor rural.

Para ANDREOLI et al. (2001) a reciclagem de lodos de ETE's a partir do uso na agricultura é uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável, pois o material orgânico presente no resíduo do tratamento de lodos é uma excelente fonte de nutrientes e aumentam a resistência do solo à erosão.

Esta alternativa é guiada pela Resolução CONAMA nº 375 de 2006, que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.

Contudo, tal resolução apresenta-se bastante restritiva, permitindo a aplicação da técnica apenas em culturas onde a parte comestível não entre em contato direto com o solo e descreve um programa de monitoramento constante e intenso. Tais restrições ocorrem devido ao potencial de contaminação associado ao lodo de esgoto.

Quando o lodo de ETE for direcionado para uso agrícola, cabe ressaltar que além da legislação e dos critérios de proteção ambiental, precisam ser analisados os atributos dos solos quanto ao seu uso agrícola. Para este fim, a visão deve ser mais abrangente do que um simples descarte, pois é necessário conhecimento do meio físico no espaço geográfico, inserindo a disposição do lodo no contexto socioeconômico do local (ANDREOLI et al., 2001).

Outro processo que, segundo SPERLING et al. (2001), apresentou grande crescimento foi a secagem mecânica, que pode fazer uso de polímeros para uma remoção da umidade mais eficaz. E outro processo que surge como tendência é a secagem térmica e a peletização do lodo que visa a melhoria da qualidade dos biossólidos.

SANIN et al. (2010) destaca que a secagem térmica é um processo diferente da incineração, pois, segundo o autor, o produto final da secagem térmica apresenta elevado teor de sólidos voláteis, enquanto a incineração envolve a completa oxidação dos voláteis e o produto final é um resíduo inerte. Além deste fator a incineração trabalha com temperaturas mais elevadas que o processo de secagem térmica, que apenas precisa atingir uma temperatura para evaporação da água.

SPERLING et al. (2001) diz que dentro de uma visão sustentável do processo, a eliminação final do lodo através de processos como incineração, uso de landfarming e disposição em aterros sanitários deve ser empregada somente quando sua valorização é impossível, pelo fato de o lodo conter contaminantes ou por não haver outra forma de uso possível próxima as ETE's.

Não há regras fixas para a escolha do método de disposição final dos lodos, para tanto é necessário um estudo criterioso de cada caso, para que a alternativa escolhida seja compatível com as demais variantes do processo de tratamento e apresente um bom rendimento operacional e econômico (SPERLING et al., 2001). Para uma avaliação específica de cada caso, o autor supracitado sugere quatro critérios a serem ponderados durante a escolha da melhor alternativa:

- Desempenho operacional;
- Flexibilidade;
- Custos;
- Impacto ambiental.

Desempenho operacional: para SPERLING et al. (2001) além do bom funcionamento, deve ser observada a simplicidade técnica e operacional de cada alternativa. Tecnologias inovadoras ou readequadas a condição local devem ser avaliadas nos seus pontos críticos.

Flexibilidade: a flexibilização para disposição final do lodo deve ocorrer quanto a sua quantidade e qualidade. Há opções que não possibilitam tais flexibilizações, como o uso na agricultura, que restringe qualitativamente o lodo (SPERLING et al., 2001).

Custos: para análise dos custos, SPERLING et al. (2001), sugere que estes devem ser divididos em custos de processamento do lodo, transporte e disposição final. E cada um destes divididos em custos de investimento e custos operacionais. O objetivo deve ser agrupar os custos conforme sua natureza, para deixar clara a comparação entre diferentes métodos.

Impacto ambiental: deve-se analisar os impactos positivos e os negativos, visando através de procedimentos operacionais minimizar os impactos negativos (SPERLING et al., 2001).

## 2.3 Energias Renováveis

Com seu vasto território, o Brasil é um país com grande potencial energético de fontes limpas, renováveis e menos invasivas, sobressaindo-se inclusive quando comparado a outros países. Sua riqueza de recursos hídricos o coloca como terceiro maior potencial hidráulico do mundo, sendo atualmente, a maior fonte geradora de energia do país (GOLDEMBERG, 2012).

Entretanto, observa-se uma evolução na diversificação da matriz energética, ao passo que diferentes fontes, alternativas à utilização de combustíveis fósseis e recursos hídricos, devido aos impactos ambientais, passam a receber atenção e investimentos (GOLDEMBERG, 2012). Temos potencial para geração energética renovável a partir de biomassa, energia eólica, ondomotriz e solar.

A energia solar é um dos recursos naturais mais promissores do mundo, abrangendo diferentes finalidades, vindo de encontro ao ritmo acelerado do avanço tecnológico, que busca cada vez mais desempenho e eficiência na sua

aplicação, com menores impactos ambientais e custos operacionais (GOLDEMBERG, 2012).

### 2.3.1 Energia Solar

A energia solar, segundo TOLMASQUIM (2003), é dividida em dois grupos. O primeiro é denominado ativo, que se divide em energia solar fotovoltaica e térmica. A energia solar fotovoltaica é utilizada na geração de energia elétrica descentralizada, através de placas coletoras fotovoltaicas. Já a energia solar térmica é utilizada no aquecimento de água através de sistemas coletores de energia solar, que convertem em calor para o líquido de trabalho. O segundo é denominado passivo, e é utilizado como arquitetura solar, buscando conforto térmico aliando a arquitetura estrutural e de materiais.

De acordo com DIAS (2005), a energia solar é a denominação dada à captação de energia luminosa proveniente do sol, posterior transformação em diferentes tipos de energias. Além da energia luminosa, a energia do sol pode ser convertida também em energia térmica e energia elétrica. A energia solar pode ser utilizada para o aquecimento de água com o uso de coletores solares, e destinada a variadas aplicações.

#### 2.3.1.1 Energia solar térmica

A energia solar térmica é uma energia ativa segundo TOLMASQUIM (2003), e está sendo amplamente utilizada tanto em ambientes residenciais e industriais, para aquecimento de água. O sistema tem se mostrado viável para o Brasil devido a sua posição global favorável, em que recebe elevados índices de insolação durante todo o ano.

A demanda de água aquecida varia durante diferentes estações do ano. No inverno, ela é maior e, inversamente proporcional à captação da radiação solar, que diminui nesse período. O prejuízo, devido ao menor índice de radiação solar direta, gera queda na sua eficiência em dias nebulosos. Por isso, o sistema conta



com resistências, para manter a temperatura desejada nesses períodos (GOLDEMBERG, 2012).

No Brasil, apesar de termos como principais fontes geradoras de energia as usinas hidroelétricas, consideradas energias limpas, o custo com a energia vem aumentando gradativamente para atender a demanda crescente de consumo. Desta forma, a tecnologia de aquecimento solar de água vem crescendo gradativamente no Brasil (GOLDEMBERG, 2012).

### 2.3.2 Radiação solar

A energia solar, ou energia radiante, não é homogênea em todo o território global. O planeta recebe diferentes níveis de radiação em cada latitude, os quais também variam de acordo com as diferentes estações do ano. O Brasil é um país privilegiado. Está localizado, em sua maior parte, em uma região tropical do planeta, com grande incidência de radiação solar durante todo o ano (MOURÃO, 2002).

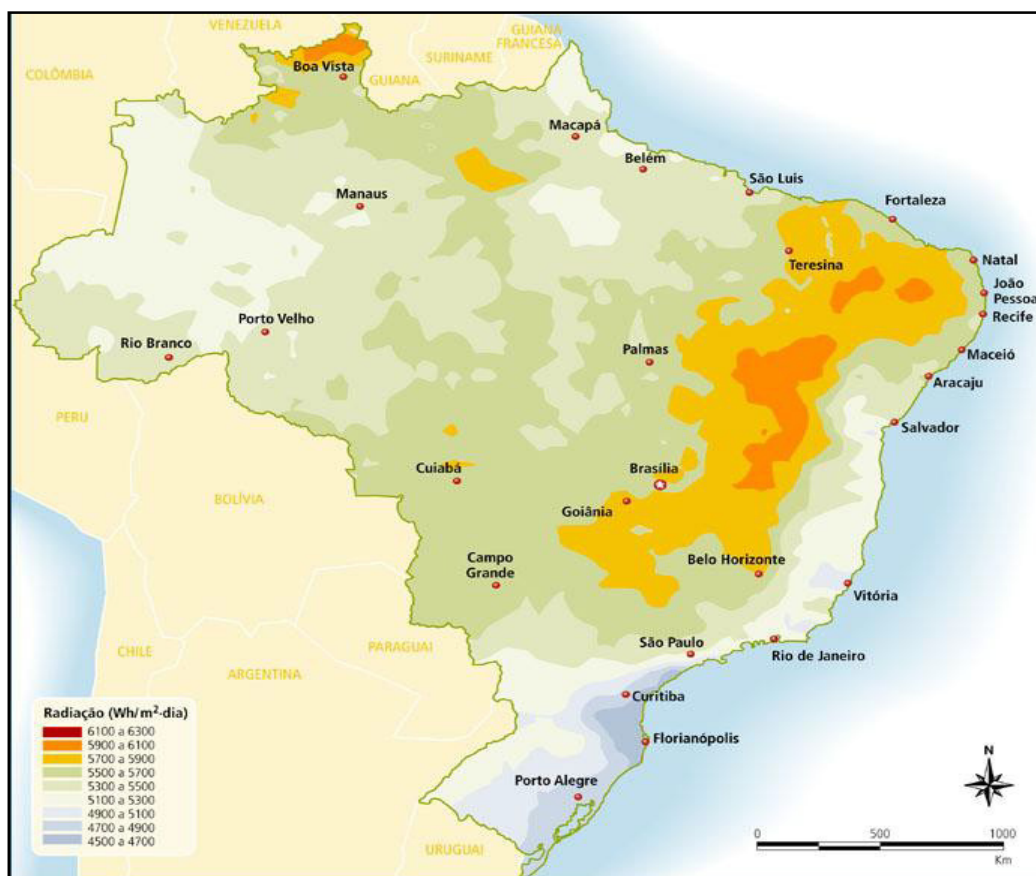
Segundo LABEEE (2010), a radiação solar, ao entrar na atmosfera terrestre, divide-se em direta e difusa. A radiação direta é a parcela de radiação emitida pelo sol que atinge a terra, apenas sofrendo alteração pela atmosfera. Já a difusa sofre algum tipo de dispersão e irradiação ocasionada pelas nuvens, e por partículas suspensas na atmosfera.

De acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a grande maioria da população e as atividades socioeconômicas do país se encontram abaixo da linha do equador, onde o nível de radiação varia durante todo o ano. Por exemplo, a cidade de Porto Alegre, que se encontra na latitude cerca de 30º Sul, tem uma insolação diária que varia entre 10 horas e 13 minutos a 13 horas e 47 minutos, nos períodos entre 21 de julho a 22 de dezembro. Com isso, os sistemas de captação da energia solar, para maior eficiência, deverão respeitar uma inclinação voltada ao norte geográfico do planeta.

O ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL (2000), que possui dados coletados por interpolação e extrapolação em estações solarimétricas em todo o

território nacional, estima a energia radiante incidente no país. Os dados obtidos por esse sistema são relacionados à radiação solar e imagens de satélites. Os resultados obtidos podem ser analisados na Figura 2.1, onde a variação da radiação solar é representada por diferentes níveis de cores. As cores mais escuras representam maiores índices de insolação e as cores claras índices de menor insolação, sendo cada um devido ao índice de energia radiante em  $\text{Wh/m}^2$  dia.

Figura 2.1- Atlas Solarimétrico do Brasil.

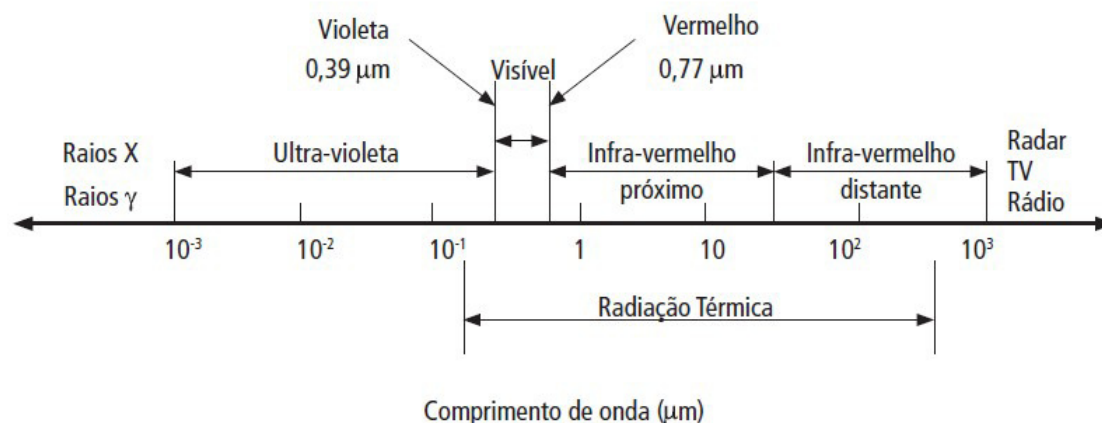


Fonte: ATLAS Solarimétrico do Brasil (2000).

O sol emite energia com intensidades diferentes de comprimento de onda, sendo esta denominada espectral. A energia irradiada pelo sol encontra-se, em sua maior parte, na faixa do espectro que vai de  $0,3$  a  $3\mu\text{m}$ , que poderá ser transformada em calor pelos coletores solares (LABEEE, 2010).

A Figura 2.2 mostra as diferentes faixas do espectro de radiação, destacando a radiação térmica que se encontra entre o ultravioleta e o infravermelho.

Figura 2.2 - Espectro de radiação de acordo com o comprimento de onda.



Fonte: LABEEE, 2010b.

## 2.4 Sistemas de coletores solares

Conforme TOLMASQUIM (2003), os coletores solares são equipamentos responsáveis pela absorção da energia solar e sua transferência para o fluido, provocando o aquecimento do mesmo.

A circulação da água nos sistemas coletores solares pode ser ativa ou passiva. No sistema de circulação ativo a circulação é obtida com o auxílio de uma bomba para circular o fluido entre o coletor solar e o reservatório térmico. Já no sistema passivo, a água circula naturalmente devido à diferença de densidade entre a água fria e a água quente. Nesse último tipo de sistema, denominado termossifão, o coletor necessita estar abaixo do reservatório térmico. A água fria passa pelos coletores solares e, à medida que é aquecida, por sua diferença de densidade, é encaminhada ao reservatório (PENEREIRO, 2010).

### 2.4.1 Coletores solares concentrados

Os coletores solares concentrados são utilizados para atingir altas temperaturas de até  $390^{\circ}\text{C}$ , através do aumento da intensidade da radiação solar sobre uma determinada superfície absorvente, centralizando os raios solares através de espelhamento. Este tipo de sistema requer ajustes contínuos a fim de

concentrar a maior incidência de raios solares em um ponto, através de ajustes mecânicos das placas refletoras (MANCINI et al.1997).

Os concentradores solares podem ter diferentes formatos, como cilíndrico, em torre, e parabólico. São utilizados principalmente para vaporizar o fluido de trabalho, a fim de alimentar turbinas para a geração de energia elétrica (MANCINI et al.1997).

#### 2.4.2 Coletores solares planos

(MOREIRA, 2017), define que coletores solares são componentes responsáveis pela conversão da energia solar em energia térmica. A incidência de radiação solar no seu absorvedor faz com que o mesmo se aqueça e transmita o calor para a água que circula no seu interior. Cita ainda que o mercado brasileiro oferece três tipos de coletores que serão descritos abaixo:

##### 2.4.2.1 Coletor solar plano aberto

Opera em baixa temperatura, entre 28° C e 50° C, não possui isolamento térmico, e é amplamente usado em sistemas de aquecimento de água de piscinas, representando menor investimento de aquisição e implantação. É composto por materiais de baixo custo, como: termoplásticos, polipropileno e borrachas especiais. Pode-se visualizar na Figura 2.3 um exemplo de coletor solar aberto (TOMALSQUIM, 2003).

Figura 2.3 - Modelo de coletor solar aberto.

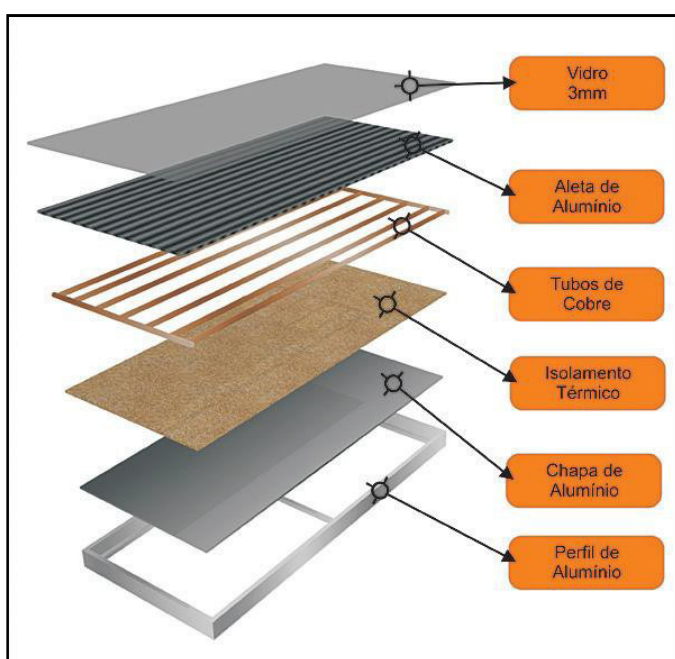


Fonte: PUCMINAS, 2015.

#### 2.4.2.2 Coletor solar plano fechado

Esse tipo de sistema é mais elaborado, contendo em sua estrutura caixa externa, isolamento térmico, tubos, placa absorvedora, tintas, cobertura transparente e vedação, o que proporciona uma melhor eficiência comparada com o sistema de coletores planos abertos. Pode atingir temperaturas da ordem de 60°C. Observa-se um modelo de coletor solar plano na Figura 2.4 abaixo (TOMALSQUIM, 2003).

Figura 2.4 - Seção típica de um coletor solar plano fechado.



Fonte: DECORSOL (2015).

#### 2.4.3 Coletor solar de tubos a vácuo

Os sistemas de tubos a vácuo são considerados mais eficientes quando comparados com os sistemas convencionais. Estes têm capacidade de absorver maior quantidade de radiação solar direta e difusa, devido à tecnologia envolvida no em sua fabricação. Para evitar perdas térmicas, vácuo entre as paredes dos tubos é utilizado (NORTON, 2006).

Os coletores solares de tubo a vácuo podem ser de diferentes tipos de absorção solar e aplicações, conforme a seguir.

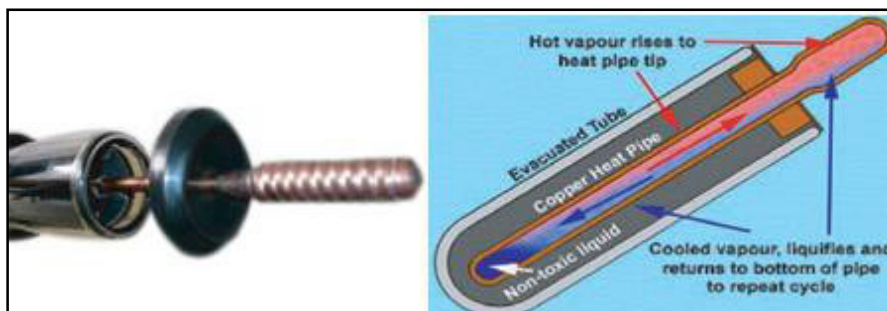
#### 2.4.3.1 Coletor solar de tubo a vácuo tipo *heat-pipe*

O princípio de funcionamento do sistema *heat-pipe* é do tipo “*fluid-in-metal*”, em que o fluido a ser aquecido passa por um tubo metálico inserido na parte interna do tubo de vidro, o que viabiliza o uso desse tipo de sistema em altas pressões e temperaturas (LIANG, 2011).

Conforme NORTON (2006), o sistema *heat-pipe* funciona com um fluido confinado dentro dele, facilmente evaporável. O líquido é aquecido com a radiação solar e é evaporado, encaminhando-se para a parte superior do *heat-pipe*, onde a energia absorvida é transferida para a água fria no tanque (*manifold*).

Ao mesmo tempo, o gás é condensado e o fluido é encaminhado à parte inferior do tubo de vácuo. O processo repete-se, originando o aquecimento da água do tanque. A Figura 2.5 ilustra o funcionamento do sistema *heat-pipe*.

Figura 2.5 - Modelo de tubo a vácuo *heat-pipe*.



Fonte: HIMINSOLAR (2015).

O sistema *heat-pipe* possui varias características que favorecem sua utilização, como resistência a altas pressões, fácil instalação e manutenção, e viabilidade de aplicação em países com baixas temperaturas, pois conta com sistema anti-congelamento. No entanto, dentre falhas ou problemas deste sistema, pode-se destacar a não eficiente vedação entre o tubo e o *heat-piper*, o que pode ocasionar formação de vapor, diminuindo sua eficiência (LIANDONG, 2010).

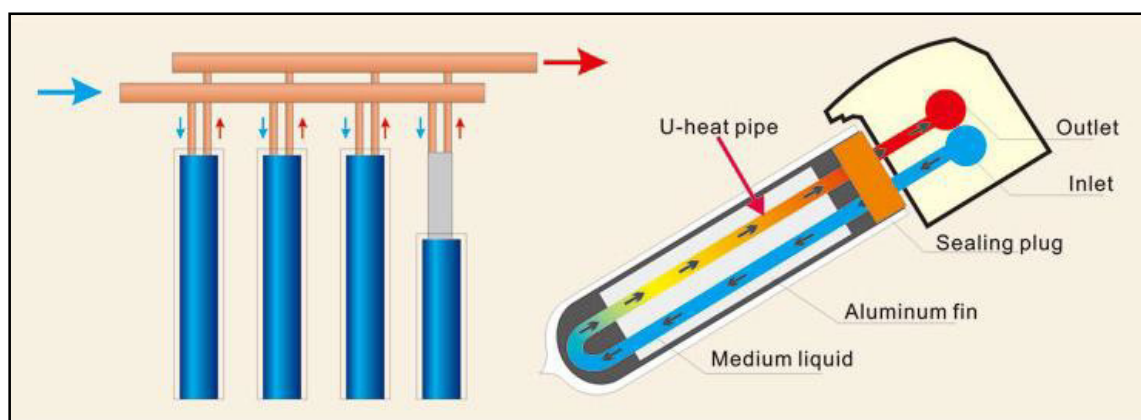


### 2.4.3.2 Coletor solar de tubo a vácuo tipo *u-tube*

Segundo LIANG (2011), esse sistema, igualmente ao *heat-pipe*, também é do tipo “*fluid-in-metal*”, onde o fluido (normalmente a água) passa por um tubo em forma de U, dentro do tubo a vácuo. O modelo interno é revestido com uma camada em formato circular de cobre ou alumínio com pintura de alta absorção da radiação, e o calor absorvido é transferido para o fluido. O *U-tube*, diferente do *heat-pipe*, não utiliza o *manifold* para transferir o calor absorvido, sendo diretamente os tubos em U os dutos de passagem para o fluido.

O *U-tube* é mais utilizado do que o tipo *heat-pipe*, pois não apresenta a troca térmica por condução para o gás/líquido no *manifold*. O sistema conta com dois tubos, um de entrada e outro de saída de líquido aquecido, como mostra a Figura 2.6 (LIANGDONG, 2010).

Figura 2.6 - Esquema de circulação e absorção de calor do sistema *U-tube*.



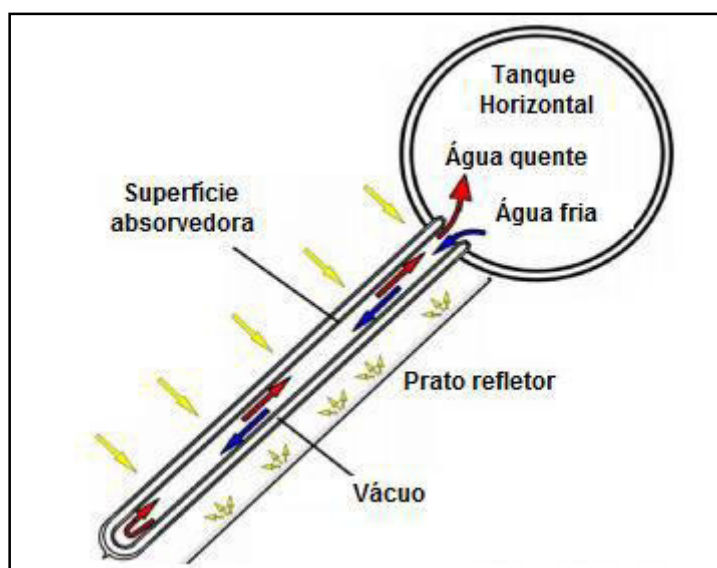
Fonte: MACHINE-HISTORI (2015).

### 2.4.3.3 Coletor solar de tubo a vácuo tipo *all-glass* ou *water-in-glass*

Segundo BUDIHARDJO (2009), os tubos a vácuo do tipo *all-glass* ou *water-in-glass* não são do tipo “*fluid-in-metal*”, mas sim de construção mais simples e econômica. Esse sistema é utilizado em baixa pressão devido sua técnica construtiva, diferente do sistema *heat-pipe* e *U-tube*, transferindo diretamente ao fluido de trabalho o calor absorvido, evitando perdas térmicas com a transferência de calor por condução. O conjunto de tubos é conectado em um

reservatório térmico, onde a água circula naturalmente por diferença de densidade, sendo denominado termossifão. Esse tipo de sistema é ilustrado na Figura 2.7, onde a absorção de calor da energia irradiada do sol é transferida para o coletor solar com tubos a vácuo tipo *water-in-glass*.

Figura 2.7- Coletor solar de tubos a vácuo tipo *water-in-glass*.



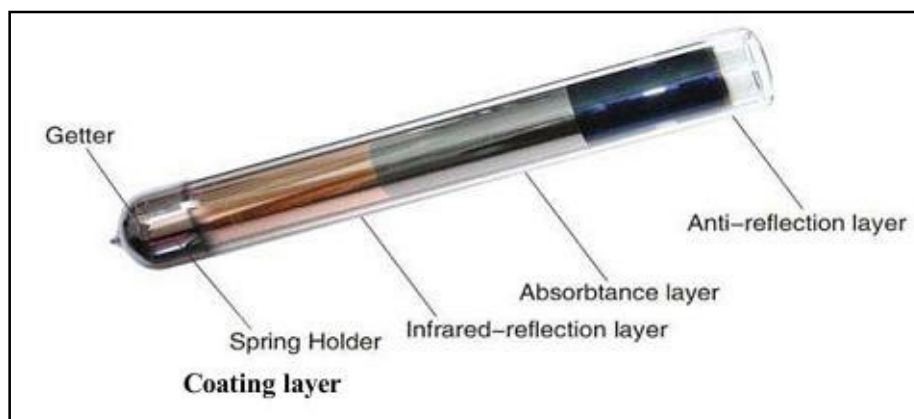
Fonte: BUDIHARDJO (2009).

Os tubos a vácuo do tipo *all-glass* ou *water-in-glass* são fabricados em vidro boro-silicato com paredes duplas, entre as quais é aplicado vácuo, que tem a função de isolante térmico. O tubo interno é revestido por três tipos de camadas, que absorvem e convertem o máximo de radiação solar e luz infravermelha em calor, com reduzidas emissões para o meio externo (MARTINAZZO, 2014).

Na Figura 2.8, as camadas constituintes do tubo são representadas em três diferentes materiais, e cada material é responsável por uma função no tubo. A camada de cobre é responsável pela condução do calor ao líquido de trabalho. Já a segunda, com composição de aço inoxidável, estabiliza a camada de cobre em altas temperaturas. E a terceira é composta por nitreto de alumínio, gás argônio e nitrogênio, a fim produzir alta absorção da radiação solar (95%), com baixíssima emissividade resultante (5%) (MARTINAZZO, 2014).



Figura 2.8 - Tubo a vácuo e sua constituição por camadas.



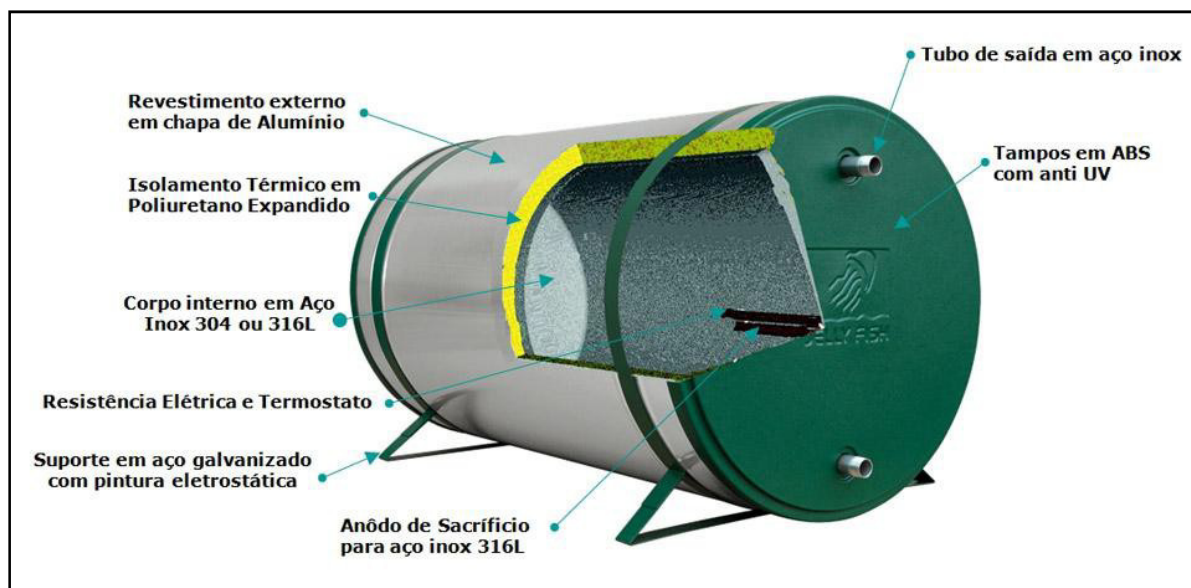
Fonte: HIMINSOLAR (2015).

#### 2.4.4 Reservatório térmico

O uso da energia solar para o aquecimento de água implica em um sistema de reserva de água quente para quando não há insolação disponível ou esta é insuficiente, para atendimento da demanda (NEVES, 2013).

De acordo com PRADO (2007), o reservatório térmico para aquecimento solar é constituído de um depósito geralmente construído em aço inoxidável com isolamento térmico de poliuretano ou lã de vidro, a fim de minimizar as perdas de calor para o ambiente. O reservatório térmico ou *boiler* recebe por último mais uma camada protetora externa, que pode ser de plástico, alumínio, aço inoxidável, entre alternativas mais baratas. A Figura 2.9 representa um modelo padrão de reservatório térmico e sua constituição.

Figura 2.9 - Modelo de reservatório térmico.

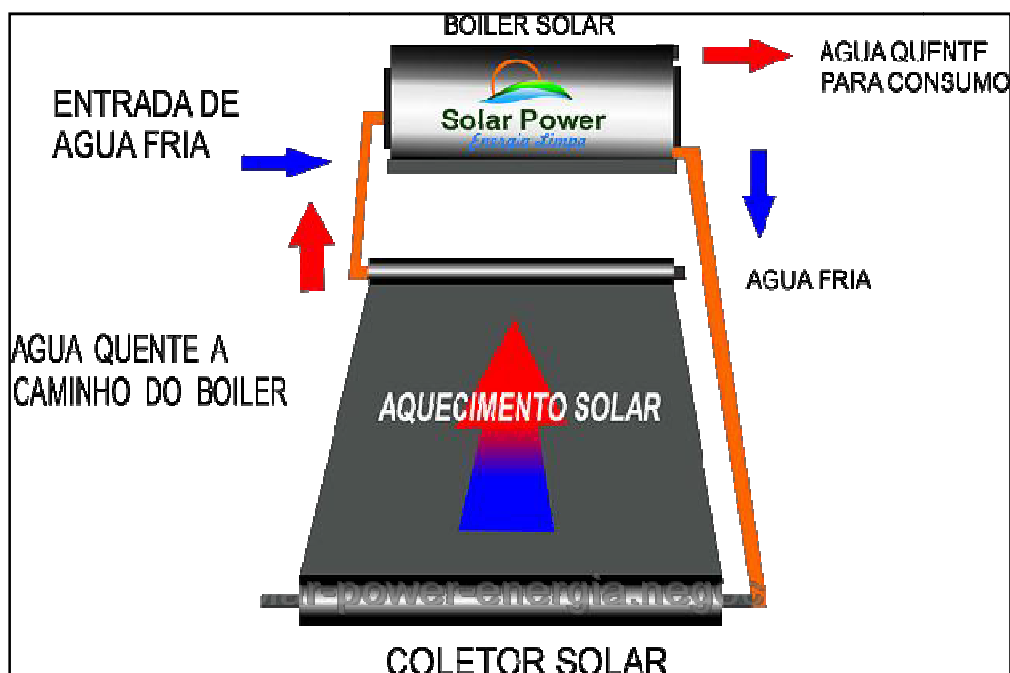


Fonte: VIDASOLAR (2015).

Conforme PRADO (2007), os reservatórios para abastecimento doméstico contam com um apoio elétrico (resistências) para auxiliar no aquecimento em dias consecutivos de pouca insolação. O apoio elétrico conta com um comando eletrônico de temperatura, e, no momento que a temperatura é inferior que à temperatura mínima programada, o sistema é acionado, sendo automaticamente desligado quando chegar à temperatura desejada.

NEVES (2013) cita que o reservatório serve como sistema termossifão, pois a água localizada na parte inferior do reservatório re-circula, devido a sua menor densidade, pela placa ou conjunto de tubos de aquecimento e retorna na parte superior do reservatório. O consumo da água aquecida se dá na parte superior do reservatório, onde se encontra a água com maior temperatura, e o abastecimento de recalque de água se dá na parte inferior, onde se encontra a água mais fria. Na Figura 2.10 é possível observar o comportamento do sistema de termossifão no reservatório.

Figura 2.10 - Sistema de Termossifão com placas coletoras e reservatório.



Fonte: NEGOCIOL (2015).

## 2.5. Técnicas e Métodos de Secagem de Lodo

Existem duas técnicas de secagem de uso comum, secagem térmica e secagem solar (sol) para obter uma secagem superior a 50%. A secagem térmica é classificada em relação ao método de transferência de calor como secagem direta (convecção), indireta ou de contato (condução), radiante (radiação) e dielétrica ou microondas (radiofrequência) e pode proporcionar 90% de secura. A secagem solar foi tradicionalmente aplicada sob a forma de leitos de secagem ao sol. Recentemente, os leitos de secagem ao sol são convertidos em secadores solares de estufa cobrindo o secador, misturando as lamas e ventilando o ar nos secadores. Neste estudo, será considerada a secagem solar sob a forma de secador solar de estufa.

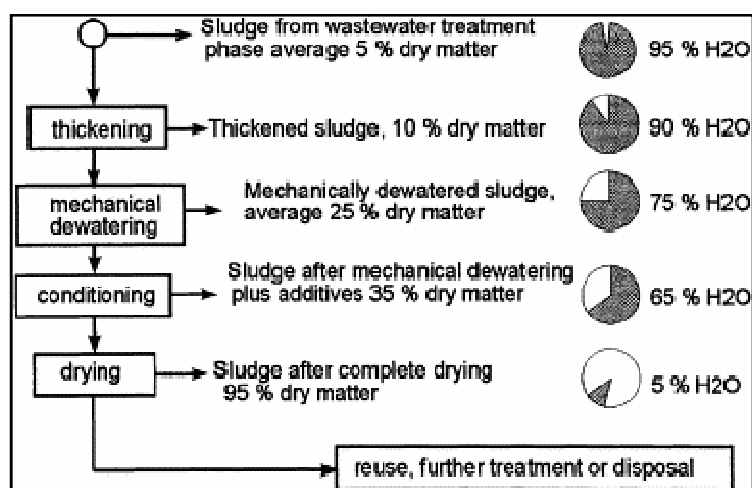
De acordo com AKSOY; KURT; SANIN (2015), a secagem térmica permite a redução de custos com transporte e destinação do resíduo, viabilizado a disposição de resíduos com alta carga orgânica na agricultura, pois o processo elimina organismos patogênicos, e produz matéria seca em menor volume agregando valor ao produto.

O processo de secagem térmica segue dois caminhos distintos. O mais comum, que utiliza energia não renovável, que agrega maior custo a esse sistema, e que tem uma alta capacidade e velocidade de produzir resíduos com teores de sólidos acima de 90%. O outro sistema utiliza energia do sol, próximo aos leitos de secagem, apresentando baixo custo operacional e não necessitando de mão de obra especializada. Entretanto esse sistema é mais lento e de difícil obtenção de teores acima de 90%, embora tenhamos citações que atingiram percentuais mais elevados em climas quentes (AKSOY; KURT; SANIN, 2015).

AKSOY, KURT, SANIN (2015) realizaram experimentos utilizando a energia solar, fornecendo calor através de coletores solares a um sistema de leito de secagem, onde através do calor fornecido ao lodo conseguiram atingir o teor de sólidos em 70%, apontando a necessidade de mais fornecimento de energia para obterem um percentual mais elevado.

Na Figura 2.11 mostra um balanço de massa geral para o teor de água no lodo em um esquema de tratamento típico.

Figura 2.11 – Balanço de Massa Geral para o Teor de Água no Lodo.



Fonte: (Werthera et al., 1999)

## 2.6. Secagem Térmica de Lodo

### 2.6.1. Conceitos gerais

A separação entre as fases líquida e sólida nos processos de tratamento dos lodos gerados em ETE's é uma tarefa difícil e dispendiosa, comparada às demais operações do tratamento de esgotos. Os métodos mecânicos de separação entre líquido e sólido, comumente chamados de desidratação mecânica ou, ainda, desaguamento, podem ser feitos através de: filtros prensa, filtros prensa de esteira e centrifugas. Com esses processos, consegue-se obter teores de sólidos na faixa de 20 a 30%, podendo chegar a 40% com a utilização de cal na etapa de condicionamento.

O processo de secagem térmica pode ser definido como: “O processo de remoção de substâncias voláteis (umidade) de um material seja ele sólido ou líquido, pela existência de uma diferença de gradientes de umidade e de temperatura entre o meio do qual a umidade é removida para o meio para qual é transferida” (LOBATO, 2011). ANDREOLI et al., (2006) define que no processo de secagem térmica ocorre a redução da umidade do lodo através da perda de água por evaporação e da destruição de microrganismos. Nesse processo é removida apenas a quantidade de água do material e a maior parte dos sólidos totais permanece inalterada.

Durante o processo de secagem térmica devem ocorrer dois processos simultâneos. O primeiro é o que consiste na evaporação da umidade da parte superficial do lodo, que ocorre através da transferência de energia. O segundo é a transferência da umidade do lodo para sua superfície e sua conseqüente evaporação pelo primeiro processo (MUJUMDAR, 2006).

Entre os principais benefícios da utilização da secagem térmica destacam-se: redução significativa do peso e volume do lodo, com conseqüente redução dos custos de transporte e disposição final desse material; e a destruição de organismos patogênicos presente no lodo (FRANÇA JUNIOR, 2008). Outra vantagem da aplicação de processos de secagem térmica é a

possibilidade de reduzir etapas no tratamento de lodo, pois os processos térmicos também promovem a estabilização e higienização desse material (BUX et al , 2001).

A principal desvantagem da secagem térmica são seus elevados custos de investimento e operacionais. Sua utilização é viável em casos onde a viabilidade econômica seja obtida pela redução do volume a ser disposto, o que reduz os custos de transporte e disposição final ou quando é necessária a produção de um lodo livre de patógenos para sua utilização, como fertilizante agrícola ou condicionador de solo (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

#### 2.6.1.1. Associação água - sólidos no lodo

A associação da água com o lodo, conforme descrito por GRANDIN (1992), teoricamente pode ser dividida em:

- água livre;
- água inter-flocos;
- água adsorvida nos flocos;
- água inter-partículas;
- água adsorvida nas partículas;
- água de partícula.

A água livre refere-se à parcela de água que fica separada quando os flocos de lodo de maior peso específico sofrem sedimentação ou adensamento devido à ação da força da gravidade após determinado tempo de repouso. A quantidade de água removida deste modo depende da fragilidade estrutural dos flocos e de suas características de sedimentação.

A água inter-flocos refere-se à parcela de água que permanece presa entre os flocos após o término do período de sedimentação ou adensamento por gravidade. Esta parcela de água é facilmente removida pela aplicação de pressão ou vácuo através dos flocos. Um processo convencional de desidratação remove a maioria desta água inter-flocos, por conta de um entupimento pouco significativo do meio filtrante e da torta de lodo.

A água adsorvida no floco refere-se à parcela de água adsorvida sobre a superfície do floco e que, devido à tensão superficial e rigidez estrutural dos flocos, só pode ser removida quando é aplicada uma adequada pressão ou vácuo. Esta remoção ocorre sem a ruptura dos flocos. No caso da ocorrência de fragmentação dos flocos de lodo, a parcela de água adsorvida não é identificada em quantidades significativas.

A água inter-partículas refere-se à parcela de água presa dentro dessas partículas. Esta parcela pode ser removida através da ruptura dos flocos de lodo, com aplicação de elevada pressão ou vácuo às partículas fragmentadas.

A água adsorvida na partícula refere-se à parcela de água adsorvida sobre a superfície da partícula por tensão superficial ou sucção capilar, sendo difícil de remover mecanicamente.

A água da partícula refere-se à parcela de água íntima e quimicamente ligada às partículas inorgânicas, quimicamente ligada às células, ou fisicamente ligada às partículas orgânicas. Essa parcela de água só pode ser removida por processos específicos de secagem.

Deve-se ressaltar que essa divisão é meramente teórica, que não existem técnicas capazes de caracterizar cada tipo de associação mencionada. Entretanto, ela é muito útil para o estudo de métodos de separação e, nesse sentido, muitos esforços e pesquisas têm sido feitos para investigar esse campo.

#### 2.6.2. Terminologia

Os termos e definições mais comuns, normalmente empregados em secagem, conforme PERRY(1973), FOUST(1980) e MCCABE(1985) são os seguintes:

Umidade absoluta(W): é a massa de vapor de água contida no ar associada a massa de ar seco. Em outras palavras, pode se dizer que é a massa de água contida em uma quantidade de ar, medido em base seca. Usualmente, a umidade absoluta é dada em grama de água por quilograma de ar seco.

Umidade relativa (Wr): é a razão entre a pressão parcial de vapor de água contida no ar e a pressão de vapor da água a temperatura do ar.

Ponto de Orvalho (Po): designa a temperatura a qual o vapor de água presente no ar ambiente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por via da condensação.

Temperatura de bulbo úmido (Tu): é a temperatura de equilíbrio dinâmico que uma superfície de água atinge quando a taxa de transferência de calor para a superfície, por convecção, iguala-se ao consumo de calor, por transferência de massa da superfície para o ambiente.

Temperatura de bulbo seco (T): é a temperatura da mistura de ar e vapor.

Água ligada: é a água associada ao sólido, cuja pressão de vapor é menor que a da água pura na mesma temperatura.

Água não ligada: é a água associada ao sólido, cuja pressão de vapor é maior que a da água pura na mesma temperatura.

Umidade Livre: é a umidade que pode ser retirada do sólido na condição de umidade relativa do ambiente onde se encontra o sólido.

Difusão interna: é o movimento de líquido ou de vapor através de um sólido, em consequência de diferenças de concentração.



Escoamento capilar: é o escoamento de um líquido através dos interstícios de um sólido ou sobre a sua superfície, provocado por atração molecular entre o líquido e o sólido.

Estado funicular: é o estado durante a secagem de um sólido poroso, em que a sucção capilar leva a penetração de ar nos poros.

Estado pendular: é o estado de um líquido num sólido poroso, quando não existe mais uma película líquida em torno das partículas ou entre elas, de modo a não mais ocorrer o escoamento capilar. Este estado sucede o estado funicular.

Teor de umidade crítico: é o teor de umidade médio de um sólido ao término do período de secagem a velocidade constante.

Substância higroscópica: é a substância que pode conter umidade ligada.

Substância não higroscópica: é a substância que não pode conter umidade ligada.

Atividade de água: é a razão entre a pressão parcial de vapor de água contida no material sólido úmido e a pressão de vapor da água pura a mesma temperatura.

### 2.6.3. Umidade de um sólido

A umidade de um sólido refere-se à quantidade de água a ele associada, seja na forma ligada ou livre. Pode ser expressa em termos de quantidade total (base úmida) ou apenas em termos de sólido seco (base seca).

Define-se umidade de um sólido na base seca ( $W_d$ ) como o quociente entre a massa de água nele contida ( $M_a$ ) e a massa do sólido isenta dessa água ( $M_d$ ) conforme a equação abaixo:

$$W_d = M_a / M_d \quad (2.1)$$

$W_d$  pode ser expresso em kg de água por 1 kg de sólido seco.

Define-se umidade de um sólido na base úmida ( $Ww$ ) como o quociente entre a massa de água nele contida ( $Ma$ ) e a massa de sólido úmido ( $Ma+Md$ ), conforme a equação abaixo:

$$Ww = Ma / (Ma + Md) \quad (2.2)$$

$Ww$  pode ser expresso em Kg de água por 1 kg de sólido úmido.

Inversamente a umidade, pode-se definir o teor de sólidos (TS) como sendo a relação entre a massa de sólido seco ( $Md$ ) e a massa de sólido úmido ( $Ma+Md$ ), conforme a equação abaixo:

$$Ts = Md / (Ma + Md) \quad (2.3)$$

Ao se expressar um valor para a umidade de um sólido, é importante deixar claro se o número refere-se à base seca ou úmida. A negligência dessa informação pode levar a um erro muito grande.

A transformação da umidade de uma base para a outra pode ser feita pelas seguintes equações relacionadas abaixo:

$$Ww = Wd / (1 + Wd) \quad (2.4)$$

$$Wd = Ww / (1 - Ww) \quad (2.5)$$

$$Wd = (1 / Ts) - 1 \quad (2.6)$$

$$Ww = 1 - TS \quad (2.7)$$

As grandezas  $Ww$  e  $TS$ , conforme apresentadas nas equações 2.2 e 2.3 podem assumir valores entre 0 e 1. Todos podem, também, ser representados em porcentagem, bastando para isso, multiplicá-los por 100.

#### 2.6.4. Condição de equilíbrio de um sólido úmido com o meio de secagem

Um sólido, com certa umidade ( $W_d$ ), colocado no interior de um meio de secagem composto por um gás em condições constantes de temperatura ( $T$ ), pressão ( $p$ ) e umidade relativa ( $W_r$ ), evoluirá ao longo do tempo, para uma condição de equilíbrio térmico com o meio, apresentando uma umidade ( $W_{de}$ ), que pode ser maior ou menor que a umidade inicial. Essa umidade é denominada umidade de equilíbrio do sólido para as condições do meio de secagem.

Para PERRY(1973), a umidade em equilíbrio pode estar adsorvida como uma película superficial ou condensada nos capilares finos do sólido a pressão reduzida e sua concentração será dependente da temperatura e umidade do ar ambiente. No entanto em temperaturas baixas na faixa de 15°C a 50°C, os valores assumidos pela umidade de equilíbrio contra a umidade relativa são essencialmente independentes da temperatura.

O teor de umidade no equilíbrio depende essencialmente da natureza do sólido. No caso de sólidos não porosos, ou de sólidos não higroscópicos, o teor de umidade no equilíbrio é praticamente igual a zero em todas as temperaturas e umidades. No caso de materiais orgânicos como a madeira, o papel e o sabão, o teor de umidade no equilíbrio varia regularmente numa ampla faixa à medida que a temperatura e a umidade variam.

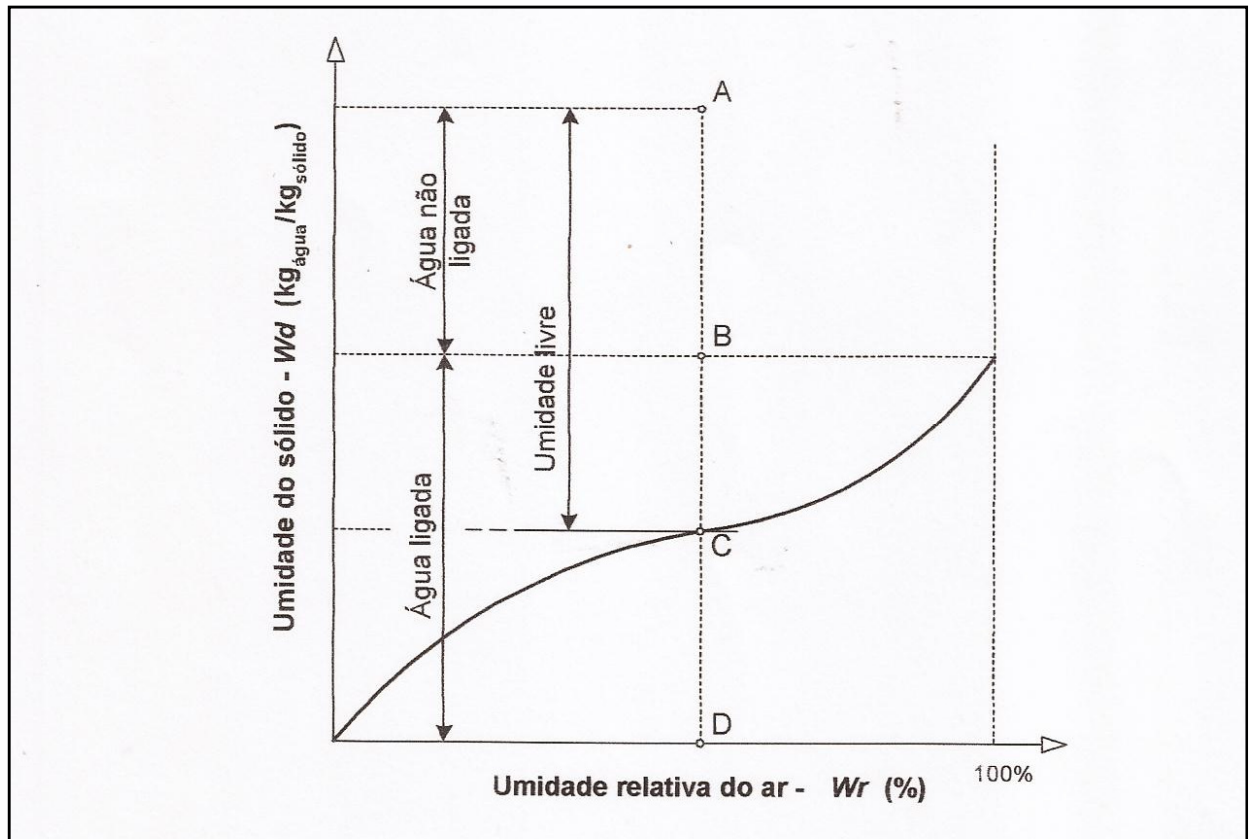
Nas operações de secagem térmica é muito importante conhecer a umidade de equilíbrio, pois esta constitui o teor de umidade limite em dadas condições de temperatura e umidade do ar ambiente. Se o sólido em processo de secagem deixar o secador com uma umidade abaixo de sua umidade de equilíbrio com o local onde será armazenado, acabará por incorporar a umidade do ambiente durante sua permanência, até atingir a umidade de equilíbrio nas condições do ar do ambiente de armazenagem, a menos que se tome precauções especiais. Neste caso, pode-se dizer que teria sido gasto na operação de secagem mais energia e tempo de permanência do que o necessário, o que significa maiores custos e menores capacidades de produção.

O teor de umidade de equilíbrio ( $W_{de}$ ) é definido como a umidade que o material atinge, quando submetido, por tempo suficientemente longo, à determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nessa condição, a pressão de vapor da água na superfície do sólido é igual à pressão de vapor da água contida no ar (PACHECO, 1995).

Mantendo-se a temperatura do sistema e variando-se a umidade relativa do ar, obtêm-se valores diferentes para a umidade de equilíbrio. O conjunto de pontos de umidade de equilíbrio em diferentes umidades relativas do ar é denominado de isoterma de equilíbrio. A Figura 12 representa de forma esquemática uma isoterma de equilíbrio. Na ordenada, são colocados os valores de umidade do sólido ( $W_d$ ) e, na abscissa, os valores de umidade relativa do ar ambiente que envolve o sólido. Da curva isoterma de equilíbrio, pode-se extrair alguns conceitos importantes para a secagem térmica, conforme FOUST (1980), que são apresentados a seguir.

Considerando-se um processo de secagem de um sólido com umidade inicial  $W_d(A)$ , em um meio de secagem com umidade relativa constante, ao atingir o ponto de equilíbrio, sua umidade será  $W_d(C)$ . À medida que o sólido for perdendo água, seu teor de umidade vai se aproximando daquela do ponto B. Nesse trecho AB, a vaporização ocorre como se o sólido não existisse, mas sim um corpo formado apenas por água. A pressão de vapor da água contida no sólido nesse trecho é igual àquela da água pura. A umidade correspondente a esse trecho é denominada Água Não Ligada (PACHECO, 1995).

Figura 2.12 – Curva de umidade de equilíbrio.



Fonte: PACHECO (1995).

No ponto B, a umidade é igual àquela de equilíbrio do sólido com ar saturado e, é a menor umidade que o sólido pode conter exercendo uma pressão de vapor igual àquela da água pura.

Abaixo do ponto B e até o ponto D, a umidade exerce diferentes pressões de vapor, todas menores do que a pressão de vapor da água pura para a temperatura do sistema. Essa umidade é denominada de Água Ligada.

Muitos motivos, ligados à natureza e forma do material sólido, podem levar uma porção de água a tornar-se ligada ou não. Dependendo deles, a água pode ficar retida em pequenos capilares, sujeitos a fortes efeitos de tensão superficial, ser constituinte de uma solução celular ou fazer parte de uma solução homogênea através de todo o sólido ou, mesmo, pertencer a uma parede fibrosa.

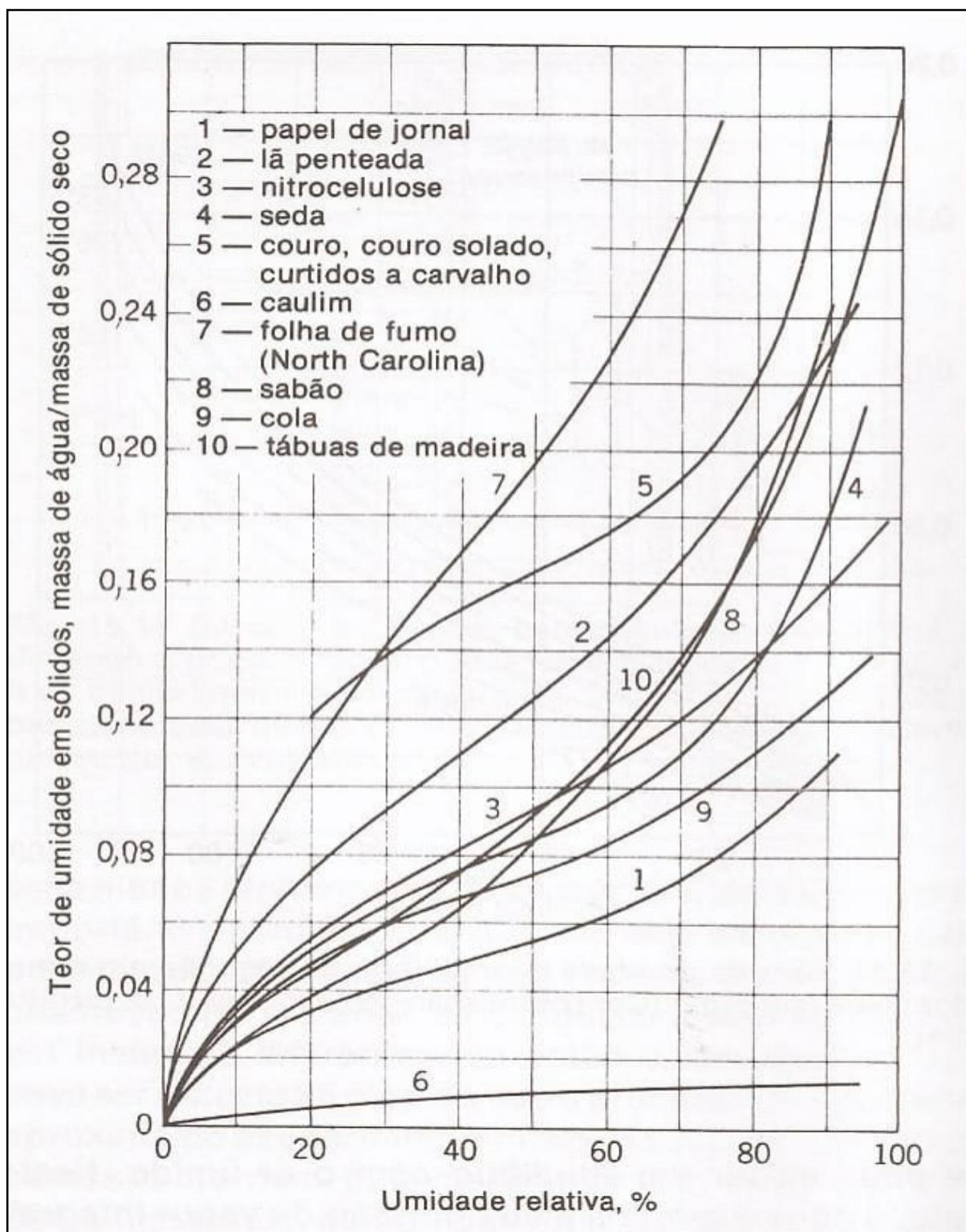
Desta forma, o processo de secagem, considerado na Figura 2.12, deve ser interrompido no ponto C, que representa a umidade de equilíbrio ( $W_{de}$ ) para a condição considerada. A umidade que pode ser retirada de um sólido na condição apresentada é denominada Umidade Livre  $W$  conforme equação abaixo e pode ser composta por água ligada e não ligada (FOUST, 1980).

$$W = W_d - W_{de} \quad (2.8)$$

Fica evidenciada, portanto, a importância de se definir no processo de secagem quais são os limites de umidade em que o material seca. Se o ponto final da secagem puder ocorrer com o sólido ainda contendo apenas água não ligada, esta secagem gastará menos tempo do que outra que, embora venha retirar a mesma quantidade de água, se processa em uma faixa de umidade com água ligada (PACHECO, 1995).

A quantidade de água retida em um sólido, em equilíbrio com o meio que o envolve, depende da estrutura do sólido, da temperatura do ambiente e da umidade relativa do ar. Cada material possui características próprias quanto ao equilíbrio de umidade. A Figura 2.13, extraída de FOUST (1980), apresenta as curvas típicas de umidade de equilíbrio dos materiais nela relacionados, cujos dados são válidos para o equilíbrio entre a umidade retida nos sólidos em contato com ar úmido.

Figura 2.13 – Curvas de umidade de equilíbrio de vários materiais.



Fonte: FOUST (1980).

Outro fator de importância fundamental na questão da secagem é quanto ao material ser poroso ou não. Um sólido higroscópico e poroso é constituído por uma rede de capilares de pequenos diâmetros, nos quais, os efeitos de tensão superficial são bastante pronunciados. A secagem desses materiais é bastante complexa.

Alguns exemplos dessa categoria são a madeira, o papel e a alumina (PACHECO, 1995). Um sólido higroscópico não poroso apresenta a umidade distribuída em seu interior, com possibilidade de movimentação através de mecanismos de difusão, originados por diferenças de concentração de umidade no seu interior. A secagem é complexa, porém com certo entendimento do fenômeno. Alguns exemplos dessa categoria de materiais são a argila, o sabão e a cola.

Um sólido não higroscópico e poroso é constituído por uma rede de capilares de diâmetros tais que, apesar da movimentação ocorrer por capilaridade, a pressão de vapor é praticamente a da água pura. Uma camada de areia ou de caulim em leito são exemplos típicos destes materiais.

Finalmente, um material não higroscópico e não poroso é aquele que apresenta apenas umidade na superfície, não sendo importantes para estudos de secagem, pois é como evaporar água pura (PACHECO, 1995).

#### 2.6.5 Secagem sob condições constantes do meio de seca

Para que a secagem ocorra, é necessário que o meio de secagem esteja a uma temperatura superior àquela do sólido úmido, permitindo a ocorrência de um fluxo de calor para o mesmo que possibilitará a vaporização da umidade.

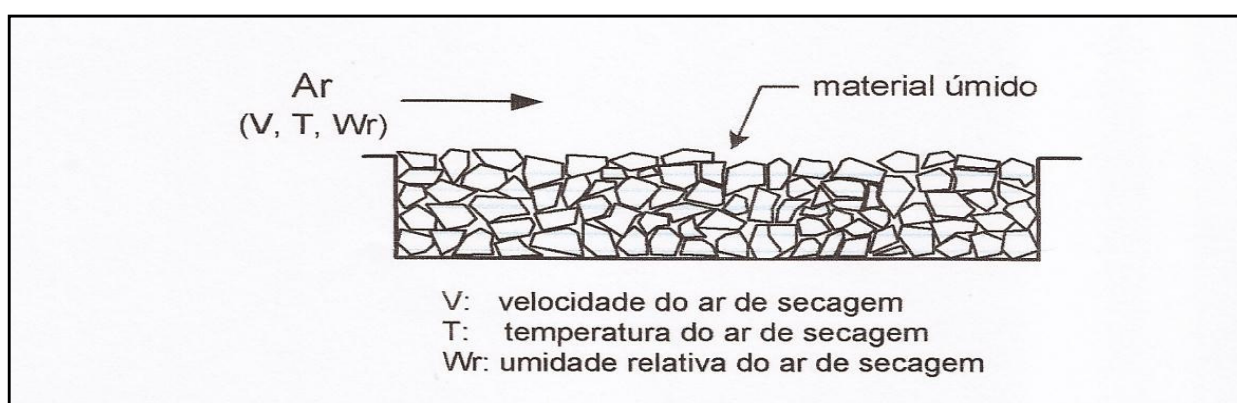
Nas operações de secagem, observa-se que a temperatura e a umidade do ar de secagem variam no interior do equipamento, para a maioria dos secadores.

Entretanto, para se estudar o fenômeno de secagem, torna-se muito esclarecedor analisar o processo sob condições em que o sólido úmido fica em contato com um meio de secagem com temperatura e umidade invariáveis ao longo do tempo. Essa situação é denominada de secagem sob condições constantes do meio de seca.



Seu estudo pode ser realizado em pequena escala, com o auxílio de equipamentos e instrumentos que permitam secar o material, medir sua variação de massa ao longo do tempo e as características do meio de seca a montante e a jusante da região de secagem. Com isso, pode-se obter os conhecimentos fundamentais para a compreensão do fenômeno de secagem. A Figura 2.14 mostra um esquema representativo das condições desse estudo.

Figura 2.14 – Secagem sob condições constantes do meio de seca.



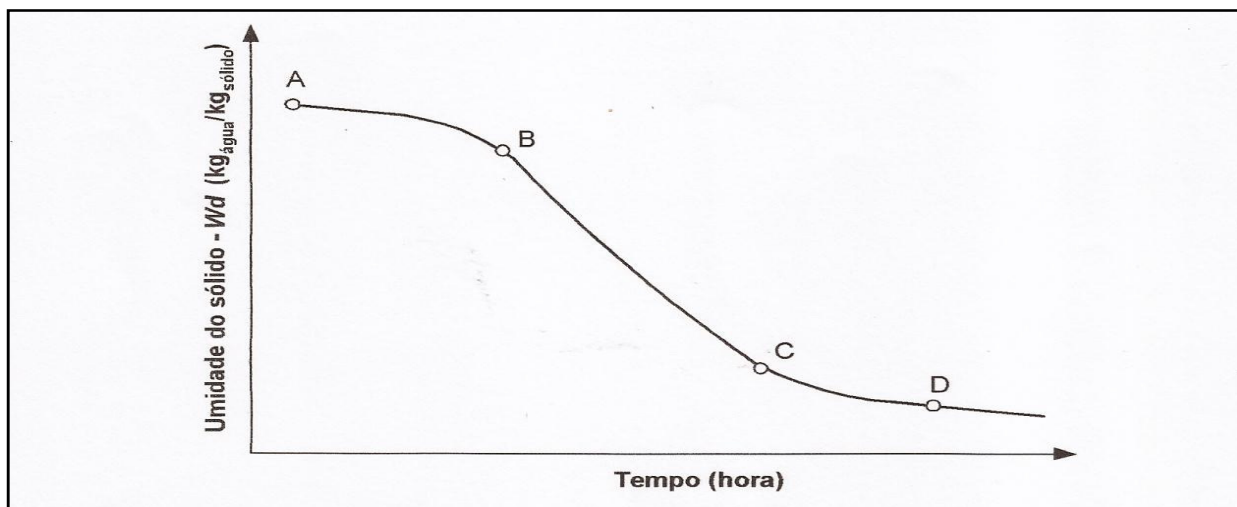
Fonte: PACHECO (1995).

No esquema apresentado, o sólido úmido é exposto a uma corrente de ar com velocidade, temperatura e umidade relativa conhecidas. O sólido pode receber calor e perder umidade apenas pela face superior com área determinada. As faces laterais e a inferior são mantidas isoladas termicamente.

O início do processo em estudo se dá com o sólido na temperatura ambiente e com umidade livre inicial conhecida. A partir do instante de início e em instantes subsequentes, mede-se a massa do sólido em processo de secagem e determina-se a sua umidade livre, de maneira a obter-se uma tabela com os valores de massa e tempo para cada valor de velocidade, temperatura e umidade do meio de secagem.

Com esses dados, constrói-se uma curva da variação da umidade em função do tempo. A Figura 2.15 apresenta uma curva típica de secagem em condições constantes do meio de seca.

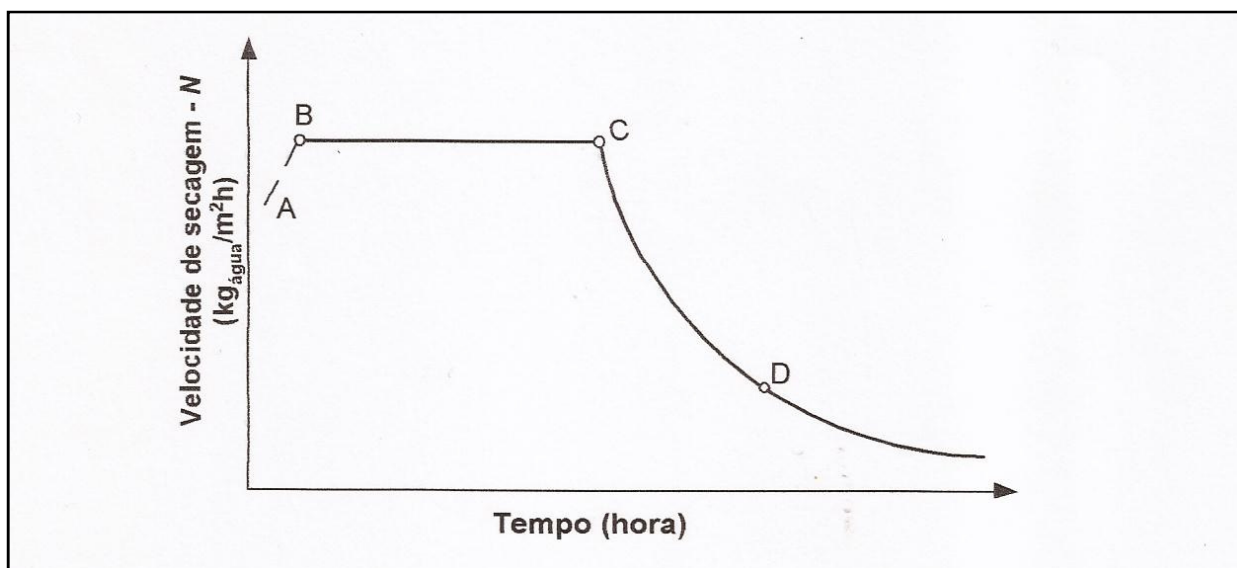
Figura 2.15 – Curva do teor de umidade em função do tempo de secagem.



Fonte: FOUST (1980).

O gráfico de teor de umidade em função do tempo, apresentado na Figura 2.15, é a forma que se obtém a partir dos dados de ensaios de secagem. Com esses resultados, pode-se calcular a velocidade de secagem em cada instante e representá-la em função do tempo, conforme apresentado na Figura 2.16. Pode-se, também, representar a velocidade de secagem em função do teor de umidade do sólido para cada instante, que é um modo muito mais descritivo do processo. A

Figura 2.16 – Curva de Velocidade em Função do Tempo de Secagem.



Fonte: PERRY (1973).

A velocidade de secagem de um sólido é definida como o fluxo de massa de umidade que deixa o sólido por unidade de área de exposição ao meio de seca e por unidade de tempo. Pode ser expressa em kg de água/m<sup>2</sup>h e representada matematicamente pela equação abaixo:

$$N = (Md/A) * dW/dt \quad (2.9)$$

Onde:

$N$  = velocidade de secagem;

$Md$  = massa do sólido em base seca;

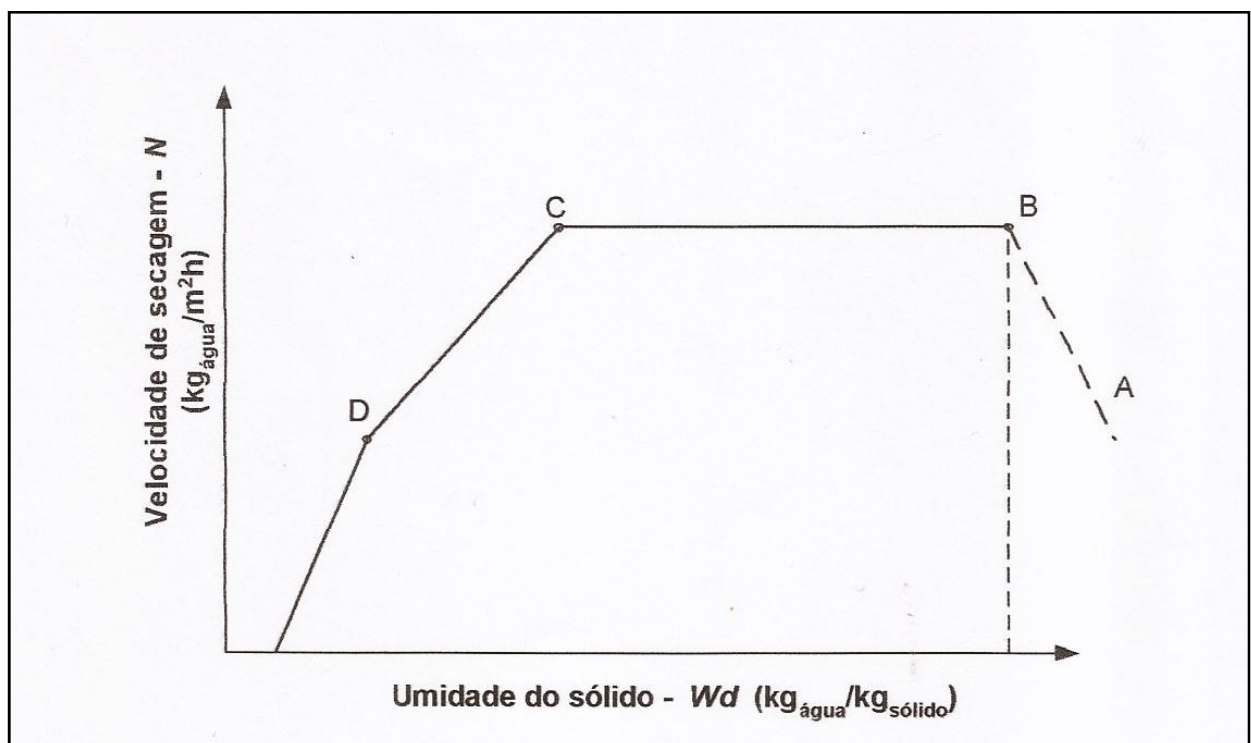
$A$  = área de exposição ao meio de seca;

$W$  = umidade do sólido em base seca;

$t$  = tempo.

A Figura 2.17 apresenta a forma típica da curva de velocidade de secagem em função do teor de umidade do sólido.

Figura 2.17 – Curva típica de velocidade de secagem em função da umidade do sólido.



Fonte: PERRY (1973).

A observação dessa curva permite notar a existência de duas regiões bem distintas: a primeira, representada pelo trecho BC, parte plana da curva, refere-se ao período de secagem à taxa constante; e a segunda, parte inclinada, refere-se ao período de taxa decrescente. A região anterior ao ponto B, representada pela linha tracejada AB, não é propriamente um período de secagem. Trata-se da fase do processo na qual o material está sendo aquecido, até atingir o ponto onde começa efetivamente a evaporação da água em regime permanente. Esse tempo de aquecimento é normalmente curto, sendo que pouca umidade é removida no seu decorrer.

#### 2.6.5.1. Período de velocidade de secagem constante

Conforme FOUST (1980), imediatamente após o contato entre o sólido úmido e o meio de secagem, a temperatura do sólido se ajusta até atingir um regime permanente. A temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições do regime permanente, nas quais a temperatura da superfície do sólido úmido é igual à temperatura de bulbo úmido do meio secante.

As temperaturas no interior do sólido tendem a ser iguais à temperatura de bulbo úmido do gás, mas a concordância entre elas não é perfeita, em virtude das defasagens entre o movimento de massa e o de calor. Uma vez que as temperaturas do sólido também tenham atingido as temperaturas de bulbo úmido do gás, elas permanecem bastante estáveis e a taxa de secagem também permanece constante.

Durante o período de taxa de secagem constante, o sólido está com uma umidade tal que um filme de água permanece envolvendo toda a superfície de secagem e esta água atua como se o sólido não estivesse presente. O regime de secagem à taxa constante continua, com a massa de umidade removida da superfície sendo substituída pelo líquido, que vem do interior do sólido. Conforme FOUST (1980), o mecanismo do deslocamento do líquido e, por isso, a velocidade desse movimento, varia acentuadamente com a própria estrutura do sólido. Nos sólidos que têm

espaços vazios e abertos relativamente grandes, o movimento será, possivelmente, controlado pela tensão superficial e pelas forças da gravidade no interior do sólido.

Nos sólidos com estruturas fibrosas ou amorfas, o movimento do líquido ocorre por difusão através do sólido. Entretanto, nesse período, a velocidade de secagem independe do mecanismo interno de fluxo do líquido através do sólido. Conforme PERRY (1973) depende de três fatores externos, que são:

- Coeficiente de transferência de calor e de massa;
- Área da superfície exposta ao meio de secagem;
- Diferença de temperatura e umidade entre o meio de secagem e a superfície úmida do sólido.

A velocidade de secagem nesta situação é totalmente controlada por essas condições externas. Nos equipamentos de secagem, aumentos na temperatura do ar de secagem ou em sua velocidade conduzem a um correspondente aumento na velocidade de secagem.

O valor de umidade que marca o final do período de velocidade de secagem constante é denominado de Umidade Crítica. Esse ponto assinala a situação em que a água superficial se torna insuficiente para manter um filme contínuo de água cobrindo a área de secagem. A umidade crítica não deve ser confundida com a umidade de equilíbrio para o sólido em contato com um ar saturado, pois ocorre em situação de não equilíbrio e depende inclusive das condições de secagem não sendo uma propriedade do material.

#### 2.6.5.2. Período de velocidade de secagem decrescente

Conforme FOUST (1980), o período de secagem à taxa decrescente pode ser bem mais dilatado que o período à taxa constante, embora a remoção de umidade seja bem menor. A taxa de secagem aproxima-se de zero no teor de umidade de equilíbrio com o meio secante.

O formato da curva de velocidade de secagem no período de velocidade decrescente depende do tipo de material. Em qualquer caso, quem controla a velocidade de secagem são as condições internas ao sólido. As condições externas

devem ser ajustadas de maneira a não provocar danos às características do material.

No caso de sólidos higroscópicos não porosos, o calor fornecido evapora primeiro a umidade superficial. A movimentação de umidade dentro do sólido se dá através de difusão no sentido de regiões mais úmidas, localizadas no interior do sólido para regiões menos úmidas, situadas na sua superfície. A resistência à transferência de umidade para o ar é desprezível em relação à resistência de movimentação da umidade no interior do sólido. Nesta situação, alterações na velocidade do ar de secagem não produzem qualquer variação na velocidade de secagem.

Os sólidos não higroscópicos porosos são compostos por uma rede de capilares de diferentes dimensões nas seções transversais, e as forças capilares são tão maiores quanto menores forem os raios dos capilares. Quando a água superficial se esgota, os capilares de maior diâmetro esvaziam-se primeiro, pois perdem água para o meio de seca e para os capilares de diâmetros menores, sendo a água substituída por ar. À medida que os poros forem se esvaziando, a superfície de evaporação recua para o interior do sólido e a área disponível para troca de massa diminui, embora a taxa de evaporação por unidade de área úmida se mantenha constante. Por isso, o primeiro trecho do período de velocidade decrescente é reto, já que o mecanismo é similar ao do período de velocidade constante, porém com a área efetiva para a troca de massa diminuindo a cada momento e a velocidade de seca continuando a ser calculada com referência à área  $A$ , disponível para a troca de calor. Conforme PERRY (1973), esse estado, em que a água constitui a fase contínua e o ar a fase dispersa, é denominado por Estado Funicular.

Com o prosseguimento do processo de secagem, atinge-se uma situação em que a água deixa de ser fase contínua. Este fato é indicado na curva de velocidade de secagem pelo ponto D, denominado segundo ponto crítico. Esta situação, em que a água deixa de ser fase contínua, recebe o nome de Estado Pendular. A velocidade de secagem no Estado Pendular é independente da velocidade do ar, devendo o vapor difundir-se através do sólido e o calor deverá ser fornecido por condução a

partir da superfície. A temperatura tende a aproximar-se da temperatura do ar de secagem.

Para um sólido higroscópico poroso, uma vez vaporizada a umidade superficial, tanto o Estado Funicular como o Estado Pendular são compostos por água ligada. A curva de velocidade de secagem, em sua fase decrescente, apresenta um aspecto que depende da natureza e forma do material sem indicar, contudo, um ponto crítico.

Quando só houver água ligada, o mecanismo de movimentação da umidade assemelha-se bastante ao da difusão. Em geral, os mecanismos de secagem desses materiais são bastante complexos para uma maior generalização (FOUST, 1980).

#### 2.6.5.3. Secagem sob condições variáveis

A secagem sob condições variáveis é aquela encontrada na maioria dos secadores industriais. A temperatura e a umidade do meio não são constantes ao longo de todo o percurso do material dentro do equipamento. Os secadores de alimentação contínua, em geral, funcionam em regime permanente e as condições do meio de secagem variam, ponto a ponto no sistema, porém, são constantes ao longo do tempo em cada ponto (PACHECO, 1995).

Conforme FOUST (1980), a aplicação dos princípios básicos ao projeto ou escolha do equipamento de secagem nem sempre é direta. Além da dificuldade de previsão da curva de velocidade de secagem, surgem problemas sobre a variação das condições de secagem ao longo do secador, sobre a diferença entre a área de transferência térmica e de transferência de massa, sobre a configuração do escoamento do gás e sobre o efeito das variáveis de operação. Deve-se levar em conta, também, o fator econômico habitual dos custos de processamento no que diz respeito às condições desejáveis do produto.

Por essas razões, a obtenção de dados para o projeto de um equipamento de secagem, para a escolha de um secador ou, mesmo, para a verificação do

desempenho de um secador em operação, deve ser feita com a realização de ensaios com secadores em escala industrial, em condições semelhantes às da produção.

Nos ensaios com secadores industriais, pode-se obter resultados de desempenho global, que são usados para efetuar balanços térmicos, balanços de massas e conseqüentemente determinar as velocidades de secagem e os coeficientes globais de transferência de calor. Conforme PERRY (1973), os dados mínimos que devem ser obtidos para calcular o desempenho de um secador são:

- teor de umidade do sólido na entrada e na saída;
- temperatura do gás afluente e efluente;
- temperatura do material na entrada e na saída;
- taxa de alimentação;
- velocidade do gás;
- umidade do gás na entrada e na saída;
- tempo de retenção ou tempo de residência no secador;
- consumo de combustível.

Os resultados dos ensaios de secagem podem ser correlacionados empiricamente, em termos do coeficiente global de transferência de calor ou do comprimento da unidade de transferência, expressos em função das variáveis operacionais (PERRY, 1973).

Os fabricantes de secadores, em geral, possuem instalações de secagem em escala piloto, nas quais é possível secar amostras do material em diversas condições operacionais, com o propósito de encontrar a melhor combinação do tipo do equipamento, das condições de operação e das características finais do produto que se pretende secar.



## 2.7. Formas de transferência de calor

O calor transferido para o lodo aumenta sua temperatura e promove a evaporação da água contida na sua superfície. Durante o processo, forma-se um gradiente de temperatura da superfície para o interior do sólido, que causa a migração da umidade do interior para a superfície por mecanismos de escoamento capilar, difusão e diferenças de pressão internas provocadas pelo encolhimento do material. Conforme WEF (1992), a transferência de calor para o lodo é afetada por condições externas como: temperatura, umidade, velocidade e direção do gás de secagem, área da superfície de exposição, forma física do lodo, agitação e tempo de detenção. O entendimento dessas condições externas e seus efeitos é importante para a investigação das características de secagem do lodo, para a escolha do secador apropriado e para a determinação das melhores condições de operação.

A forma de transferência de energia ocorrida nos processos de secagem térmica ocorre por resultado de condução (secagem indireta), processos convectivos (secagem direta), por radiação ou por uma combinação entre eles (DAVID, 2002).

### 2.7.1. Processo de Secagem por Convecção

Nesse processo o calor é transferido para o material através do agente de secagem (ar aquecido) que passa sobre ou através do sólido, fazendo com que a umidade seja transportada para fora do meio de secagem (PARK et al , 2007).

É expressa matematicamente pela equação abaixo:

$$Q_{cv} = h_{cv} A (T_g - T_l) \quad (2.10)$$

Onde:

$Q_{cv}$  = calor transferido por convecção;

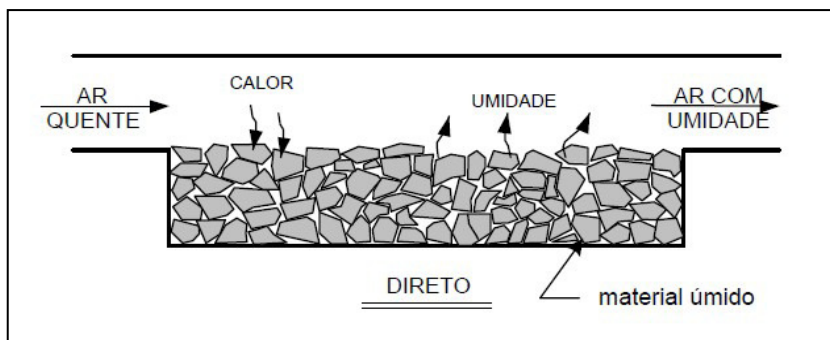
$h_{cv}$  = coeficiente de transferência de calor por convecção;

$A$  = área exposta ao meio de secagem;

$T_g$  = temperatura do gás;

$T_l$  = temperatura do lodo.

Figura 2.18 – Esquemática do processo de secagem direta ou convectiva



Fonte: David, 2002

### 2.7.2. Processo de Secagem por Condução

O processo de secagem por condução o calor é fornecido pelo contato do lodo com uma parede que separa o material do meio de transferência de calor que em geral pode ser um óleo térmico ou vapor (DAVID, 2002).

É expressa matematicamente pela equação abaixo:

$$Q_{cd} = h_{cd} A (T_m - T_l) \quad (2.11)$$

Onde:

$Q_{cd}$  = calor transferido por condução;

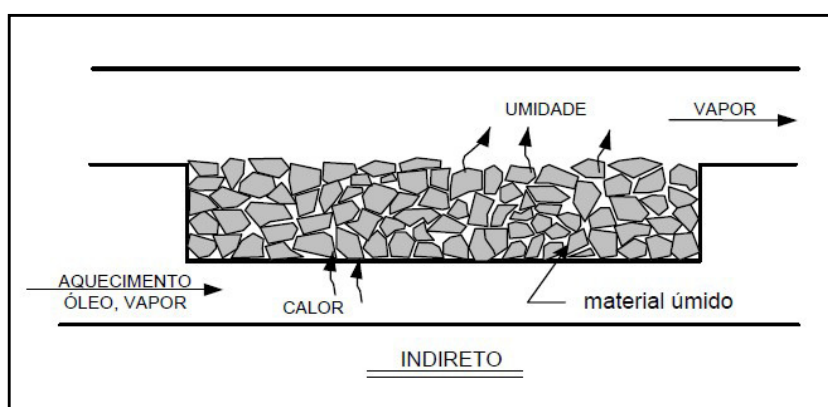
$h_{cd}$  = coeficiente de transferência de calor por condução;

$A$  = área da superfície de transferência de calor ;

$T_m$  = temperatura do meio de transferência de calor;

$T_l$  = temperatura do lodo.

Figura 2.19 – Esquemática do processo de secagem indireta ou condutiva



Fonte: David, 2002

### 2.7.3. Processo de Secagem por Radiação

O processo de secagem por radiação é aquele onde é promovida a transmissão do calor radiante para o lodo, sem haver o contato do lodo com gases provenientes de combustão (PARK et al , 2007).

É expressa matematicamente pela equação abaixo:

$$Q_{rd} = Ce \ St \ A \ (Tr - Tl) \quad (2.12)$$

Onde:

$Q_{rd}$  = calor transferido por radiação;

$Ce$  = emissividade da superfície aquecida;

$St$  = constante de Stefan-Boltzman;

$A$  = área exposta à fonte radiante;

$T_r$  = temperatura absoluta da superfície radiante;

$T_l$  = temperatura absoluta do lodo.

## 2.8. Consumo de energia térmica

A geração de calor para o aquecimento do lodo é conseguida pela queima de combustível. A energia requerida pelo processo pode variar bastante, depende de vários fatores como: umidade de entrada e saída do lodo no processo, tipo e características do equipamento utilizado, eficiência térmica do secador empregado, aproveitamento ou recuperação de energia proveniente de outros processos, como a utilização do biogás quando possível.

Para avaliar um sistema de secagem térmica o principal parâmetro a ser considerado, é a energia necessária para evaporação da água presente no lodo. Segundo ANDREOLI et al (2001) em condições ideais são necessários 2.744 KJ (0,76 kWh) de energia para evaporar 1Kg de água presente no lodo, esse valor pode chegar até o dobro dependendo das condições operacionais. Segundo DAVID e TSUTIYA, (2002), de um modo geral, os equipamentos de secagem térmica necessitam para evaporar a água contida no lodo de 800 a 1.000 kcal/kg de água evaporada. Isso equivale dizer que para um lodo com teor de sólidos de 30%, que se deseja secar para 90%, o consumo de energia será da ordem de 670 kcal por kg de lodo.

Considerando-se o gás natural como fonte de energia para a secagem, com poder calorífico de 9.400 kcal por metro cúbico, cujo custo é da ordem de R\$ 0,50 por metro cúbico (aproximadamente US\$ 0,20) para consumos industriais e comerciais, situados na faixa de 5.000 a 50.000 metros cúbicos mensais, conforme informações obtidas na COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO – COMGÁS. Considerando-se, ainda, um equipamento de secagem cuja eficiência térmica produza evaporação de 1 kg de água com 900 kcal, o custo de combustível para a secagem será da ordem de R\$ 120(aproximadamente US\$ 50) por tonelada de lodo seco. Ou, de outra

forma, o custo de combustível (gás natural) para a secagem será da ordem de R\$ 50 por tonelada de água evaporada do lodo. Esse valor de custo de secagem térmica deve ser visto como uma ordem de grandeza, pois existem variações no preço do combustível devido a diversas razões como a faixa de consumo mensal e a localização da unidade consumidora. Outro fator que influencia no custo é a eficiência térmica do equipamento utilizado que pode variar significativamente.

A demanda de energia necessária também irá depender da eficiência dos equipamentos utilizados no processo de secagem, bem como as características do lodo processado.

## 2.9. Secadores

Os métodos de transferência de calor também podem ser classificados como: métodos indiretos, diretos, radiantes ou mistos.

Os secadores diretos usam calor sensível, ar quente ou gás, que contata com as lamelas do solo. Para aumentar a eficiência energética de um secador direto, parte do calor em gases de escape quentes é recuperado e reciclado de volta através da câmara de combustão. Além disso, dependendo do grau de secagem das lamelas, as lamelas secas são recirculadas conforme necessário. O tambor rotativo, a correia móvel e o leito fluidizado são alguns exemplos de secadores diretos (SAHNI et al., 2012; FONDA et al., 2009; FLAGA, 2007). Os secadores diretos transmitem energia calorífica às lamelas por condução, à medida que as superfícies aquecidas passam ou entram em contato com lodo. Diferentes tipos de gases (vapor, gás quente) ou líquidos (água quente, óleo e solução de glicol, como propileno glicol) são utilizados para aquecer a superfície de contato.

Os secadores de pá, os secadores de filme fino e os secadores de discos rotativos são secadores indiretos típicos (FONDA et al., 2009). Em comparação com os secadores diretos, os secadores indiretos reduzem odor, poeira e poluição do ar. Os secadores diretos liberam poeira e compostos voláteis. De acordo com FLAGA (2007), os secadores indiretos são menos econômicos do que os secadores diretos. Geralmente há muito tempo de retenção de lodo e também eficiência limitada de

secagem. À medida que a concentração de lodo seco pode atingir até 85% de conteúdo de sólidos com processos indiretos, é possível secá-lo para um teor de sólidos superior a 90% com processos de secagem direta (FERNANDES,2007). Vários recursos energéticos podem ser usados para secadores indiretos, enquanto que os secadores diretos costumam usar o óleo combustível leve ou o gás natural. Existem outros métodos de secagem, que são relativamente raros em uso. Os secadores radiante usam radiação de um gás quente ou uma superfície como a principal fonte de transferência de calor. Os secadores dielétricos empregam campos eletromagnéticos para transferir energia e conseguir a secagem (ROOT, 1983; MALHOTRA et al., 1992; STASTA et al.,

Na tabela 2.1, são apresentadas as características principais desses dois tipos de secadores.

Tabela 2.1 - Características de secadores diretos e indiretos

Secador direto	Secador indireto
Contato direto dos gases quentes com os sólidos, para aquecê-los e remover a água neles presente.	O calor é transferido ao material úmido mediante a condução numa parede metálica.
As temperaturas de secagem podem atingir 750°C.	Temperaturas das superfícies podem ultrapassar 540°C, no caso dos secadores aquecidos pelos produtos de combustão.
Nas temperaturas do gás abaixo do ponto de ebulição, o teor de vapor no gás influencia a velocidade de secagem e o teor final de umidade no sólido. Com as temperaturas do gás acima do ponto de ebulição, o teor de vapor do gás tem um pequeno efeito retardador sobre a velocidade de secagem e o teor final de umidade.	Convenientes para secar sob pressão reduzida e em atmosferas inertes, com o objetivo de permitir a recuperação de solventes e impedir a ocorrência de misturas explosivas ou a oxidação de materiais que se decompõem com facilidade.
Quanto mais baixo for o teor final de umidade, maior será o consumo de combustível por m <sup>3</sup> evaporado.	A recuperação de poeira e de material pulverulento pode ser efetuada de maneira mais satisfatória.
A eficiência aumenta com o aumento da temperatura do gás afluente.	O fato de não acontecer contato direto do meio de secagem e o lodo, constitui uma vantagem quanto à geração de gases e odores.
Devido à necessidade de grandes volumes de gás para fornecer todo o calor, o equipamento de coleta de poeira pode ser muito grande e caro, quando se operam sólidos em pequenas partículas.	

Fonte: Perry & Green (1997) *apud* Lobato (2011).

Em relação ao modo de operação os secadores térmicos podem ser classificados em contínuo ou em batelada, o sistema de secagem de lodo deve ser escolhido conforme a quantidade de material a ser processado. PARK *et al.*, (2007) indica a operação em batelada para uma taxa de geração de material a ser seco entre 20 a 50 kg/h. Na faixa de 50 a 1.000 kg/h podem ser adotados os dois modos de operação, enquanto a taxa for superior a 1.000 kg/h, deve-se optar por secadores contínuos.

Entre as tecnologias de secagem térmica de lodo, destacam-se as tecnologias de secadores rotativos (diretos e indiretos), de esteira (túnel), de múltiplas bandejas e plantas de secagem solar (DAVID,2002; METCALF e EDDY 2003; ANDREOLI *et al* 2006; LOBATO 2011).Os secadores diretos usam calor sensível, ar quente ou gás, que contata com as lamas do solo. Para aumentar a eficiência energética de um secador direto, parte do calor em gases de escape quentes é recuperado e reciclado de volta através da câmara de combustão. Além disso, dependendo do grau de secagem das lamas, as lamas secas são recirculadas conforme necessário. O tambor rotativo, a correia móvel e o leito fluidizado são alguns exemplos de secadores diretos (SAHNI *et al.*, 2012; FONDA *et al.*, 2009; FLAGA,2007).

Os secadores diretos transmitem energia calorífica às lamas por condução, à medida que as superfícies aquecidas passam ou entram em contato com lodo. Diferentes tipos de gases (vapor, gás quente) ou líquidos (água quente, óleo e solução de glicol, como propileno glicol) são utilizados para aquecer a superfície de contato. Os secadores de pá, os secadores de filme fino e os secadores de discos rotativos são secadores indiretos típicos (FONDA *et al.*, 2009). Em comparação com os secadores diretos, os secadores indiretos reduzem odor, poeira e poluição do ar.

Os secadores diretos liberam poeira e compostos voláteis. De acordo com FLAGA (2007), os secadores indiretos são menos econômicos do que os secadores diretos. Geralmente há muito tempo de retenção de lodo e também eficiência limitada de secagem. À medida que a concentração de lodo seco pode atingir até 85% de conteúdo de sólidos com processos indiretos, é possível secá-

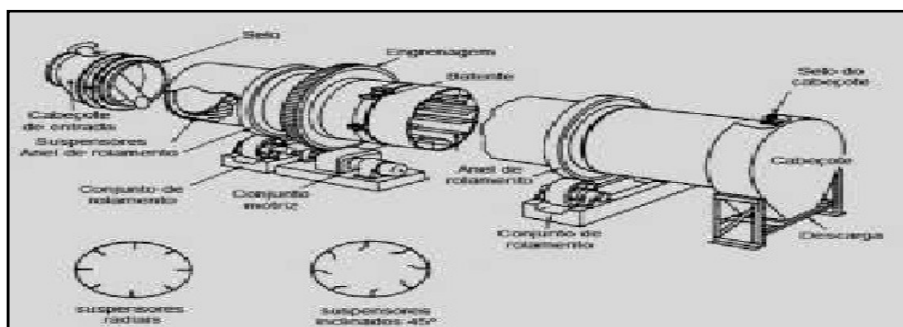
lo para um teor de sólidos superior a 90% com processos de secagem direta (FERNANDES,2007). Vários recursos energéticos podem ser usados para secadores indiretos, enquanto que os secadores diretos costumam usar o óleo combustível leve ou o gás natural. Existem outros métodos de secagem, que são relativamente raros em uso. Os secadores radiante usam radiação de um gás quente ou uma superfície como a principal fonte de transferência de calor. Os secadores dielétricos empregam campos eletromagnéticos para transferir energia e conseguir a secagem (ROOT, 1983; MALHOTRA et al., 1992; STASTA et al., (2006).

### 2.9.1. Secadores Rotativos

Os secadores rotativos são aqueles onde o processo de secagem ocorre em cilindros horizontais, levemente inclinados, nos quais o material a ser secado é introduzido na parte superior e progride até a outra extremidade, seja pela ação da gravidade ou por pás direcionadoras que são dispostas ao longo das paredes interna do cilindro rotativo, podemos ver na Figura 2.20 um exemplo de secador rotativo.

Os secadores rotativos podem ser divididos em diretos e indiretos, essa classificação é feita baseada na forma como ocorre à transferência de calor. É considerado direto quando o calor é trocado diretamente entre o gás e os sólidos e indiretos quando o chamado meio de aquecimento é separado do contato do material por meio de outro cilindro, assim o calor é transmitido através da superfície do cilindro e não através do contato direto.

Figura 2.20 - Exemplo de Secador Rotativo (Capacidade de 500 – 70.000kg/h)



Fonte: WEF, 1992 apud Andreoli et al , 2006.



#### 2.9.1.1. Secadores rotativos diretos

Esse processo ocorre com a introdução do ar de secagem a temperaturas próximas a 500°C, o que permite a evaporação da umidade do lodo. Segundo LOBATO, (2011) o lodo que foi desaguado mecanicamente até chegar a teores de sólidos entre 25 e 40% é misturado com o lodo resultante do processo de secagem com o intuito de aumentar o teor de sólidos do lodo afluyente ao secador para 40 a 50%.

O lodo afluyente percorre então pelo secador até sua extremidade de descarga, sendo auxiliado pelas aletas axiais que são instaladas ao longo das paredes internas do cilindro rotativo.

Essas aletas são responsáveis por realizar o revolvimento do material, criando assim uma fina camada de partículas de lodo que irão secar rapidamente quando entrarem em contato com o gás quente presente no sistema rotativo (DAVID, 2002).

#### 2.9.1.2. Secadores rotativos indiretos

Nesse processo o cilindro principal, onde está presente o lodo, é protegido por outro cilindro. Entre os cilindros circula o chamado meio de secagem, o qual transmite o calor para o lodo através da superfície do cilindro. Esse meio de secagem em geral é composto por vapor ou óleo térmico à temperatura em torno de 250°C (ANDREOLI et al , 2006).

Nos secadores indiretos horizontais a carcaça contém no seu interior um agitador rotativo composto de uma série de elementos (discos, aletas ou pás) montados em um eixo rotativo (rotor). O eixo e os agitadores, geralmente ocos, permitem que o meio de secagem circule através de seu núcleo, o que possibilita o aquecimento das paredes que estão em contato com o lodo. Dessa forma, os agitadores não só transportam o lodo através do secador, mas também proporcionam uma superfície de transferência de calor que entra em contato com o lodo (DAVID, 2002).

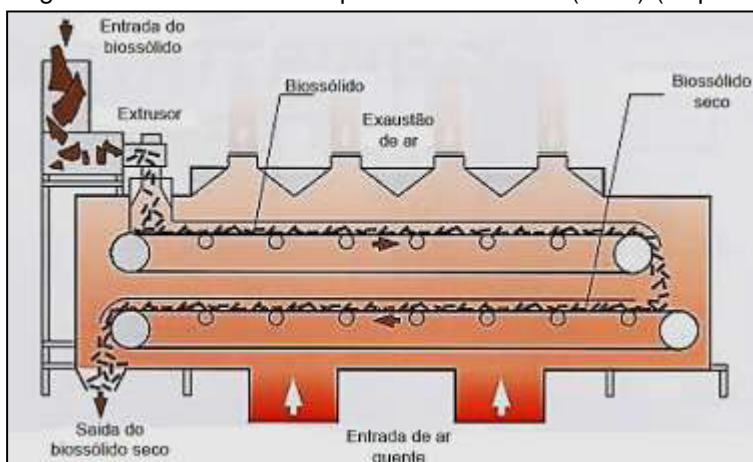
### 2.9.2. Secadores tipo esteira (Túnel)

Os secadores do tipo esteira são aqueles onde o material passa por um sucessivo processo de secagem através da circulação constante de ar quente.

Nesse processo o lodo úmido introduzido é transportado lentamente sobre a superfície da esteira transportadora, que se desloca dentro da câmara de secagem (ANDREOLI et al , 2006).

O calor é diretamente aplicado através de uma série de ventiladores que insuflam o ar quente à temperatura de aproximadamente 150°C sobre o lodo que está sendo processado, o qual é conduzido de forma lenta por meio do túnel de aquecimento, sistema mostrado na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Secador transportador de esteira (túnel)-(Capacidade de 300-1200kg/h)



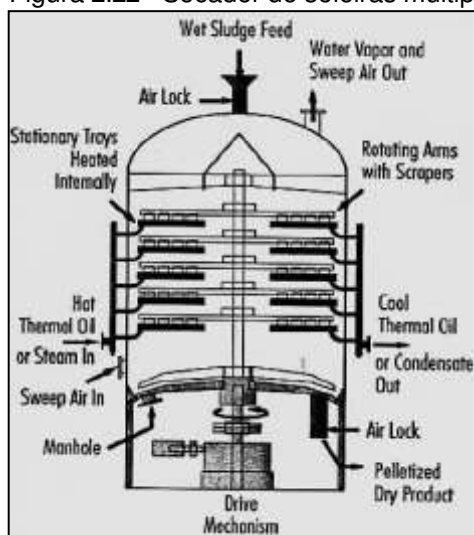
Fonte: Catalogo, Netzsch 1999 apud Andreoli et al., 2006

### 2.9.3. Secadores de soleiras múltiplas

Os secadores do tipo múltiplas bandejas são aqueles constituídos por uma câmara cilíndrica na posição vertical, que contém em seu interior uma série de soleiras estacionárias, dispostas horizontalmente. O processo de

transferência de calor nesse tipo de secador é realizado de forma indireta, sendo transferido para as soleiras que em contato com o lodo promovem o seu aquecimento, sistema mostrado na Figura 2.22. Após a secagem, o material é descarregado na sua parte inferior do secador em uma tremonha e transportado para silos de armazenamento (ANDREOLI et al., 2002).

Figura 2.22 - Secador de soleiras múltiplas (Capacidade de 50 - 1600kg/h)



Fonte: Andreoli et al , 2006

#### 2.9.4. Planta de Secagem Solar

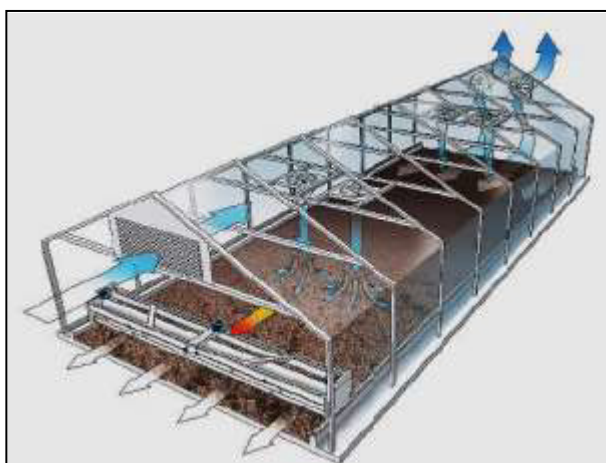
A tecnologia que utiliza a radiação solar e o potencial do ar ambiente é a planta de secagem solar. Esse tipo de tecnologia não utiliza obrigatoriamente outra forma de energia para a realização da secagem do lodo, o qual seria mostrado na Figura 2.23.

Entre as vantagens da utilização da planta de secagem solar, destaca-se: reduzido consumo de energia elétrica, quando comparado com os processos tradicionais de secagem; reduzido custo operacional associado e a obtenção de um produto final com alto teor de sólidos, que pode ser aplicado para fins diversos. Outra vantagem é que existe a possibilidade de associar planta de secagem solar com outras fontes de calor, como exemplo, a utilização do calor residual originado de processos de cogeração de energia elétrica e térmica. Dessa forma, é possível reduzir o tamanho das plantas de secagem solar, quando comparada com as que não utilizam outras fontes de calor (BUX et al ,2001).

A secagem solar não requer energia produzida pelo homem, usa energia renovável e é aplicável em qualquer parte do mundo. No entanto, para aumentar a eficiência da secagem de lodo com radiação solar, é necessária uma inovação ou aplicação adequadas. Devido aos combustíveis fósseis dispendiosos, limitados e não ecológicos, a secagem solar está se tornando uma opção popular para substituir os secadores térmicos mecânicos (HII et al., 2012).

Entretanto, esse processo de secagem possui algumas desvantagens entre elas destacam-se: a necessidade de grandes áreas para instalação das plantas de secagem e as variações climáticas que influenciam no desempenho de secagem ao longo do ano especialmente em regiões mais frias (BUX et al , 2001).

Figura 2.23 - Esquema geral de uma planta de secagem solar (Capacidade de 167ton/mês com 25% de DS)



Fonte: Catalogo HUBER, (2015).

## 2.10. Sistemas de Secagem Solar Convencionais

Os leitos solares pavimentados de cama e areia são exemplos de secadores solares tradicionais. Uma cama solar pavimentada é uma área pavimentada de asfalto ou betão, construída como drenos de areia. Se as propriedades de sedimentação de lamas forem boas, é possível remover 20-30% de água das lamas. O período de secagem depende das condições climáticas. Por exemplo, em uma região árida, um lodo com 30 cm de espessura pode atingir

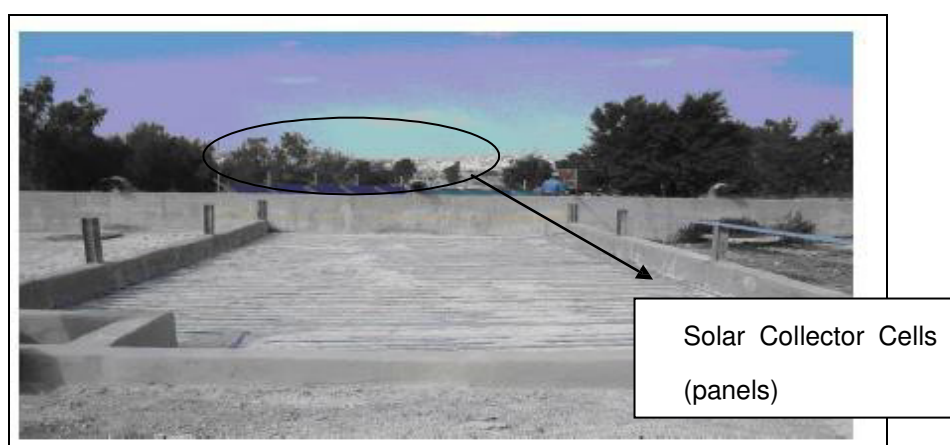
até 40 a 50% DS em 30 a 40 dias (EPA, 1987). Um leito de secagem em areia é uma cama de secagem apoiada com canais de drenagem. A lama é colocada em espessura de 200 a 300 mm e deixada secar. Os leitos de secagem em areia podem facilmente secar lodo além de 25-40% de DS e podem até secar a lama até 60% de conteúdo sólido seco, desde o tempo de detenção adequado. Os leitos de secagem são geralmente utilizados para instalações de tratamento de águas residuais industriais ou industriais de pequena e média dimensão. Embora o método seja simples e requer uma atenção mínima da operação, apresenta desvantagens devido ao grande requisito de área e à dependência das condições climáticas. As condições climáticas e a baixa taxa de drenagem também podem causar remoção de odor e baixa patogênese (METCALF, 2003; AL-MUZAINI, 2003; ÖGLENİ et al., 2010).

A eficiência de remoção de patógenos sendo baixa em leitos de secagem convencionais pode causar um problema porque limita o uso de lodo (RITTERBUSCH et.al., 2012). Nos Estados Unidos, a lama da Classe A é o nível desejável para a aplicação de lodo em gramados, jardins domésticos e pode ser vendido ou distribuído em sacos ou transportado dentro de outros recipientes (EPA,1997). Para atingir o grau A, *E.coli*, coliformes fecais e *Salmonella* devem ser inferiores a 100MPN / por grama (peso seco), 1000 MPN / por grama (peso seco) e não detectáveis, respectivamente (EPA, 1997). Embora o lodo possa atingir a classe B por algumas técnicas de estabilização, como digestão anaeróbica, digestão aeróbica e estabilização do limão sem usar uma unidade de secagem, ela precisa ser seca para atingir a qualidade da classe A. Os microrganismos patogênicos podem ser significativamente removidos durante períodos quentes e secos. Usando áreas de cama de areia modificada, secando sob o sol por um longo período de tempo ou aquecendo a cama embaixo estão algumas soluções para obter uma melhor remoção de patógenos em um período mais curto.

Em um estudo de caso na Jordânia, foram comparados leitos convencionais de secagem de areia não modificados e leitos de secagem de areia modificados. Os leitos de secagem consistiam em camada de cascalho e areia de 0,6 m de

espessura. As lâminas foram aplicadas nesses leitos com 25 cm de espessura. O leito modificado incluiu tubos galvanizados, que levavam água quente para lodo seco. O sistema possui sensores de temperatura para medir a temperatura em diferentes locais e profundidades de lodo. As células coletoras solares, mostrados na Figura 2.24 de uma área de superfície total de 20 m<sup>2</sup> foram utilizadas para aquecer a água, que fluiu através da rede de tubos sob a camada de lodo. As lamas absorveram o calor fornecido pela circulação de água quente e a água arrefecida voltou a um tanque de armazenamento para ser novamente aquecida (RADAIDEH et al., 2011).

Figura 2.24 - Leito modificado com a rede de tubos galvanizados



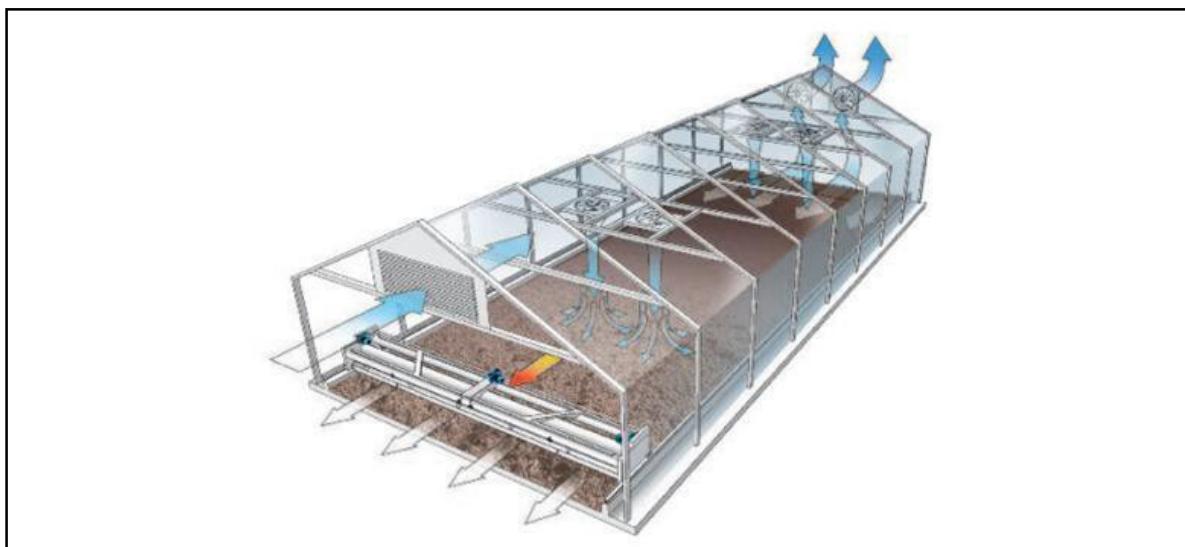
Fonte: (Radaideh et al., 2011)

O teor de água das lamas diminuiu de 96,5% para 32,94% em 18 dias em leitos de secagem convencionais na Jordânia. Quando o leito de secagem modificado foi utilizado, o tempo de secagem foi reduzido em 60% para atingir a mesma secura. Em comparação com os leitos de secagem convencionais, o teor de água das lamas diminuiu 7,9% nos leitos modificados na mesma duração. Além disso, quando a temperatura nos leitos de secagem convencionais foi aumentada, 100% de remoção de algumas espécies patogênicas foi alcançada. Outros contaminantes e patógenos podem ser reduzidos em 99% nos leitos de secagem modificados (RADAIDEH et al., 2011).

### 2.10.1. Secador solar com estufa

Uma planta de secagem de lodo solar de estufa pode ser construída como uma estufa de tipo túnel. Ele pode ser inteiramente fechado com folhas de polycarbonato transparente e espesso para fornecer transmitância de luz (alguns cobertos com vidro) como ilustrado na Figura 2.25. A aeração interna é conseguida com um ventilador para que a umidade no interior seja removida e mantida estável. A lama é periodicamente misturada para que possa ser seca homogeneamente. Um estudo mostrou que na Grécia, 8 kg de lodo desidratado foram colocados em um secador solar de estufa a 20-25 cm de profundidade. O teor de umidade das lamas diminuiu de 85% para 6% em 7-15 dias no verão e até 10% no prazo de 9 a 33 dias no outono. Se o mesmo sistema fosse suportado com calor auxiliar, o processo de secagem tomou de 1-9 dias no inverno (BENNAMOUN, 2012).

Figura 2.25 - Esquema de um sistema de secagem solar de estufa



Fonte: (Huber, 2007)

Os secadores solares de estufa são ecológicos e têm emissões de CO<sub>2</sub> muito baixas quando comparados com sistemas térmicos, porque não usam combustível fóssil ou usam pouco combustível fóssil para ventilação e propósitos de mistura. Além disso, os sistemas de secagem solar são mais baratos porque podem operar a baixas temperaturas (10-40°C) e são fáceis de manter. O trabalho

é necessário para o carregamento de lodo molhado e colocando as lamas secas em secadores solares em estufa. O uso de uma máquina simples para fins de transporte, nenhum requisito para operação contínua e pessoal educado para casos de emergência são as vantagens dos sistemas de secagem solar de estufas.

Este sistema também é vantajoso para remoção de patógenos em comparação com leitos de secagem convencionais (BUX et al., 2003).

As tecnologias, como os secadores térmicos, podem secar o material mais rapidamente, mas ao custo de energia adicional (MANGAT et al., 2009). As vantagens da secagem solar são poucas exigências de energia e produção de lamas contendo baixa massa total de bio sólidos devido à evitação de agentes de volume (como na compostagem ou produtos químicos como na estabilização do limão). Dependendo do sistema particular instalado, os sólidos com concentração inicial de DS de 2 a 35% podem ser secos até 90% de DS, o que permite que esta tecnologia seja atrativa para plantas de pequeno a médio porte em climas moderados e também para plantas de maior porte em aquecimento climas (SEGINER et al., 2005).

Um estudo realizado por SALIHOGLU et al., (2007), comparou camas de secagem aberta com leitos de secagem cobertos em termos de remoção de patógenos. Camas de secagem aberta fornecidas 60% de teor de umidade em 55 dias, enquanto os leitos de secagem cobertos atingiram 20% de umidade durante o mesmo período. O estudo de SALIHOGLU (2007) centrou-se na remoção de patógenos. Ele concluiu que uma maior redução de patógenos foi alcançada com o sistema de secagem de lodo coberto em comparação com o sistema aberto no horário de verão. Antes da secagem, o teor de coliformes das lamas mecanicamente desidratadas foi de 107 CFU g-1DS, enquanto que no final de 45 dias na área de secagem solar coberta, o conteúdo coliforme diminuiu para abaixo de  $2 \times 10^6$  CFU g-1DS (o limite para a Classe EPA Requisito de patógeno B) no verão. No entanto, para obter o requisito de patógenos Classe A da EPA de 1000 CFU g-1DS em um curto período de tempo, uma quantidade limitada de lima foi adicionada às lamas desidratadas antes da secagem solar. O nível de coliformes



requerido foi alcançado em média 10 dias no verão e em 20 dias no inverno. O uso de um piso de aquecimento, aquecedor de água solar, lâmpadas de infravermelhos, bombas de calor ou a adição de sistemas de armazenamento de energia térmica poderia aumentar o desempenho de secagem e o índice de remoção de patógenos (SALIHOGU et al., 2007; BENNAMOUN, 2012; SHANAHAN et al., 2010).

#### 2.11. Aplicações de secadores solares de estufa

Existem muitos exemplos e estudos completos sobre os secadores solares de estufa no mundo. No final de 2003, havia 48 plantas de secagem solar ativas no mundo. 65% dessas plantas estavam na Alemanha, Suíça, Áustria, França, EUA, Itália e Austrália (BUX et al., 2003).

Um estudo que avaliou 25 plantas de tratamento na Europa mostrou que as taxas de evaporação durante a secagem de lodo variaram entre 0,6-1,0 ton / m<sup>2</sup>. Nos casos em que foi incorporado um sistema de aquecimento, esse valor aumentou até 3.5 ton / m<sup>2</sup>. Nas plantas de tratamento que não possuem unidades de desidratação, a taxa de evaporação também foi alta, que era 2-3 ton / m<sup>2</sup>, devido ao maior desempenho na drenagem de água livre em um piso de drenagem. Em áreas de estudo específicas na Alemanha, Suíça e Áustria, as taxas de evaporação em lamas desidratadas foram medidas como 0,5-1,1 toneladas de água evaporada / m<sup>2</sup>.ano. Em uma estação de tratamento no sul da Alemanha, o teor de matéria seca chegou a 60-70%.

A área de secagem requerida foi calculada como 0,8-1,2 m<sup>2</sup> / tonelada de lodo molhado por ano para lodo desidratado que foi seco sem aquecimento de reserva. Para as lamas que não foram desidratadas, a área requerida foi calculada como 0,3-0,5 m<sup>2</sup> / tonelada de lodo úmido por ano devido à alta taxa de evaporação (BUX et al., 2003).

As cidades de Mallorca (Espanha) e Oldenburg (Alemanha) possuem os maiores secadores solares de estufa do mundo. Estas plantas são boas

referências para estimar o desempenho de secagem de secadores solares de estufa. A Figura 2.26 ilustra a visão do secador de lodo da área de Palma de Mallorca, de 20 mil m<sup>2</sup>. A área da fábrica de Oldenburg é de 6000 m<sup>2</sup> e pode lidar com 40.000 toneladas de lodo molhado totalmente originário de diferentes ETARs. Enquanto a secura inicial (DSi) é de 15-30%, a secura final (DSf) é alcançada como 60-70% na planta de secagem solar de Oldenburg. A quantidade de lodo seco neste local é 6 vezes maior que as unidades de secagem solar não assistidas na mesma condição climática (RITTERBUSCH et al., 2012).

Figura 2.26 - Vista da planta de secagem solar de estufa de Palma de Maiorca na Espanha com área de 20 000 m<sup>2</sup>



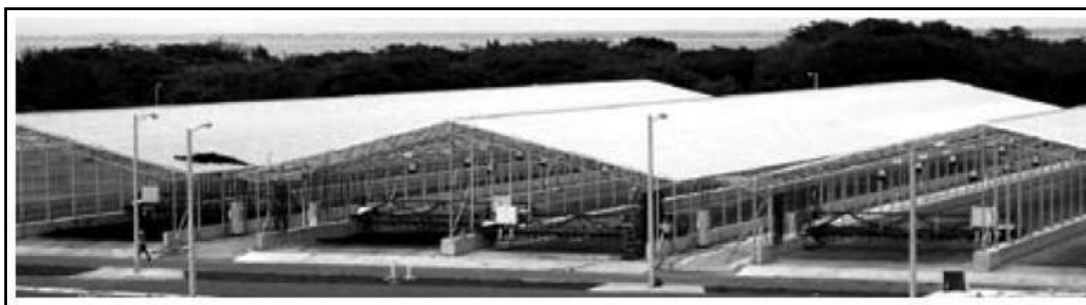
Fonte:(Ritterbusch et al., 2012)

O estudo na Nicarágua de SCHARENBERG et al., (2010) mostrou que a secura das lamas de 28% poderia atingir 70% de DS em 3 semanas de secagem. No mesmo estudo, relatou-se que a quantidade de lodo diminui para 4300 kg / m<sup>2</sup> por ano na estação chuvosa. Se o tempo de secagem for de 30 dias, o DS de 87% poderá ser alcançado. Além disso, são necessários 20 kWh de energia para a evaporação de uma tonelada de água sem sistema de ventilação não contínua. Esse valor é quase 800-1000kWh para sistemas de secagem térmica.

Infelizmente, a área de terra requerida é bastante grande, que é de cerca de 8000 m<sup>2</sup>, ou 0,4 m<sup>2</sup> por tonelada de bolo filtrado. Este valor aumenta para 1,2 m<sup>2</sup> / tonelada de bolo filtrado na Europa do meio devido à menor temperatura ambiente. O custo de capital do sistema na Nicarágua é de 690 € / ano de

tonelada seca de lodo. Além disso, esta planta de secagem é o maior secador solar de estufa na América, como encomendado em 2010. A Figura 2.27 e 2.28 são as vistas das plantas de secagem de lodo acima mencionadas.

Figura 2.27- Visão da planta de secagem solar de lodo em Manágua / Nicarágua



Fonte: (Scharenberg et al., 2010)

Figura 2.28: Visão da planta de secagem solar de lodo em Manágua / Nicarágua



Fonte: (Scharenberg et al., 2010)

Um exemplo de secador de lodo solar em estufa está na estação de tratamento de águas residuais de Fethiye em Turquia mostrado na Figura 2.29. Este sistema foi projetado para atingir um DSC final de 50%. A área da instalação é de 2000m<sup>2</sup>. No horário de verão, as lamas podem secar até 85% dentro de 2 a 2 dias. No inverno, esta duração aumenta para 3,5 dias e o teor final de sólidos secos atingiu 50% de DS (Informação dos operadores da planta).

Figura 2.29: Fábrica de Tratamento de águas residuais de Fethiye planta de secagem solar de lodo em Manágua / Nicarágua



Fonte: Fethiye planta de secagem solar de lodo(Abril de 2013).

## 2.12. Parâmetros de projeto de um secador solar de estufa

Os parâmetros de projeto de um secador solar de estufa são a taxa de evaporação, a taxa de produção de lodo e a secura final (SEGINER et al., 2006; SEGINER et al., 2007). A secagem neste sistema depende da temperatura ambiente média, radiação solar, ventilação, mistura de lamas e secura inicial das lamas, que são os parâmetros independentes do tamanho da estação de tratamento. A mistura e a ventilação também são significativas para aumentar a taxa de evaporação. A mistura e a ventilação podem ser aplicadas de diferentes maneiras. As figuras 2.30, 2.31 e 2.32 mostram alguns exemplos de mistura e ventilação.

Figura 2.30: Sistema de secagem solar em estufa



Fonte: (Huber)

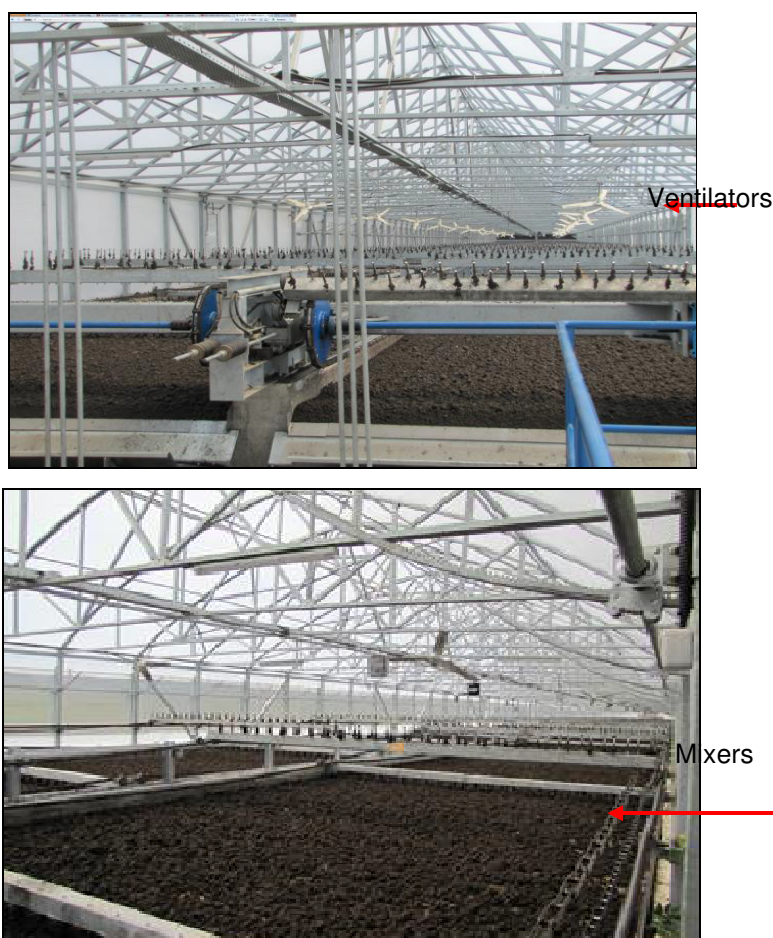
Figura 2.31: Distribuição de Lodo molhado, secagem e carga de lamas secas na estação de secagem solar de Palma de Mallorca



Fonte:(Ritterbusch et al., 2012)



Figura 2.32: Fábrica de tratamento de águas residuais de Fethiye - Unidade de secagem solar



Fonte: Fábrica de tratamento de águas residuais de Fethiye - Unidade de secagem solar

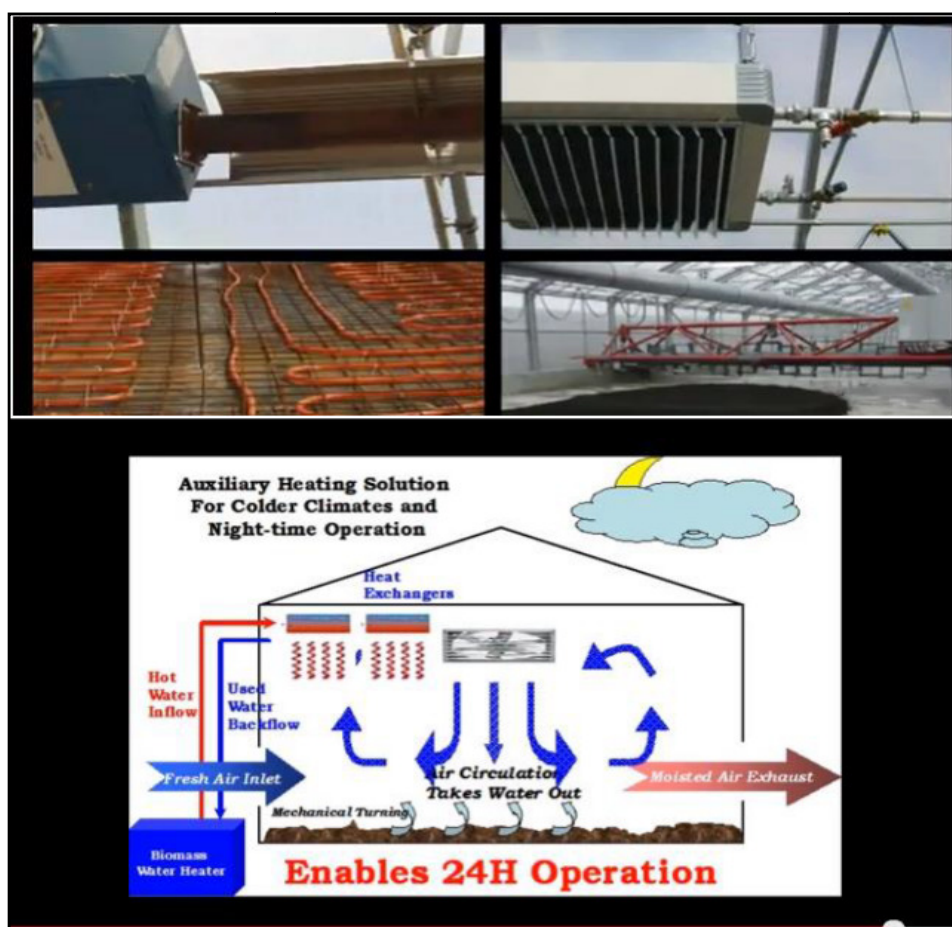
A energia necessária para a operação de sistemas de secagem solar em estufa é entre 15 e 40 kWh / tonelada de água evaporada quando são utilizados dispositivos de ventilação e mistura de lodo. Esse valor é 2 ou 3 vezes menor do que a energia necessária para a secagem térmica. Além disso, menos consumo de combustível e energia diminui a emissão de CO<sub>2</sub>. Quando as emissões de CO<sub>2</sub> para diferentes sistemas de secagem são comparadas na Alemanha, foram emitidos 24 kg de CO<sub>2</sub> / tonelada de água evaporada em secagem solar, enquanto que 1,70 kg de CO<sub>2</sub> / tonelada de água evaporada foram emitidos em secagem térmica. Em outras palavras, a emissão de CO<sub>2</sub> na planta de secagem solar é 15% inferior à da planta de secagem térmica (RITTERBUSCH et al., 2012).

### 2.12.1. Uso de calor auxiliar em aquecedores solares de estufa

O calor auxiliar pode ser usado em um secador solar de estufa em locais frios para alcançar um DSC alto ou para diminuir o tempo de secagem. Um secador solar de estufa pode ser suportado com calor auxiliar de duas maneiras.

Uma maneira é que a base do secador de estufa pode ser construída com uma camada de cascalho onde a água aquecida pode circular facilmente. O outro lado é que o ar quente pode ser soprado através da superfície da lama (WEISS et al., N.d.). A Figura 2.33 mostra as aplicações dessas duas maneiras de fornecer calor auxiliar.

Figura 2.33: Aquecimento auxiliar de sistemas de secagem solar em estufa



Fonte: (Aritma Çamurları)

O calor auxiliar poderia ser o calor residual, o calor obtido através de energia renovável ou calor convencional. A energia solar é uma das opções. No entanto, antes de decidir se deve usar um coletor solar, a base econômica, os efeitos sobre o meio ambiente e a segurança dos coletores solares devem ser considerados. Embora o custo de investimento inicial da energia solar seja alto, o coletor é alto quando os custos do combustível são considerados, a energia solar é econômica em longo prazo. Outros aspectos importantes a considerar são os sistemas de armazenamento e conversão de energia (DUFFIE et al., 2013; KALOGIROU, 2009).

Por exemplo, sistemas solares, são usados para converter a radiação solar diretamente em calor. A produção de energia nestes sistemas depende da luz solar. Eles podem produzir qualquer escala de energia necessária. Além disso, esses sistemas têm uma vida longa. Eles também podem ser usados independentemente ou em conjunto com outras fontes de energia elétrica (LYSEN, 2013). Portanto, o sistema de aquecimento solar é uma boa opção para ser usado como fonte auxiliar. A Tabela 2.2 mostra um exemplo em que os custos de secagem térmica e solar são comparados. Para a secagem da mesma quantidade de lodo, um secador solar tem custos de investimento e operação mais baratos em comparação com a secagem térmica.

Tabela 2.2 - Custos para a secagem solar de 25 toneladas / dia de lodo do relatório de viabilidade de Antalaya

	Solar drying ( U\$\$)	Thermal drying (U\$\$)
Investment Cost (TL)	2,500,000	5,000,000
Operation Cost (TL/month)	29,000	120,000
Energy expense(TL/month)	6,500	80,000
Maintenance and Personal expense (TL/month)	4,000	10,000
Sludge removal expense (TL/month)	18,500	30,000
Sludge Amount(ton/month)	750	750
Operation cost (TL/ton)	39	160

Fonte: (Lysen, 2013)



O uso de coletores solares para fornecer energia auxiliar reduz o tempo de secagem e aumenta a taxa de evaporação. MATHIOUDAKIS et al. (2009) usaram um coletor solar para aquecer água para melhorar a secagem. Neste sistema, a água aquecida foi bombeada e circulada através da superfície do solo onde as lamas foram secas. Após o aprimoramento da secagem com este método de aquecimento, lodo com secura inicial de 15% pode ser seco até 90% de secura no inverno dentro de 9 a 33 dias. Este valor no horário de verão foi de 94% de secura, obtido em 7-12 dias. Além disso, a remoção de patógenos aumentou para 99%. Outro estudo na Polônia (KRAWCZYK et al., 2011) relataram que uma taxa de evaporação de 8,12 kg de água / m<sup>2</sup> por dia poderia ser obtida apenas usando energia solar sem aquecimento auxiliar.

Como uma fonte de calor auxiliar foi adicionada a este sistema através de lâmpadas infravermelhas, a taxa de secagem aumentou para 11,11 kg de água / m<sup>2</sup> por dia. Quando o calor foi administrado por debaixo do chão, a taxa de secagem melhorou para 11,71 kg de água / m<sup>2</sup> por dia.

Segundo (PEREIRA, 2009), podemos definir a taxa de secagem como a quantidade de água evaporada por hora pela área de superfície de secagem.

Outro benefício do fornecimento de calor adicional é o declínio na área utilizada para a secagem. Quando os sistemas de secagem solar são combinados com sistemas que usam o calor residual, a área requerida para a secagem das lamas diminui de 3 a 5 vezes. Além disso, o valor calorífico dos biossólidos secos finais é alto e o lodo é adequada para uso agrícola (RITTERBUSCH et al., 2012).

### 2.13. Análise do custo do ciclo de vida (ACCV)

A análise do custo do ciclo de vida (ACCV) de um produto ou projeto é o método de cálculo da totalidade de todos os custos associados aos benefícios obtidos durante o ciclo de vida de um produto ou projeto. De um modo geral, a ACCV é uma ferramenta de gestão muito útil quando o que se pretende é

reduzir ao máximo os gastos e maximizar os benefícios obtidos (PEREIRA, 2009).

#### 2.13.1. Classificação dos custos

Os custos associados podem ser divididos em: custos de investimento (aquisição ou substituição de equipamentos), custos de manutenção e operação e custo total (que é somatório dos custos de investimento mais os custos operacionais associados ao longo do período de utilização) (PEREIRA, 2009).

#### 2.13.2. Análise da viabilidade econômica

A análise da viabilidade econômica de um projeto consiste em fazer a estimativa de todos os gastos envolvidos durante determinado período de tempo. Para que se possa montar o fluxo de caixa relativo aos investimentos, custos e receitas e determinar algum indicador econômico que auxilie concluir sobre a viabilidade do projeto (LINDEMEYER, 2008).

#### 2.13.3. Método do valor Presente Líquido

O método do valor presente líquido (VPL) é considerado exato e consiste em trazer para o tempo presente, após a definição de uma taxa de juros, os valores obtidos a partir do fluxo de caixa dos custos e benefícios ao longo de um período de análise (PEREIRA, 2009).

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste na análise de alternativa de sistema de secagem térmica solar de lodo gerado em duas diferentes estações de tratamento, dimensionadas para atender uma população de 100.000 habitantes. Para melhor compreender a secagem térmica solar de lodo como alternativa de tratamento, realizou-se uma revisão bibliográfica com o auxílio de livros-texto, artigos científicos e trabalhos de pesquisa.

Com a finalidade de aperfeiçoar a análise são propostos diferentes cenários e a utilização de diferentes equipamentos de secagem térmica.

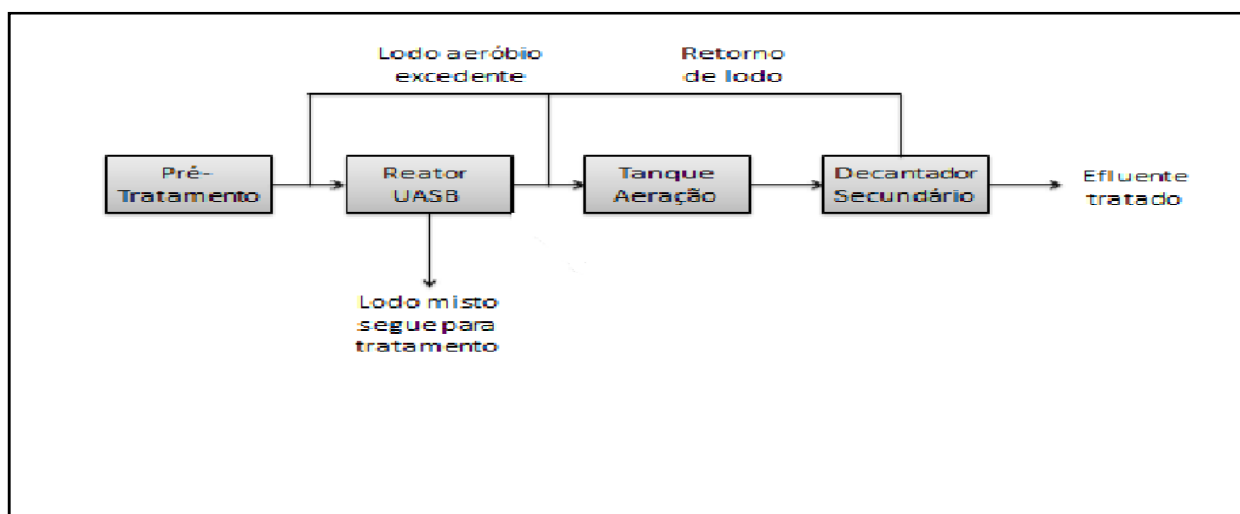
Foi realizada a avaliação dos custos totais de cada alternativa (ao longo do ciclo de vida do projeto), ao considerar os custos de implantação e substituição dos sistemas, custos operacionais (operação e manutenção dos equipamentos), custos energéticos e os custos com disposição final de lodo em aterro sanitário.

#### 3.1 Descrição das estações de tratamento avaliadas no trabalho

##### 3.1.1 ETE 1 - Reator UASB seguido por lodo ativado convencional

A ETE 1 (UASB-LAC) é um sistema de tratamento de efluentes composto por um reator UASB seguido de lodo ativado convencional, mostrado na Figura 3.1. O lodo excedente produzido no tanque de aeração será encaminhado para o reator UASB onde será estabilizado juntamente com o lodo anaeróbio produzido no reator, formando um lodo misto que segue para posterior tratamento do lodo.

Figura 3.1: ETE1 - (UASB-LAC)

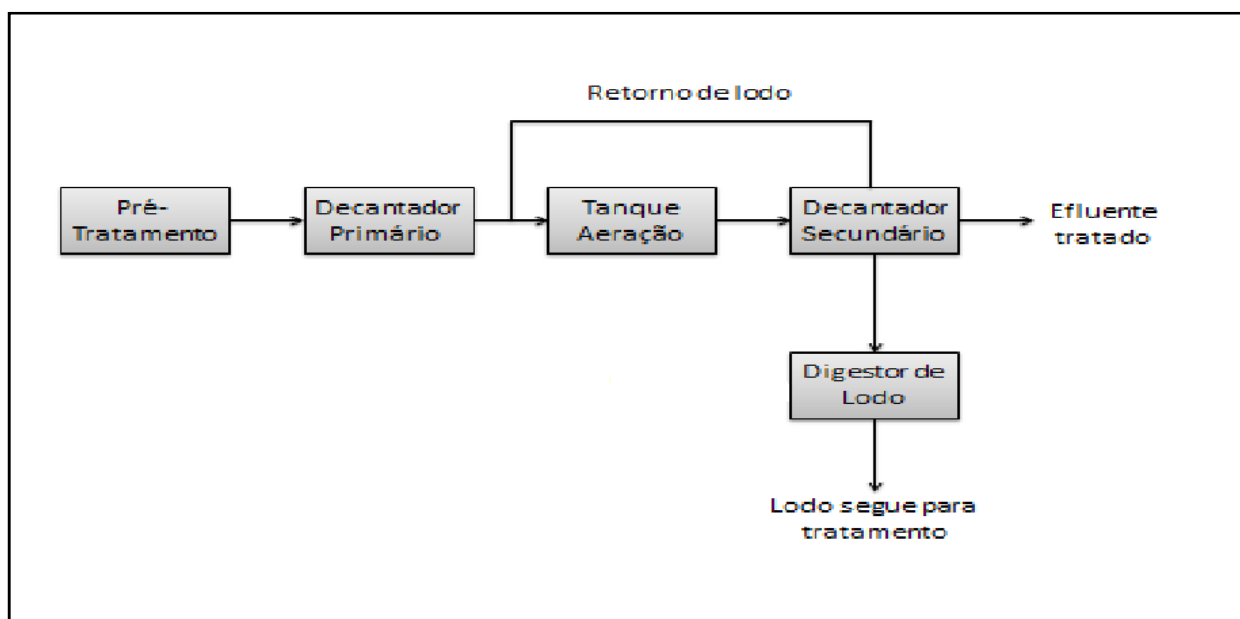


Fonte: autor.

### 3.1.2 ETE 2 - Lodo ativado convencional seguido de digestor de lodo

A proposta da ETE 2, baseia-se na utilização de um decantador primário para remoção de parcela da matéria orgânica sedimentável, seguido de lodo ativado convencional que geralmente apresenta uma idade de lodo de 4 a 10 dias, mostrado na Figura 3.2. Como a idade de lodo é reduzida, o lodo excedente possui maior parcela de matéria orgânica e necessita de uma unidade de estabilização anaeróbia (VON SPERLING, 2014). A estabilização do lodo para o caso da ETE 2 é realizada nos digestores de lodo.

Figura 3.2: ETE2 - (DP-LAC-DL)



Fonte: autor.

### 3.2 Descrição dos sistemas de secagem térmica a serem avaliados

Os sistemas de secagem a serem avaliados para cada estação estão descritas na tabela 3.1, podemos observar que temos 4 sistemas descritos abaixo através dos quais podemos efetuar um estudo comparativo das tecnologias de secagem, sendo 1 sistema apresentando leitos de secagem, 2 sistemas apresentando secagem térmica convencional e 1 sistema apresentando secagem térmica solar.

O sistema 1 será o cenário caracterizado como prática usual nas estações de tratamento, onde parte da umidade é removida do lodo até um teor final de sólidos que seja praticável sua disposição final em aterro sanitário.

Tabela 3.1 - Descrição dos sistemas avaliados para cada uma das estações de tratamento.

	<b>Caracterização dos Sistemas</b>
<b>Sistema1</b>	Desidratação mecânica até 25% de sólidos. Leito de Secagem convencional. Disposição final do lodo em aterro sanitário.
<b>Sistema2</b>	Desidratação mecânica até 25% de sólidos. Secagem térmica até um teor de sólidos de 90%, utilizando um <b>Secador tipo esteira</b> . Disposição final do lodo em aterro sanitário.
<b>Sistema3</b>	Desidratação mecânica até 25% de sólidos. Secagem térmica até um teor de sólidos de 90%, utilizando um <b>Secador tambor rotativo</b> . Disposição final do lodo em aterro sanitário.
<b>Sistema4</b>	Desidratação mecânica até 25% de sólidos. Secagem térmica até um teor de sólidos de 75%, utilizando um <b>Secador Solar</b> . Disposição final do lodo em aterro sanitário.

Tabela 4.1- Dados iniciais para realização dos cálculos

Parâmetro	Notação	Valor	Unidade	Fonte
Custo com disposição final em aterro sanitário				
T.S ≥ 60%	Cdf	90,0	R\$/T	Bielschowsky (2014)
30% < T.S < 60%		110,0		
T.S ≤ 30%		160,0		
Produção e características do lodo				
Produção total diária de lodo ETE 1	P (lodo)	2.918	kg SST/d	-
Produção total diária de lodo ETE 2	P (lodo)	3.805	kg SST/d	
Massa específica do lodo	(γ)	1.000	kg/m³	Adotado
Teor de sólidos secos (pós-centrífuga)	TS (inicial)	25,0	%	Adotado
Teor de umidade no lodo (pós-centrífuga)	U (inicial)	75,0	%	
Secador térmico tipo tambor rotativo				
Consumo de Energia Térmica	E term(u)	1,0	kWh/Kg água	Fabricante
Consumo de Energia Elétrica	E eletr(u)	0,085	kWh/Kg água	
Secador térmico tipo esteira				
Consumo de Energia Térmica	E term(u)	0,9	kWh/Kg água	Fabricante
Consumo de Energia Elétrica	E eletr(u)	0,09	kWh/Kg água	
Secador Solar				
Consumo de Energia Elétrica	E eletr(u)	0,028	kWh/Kg água	Fabricante
Área requerida para secagem térmica	A	1855	m²	
Comprimento da estufa	L	85	m	

Parâmetro	Notação	Valor	Unidade	Fonte
Custo dos Equipamentos				
Secador tambor rotativo	Ist (tr)	R\$ 875.000,00	Reais	Fabricante
Secador tipo esteira	Ist (te)	€ 1.327.117,00	Euros	Fabricante
Secador Solar	Ist (ss)	€ 882.711,00	Euros	Fabricante

Fonte: autor.

Podemos verificar na tabela 4.1 acima os dados utilizados para os cálculos

para o estudo comparativo dos sistemas.

Podemos ainda observar que de acordo com os valores apresentados a maior quantidade de Sólidos Totais, causa uma maior elevação dos custos de disposição do lodo, foi observado que secador solar seria também o que apresenta menor consumo de energia elétrica, porém apresenta como desvantagem uma área demandada extremamente elevada, observamos ainda que nos 2 secadores térmicos a demanda de energia térmica e elétrica apresentam valores bem próximos, porém fazem uso de combustíveis fósseis os quais colaboram para o aumento do efeito estufa do planeta.

### 3.3. Cálculo do custo operacional diário

Os custos operacionais associados a cada uma das alternativas serão baseados nos custos diários de cada um dos seguintes itens que compõe o sistema de aproveitamento energético do biogás e o sistema de secagem térmica conforme equação relacionada abaixo.

$$OPEX\ total = CTD + CST + CEN + CGN \quad (3.1)$$

Onde:

*OPEX total*: Custo total diário de operação do sistema para cada alternativa (R\$/dia)

*CTD*: Custo com disposição final de lodo em aterro sanitário (R\$/dia)

*CST*: Custo de operação e manutenção secador térmico (R\$/dia)

*CEN*: Custo com energia elétrica para o sistema de secagem térmica (R\$/dia)

*CGN*: Custo com gás natural como energia complementar ao sistema de secagem térmica (R\$/dia)

#### 3.3.1 Custo com disposição final de lodo

$$CTD = M\ lodo \times Cdf \quad (3.2)$$

Onde:

*M lodo*: Massa de lodo transportada (T/dia)

*Cdf*: Custo unitário para destino final em aterro sanitário (R\$/T) – Varia conforme teor de sólidos final.



Para isso, deve-se saber qual o volume de lodo para determinado teor de sólidos, devendo utilizar-se a equação abaixo.

$$V(lodo) = M_{ss} / \gamma \times TS \quad (3.3)$$

Onde:

$V(lodo)$ : Volume de lodo ( $m^3/dia$ )

$M_{ss}$ : Massa de sólidos produzida diariamente (KgSS/dia)

$\gamma$ : Massa específica do lodo ( $Kg/m^3$ ).

$TS$ : Teor de sólidos do lodo (%).

Por fim, calcula-se a massa de lodo final transportada utilizando se a equação relacionada abaixo.

$$M_{lodo} = V(lodo) \times \gamma \quad (3.4)$$

Onde:

$M_{lodo}$ : Massa de lodo (Kg/dia)

$V(lodo)$ : Volume de lodo ( $m^3/dia$ )

$\gamma$ : Massa específica do lodo ( $Kg/m^3$ )

### 3.3.2 Custo de operação e manutenção

Os custos associados à operação e manutenção dos sistemas de secagem térmica foram estimados em 2% ao ano do valor do investimento inicial e podem ser calculados pela equação relacionada abaixo.

$$CST = 2\% \times Ist / 365 \quad (3.5)$$

Onde:

$CST$ : Custo de manutenção e operação do secador térmico (R\$/dia)

$Ist$ : Investimento inicial no secador térmico (R\$)

### 3.3.3 Custo com energia elétrica

Para calcular a quantidade de energia elétrica utilizada pelos sistemas de secagem utiliza-se a equação relacionada abaixo.

$$CEN = E_{el} \times C_{el} (\mu) \quad (3.6)$$

Onde:

$CEN$ : Custo com energia elétrica para o sistema de secagem térmica (R\$/dia)

$E_{el}$ : Energia elétrica demandada pelo secador térmico (kWh/dia)

$C_{el}(u)$ : Custo unitário de energia elétrica (R\$/kWh).

### 3.3.4 Custo com gás natural

Para calcular a quantidade de gás natural utilizado pelos sistemas de secagem utiliza-se a equação relacionada abaixo.

$$CGN = VGN \times C_{gn}(u) \quad (3.7)$$

Onde:

$CGN$ : Custo com gás natural para o sistema de secagem térmica (R\$/dia)

$VGN$ : Volume de gás natural utilizado (m³/dia).

$C_{gn}(u)$ : Custo Gás natural unitário (R\$/m³)

Para o cálculo do volume de gás natural necessário utiliza-se a equação abaixo.

$$VGN = E_{gás\ natural\ (req)} / PCI_{gn} \quad (3.8)$$

Onde:

$E_{gás\ natural\ (req)}$ : Energia de gás natural requerida (kWh/dia)

$PCI_{gn}$ : Poder calorífico inferior do gás natural (kWh/m³)

Para avaliar a necessidade de complemento com energia proveniente de gás natural, deve-se fazer a seguinte consideração:

Se:  $E_{térmica\ (disp)} > E_{térmica\ (req)} \therefore E_{gás\ natural} = 0$

$E_{térmica\ (disp)} < E_{térmica\ (req)} \therefore E_{gás\ natural} = E_{térmica\ (req)} - E_{térmica\ (disp)}$

O cálculo da quantidade de energia térmica requerida pelo secador térmico pode ser calculado pela equação relacionada abaixo.

$$E_{térmica}(req) = M(água\ evap) * E_{térmica}(u) \quad (3.9)$$

Onde:

$E_{térmica}(req)$ : Energia térmica requerida pelo secador térmico (kWh/dia)

$M(água\ evap)$ : Massa de água evaporada (Kg água/dia)

$E_{térmica}(u)$ : Energia térmica consumida pelo secador térmico por Kg de água evaporada (kWh/Kg água)

A quantidade de água evaporada é a diferença entre a massa de lodo afluyente e a massa efluente ao secador térmico, conforme equação abaixo.

$$M(água\ evap) = M_{lodo(ast)} - M_{lodo(est)} \quad (3.10)$$

Onde:

$M_{lodo (ast)}$ : Massa de lodo afluente ao secador térmico (Kg/dia).

$M_{lodo (est)}$ : Massa de lodo efluente ao secador térmico (Kg/dia).

### 3.3.5 Cálculo do valor presente do custo operacional

Para avaliar o custo total de operação de cada alternativa em valor presente, utiliza-se a equação relacionada abaixo.

$$OPEX (total VP) = opex(1)/(1+i)^1 + opex(2)/(1+i)^2 + \dots + opex(n)/(1+i)^n \quad (3.11)$$

Onde:

$OPEX (total VP)$ : Custo total de operação do projeto em valor presente (R\$).

$opex(n)$ : Custo total de operação para o ano (n) (R\$).

$i$ : Taxa de juro anual (%).

$n$ : Vida útil do projeto (anos).

### 3.4. Custos de investimento no sistema de secagem térmica

Os custos de investimento dos equipamentos de secagem térmica foram obtidos a partir de informações passadas por dois fabricantes desses equipamentos. O secador térmico do tipo tambor rotativo é um equipamento de fabricação nacional com alguns casos de aplicação no Brasil, já os equipamentos de secagem térmico do tipo esteira e secador solar são de fabricação alemã. Os demais investimentos em equipamentos foram baseados no estudo realizado por ROSENFELDT ET al. (2015).

Cabe destacar que ao longo do ciclo de vida do projeto é necessária a substituição de equipamentos do sistema de aproveitamento do biogás, assim esses custos com substituição também devem ser levados ao seu valor presente utilizando a equação abaixo.

$$CAPEX (total VP) = Capex(o) + Capex(8)/(1+i)^8 + Capex(10)/(1+i)^{10} + Capex(15)/(1+i)^{15} \quad (3.12)$$

Onde:

$CAPEX (total VP)$ : Custo total de investimento do projeto em valor presente (R\$).

$capex(n)$ : Custo de substituição de equipamentos para determinado ano (R\$).

$i$ : Taxa de juro anual (%).

### 3.5. Custo total do sistema avaliado

Para o cálculo total do sistema de secagem utiliza-se a equação relacionada abaixo.

$$\text{Custo total} = \text{CAPEX (total VP)} + \text{OPEX (total VP)} \quad (3.13)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas tabelas 4.1 e 4.2 serão expostos os resultados dos cálculos para as duas estações de tratamento avaliadas.

Tabela 4.1: Resultados obtidos ETE 1.

ETE 1 - (UASB-LA)	Simbologia	Uni.	Sist.1	Sist.2	Sist.3	Sist.4
Energia elétrica produzida	E elétrica (disp)	kWh/dia	-	3.810	3.810	-
Energia térmica produzida	E térmica (disp)	kWh/dia	-	4.611,3	4.611,3	-
Potência Instalada CHP	P chp	kW	-	173,8	173,8	-
Energia Térmica (requerida) pelo secador térmico	E térmica (req)	kWh/dia	-	7.586,8	8.429,8	-
Energia elétrica (requerida) pelo secador térmico	E elétrica (req)	kWh/dia	-	758,7	716,5	392,2
Energia complementar gás natural	E (gn)	kWh/dia	-	2.975,5	3.818,5	
Consumo diário de gás natural	V (gn)	m³/dia	-	287,2	368,6	-
Massa de lodo transportada	M	t/dia	11,67	3,24	3,24	3,89
ETE 1 - (UASB-LA)	Simbologia	Uni	Sist.1	Sist.2	Sist.3	Sist.4
Custo total de operação diário	OPEX (total)	R\$/dia	1.867,52	205,51	95,31	718,46
Custo total de operação e manutenção ao longo do projeto (VP)	OPEX (total VP)	R\$	R\$ 13.632.896	R\$ 1.500.240	R\$ 695.768	R\$ 5.244.762
Investimento secadores térmicos (VP)	CAPEX st	R\$	-	R\$ 4.644.909	R\$ 875.000	R\$ 3.089.488
Investimento total sistema de secagem térmica (VP)	CAPEX total	R\$	-	R\$ 7.712.568	R\$ 3.942.659	R\$ 3.089.488
Custo total	CUSTO TOTAL	R\$	R\$ 13.632.896	R\$ 9.212.809	R\$ 4.638.427	R\$ 8.334.251
Custo per capita	CUSTO percap	R\$/hab	R\$ 136,33	R\$ 92,13	R\$ 46,38	R\$ 83,34

Fonte: autor.

Tabela 4.2: Resultados obtidos ETE 2.

<b>ETE 2 - (DP-LA-DIG)</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Uni</b>	<b>Sist.1</b>	<b>Sist.2</b>	<b>Sist.3</b>	<b>Sist.4</b>
Energia elétrica produzida	E elétrica (disp)	kWh/dia	-	3.802	3.802	-
Energia térmica produzida	E térmica (disp)	kWh/dia	-	4.211	4.211	-
Potência Instalada CHP	P (chp)	kW	-	173,8	173,8	-
Energia Térmica (requerida) pelo secador térmico	E térmica (req)	kWh/dia	-	9893	10992	-
Energia elétrica (requerida) pelo secador térmico	E elétrica (req)	kWh/dia	-	989,3	934,3	392,2
Energia complementar gás natural	E (gn)	kWh/dia	-	1.483	7.137	-
Consumo diário de gás natural	V (gn)	m³/dia	-	582,75	688,85	-
Massa de lodo transportada	M (lodo)	t/dia	15,22	4,23	4,23	5,07
<b>ETE 2 - ( DP-LA-DIG)</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Uni</b>	<b>Sist.1</b>	<b>Sist.2</b>	<b>Sist.3</b>	<b>Sist.4</b>
Custo total de operação diário	OPEX (total)	R\$/dia	R\$ 2.435,20	R\$ 707,36	R\$ 626,45	R\$ 885,40
Custo total de operação e manutenção ao longo do projeto (VP)	OPEX (total VP)	R\$	R\$ 17.776.960	R\$ 5.163.745	R\$ 4.573.116	R\$ 6.463.389
Investimento secadores térmicos (VP)	CAPEX st	R\$	-	R\$ 4.644.9	R\$ 875.000	R\$ 3.089.488
Investimento total sistema de secagem térmica (VP)	CAPEX total	R\$	-	R\$ 7.712.5	R\$ 3.942.659	R\$ 3.089.488
Custo total	CUSTO TOTAL	R\$	R\$7.776.96	R\$ 12.876.3	R\$ 8.515.775	R\$ 9.552.878
Custo per capita	CUSTO percap	R\$/hab	R\$ 177,77	R\$ 128,76	R\$ 85,16	R\$ 95,53

Fonte: autor.

#### 4.1. Interpretação dos Resultados das Tabelas 4.1 e 4.2

Podemos observar que os Sistemas 2 e 3 fazem o aproveitamento total do potencial energético do gás para secagem térmica, através de sua queima em câmaras de combustão. Essa modalidade possui a vantagem de suprir de forma integral a quantidade de energia térmica necessária para o processo de secagem e tem como principal desvantagem a queima de combustíveis fósseis.

No Sistema 4 foi avaliado apenas o consumo de energia elétrica nos equipamentos de secagem solar, entretanto, é constatado que entre os Sistemas avaliados o sistema solar foi o que apresentou o menor consumo de energia elétrica em relação aos processos usuais de secagem térmica perfazendo uma economia de 47 % na ETE 1 e 60% na ETE 2.

Comparando a avaliação energética da ETE 1 e ETE 2 é possível constatar que a ETE 2 apresenta maiores requisitos energéticos necessários isso se deve ao fato da ETE 2 possuir uma maior quantidade de lodo produzida diariamente e sua modalidade de tratamento de efluentes não incluir o tratamento anaeróbio, que ajudaria a reduzir a quantidade de lodo gerada na estação.

Observamos ainda que o sistema 1 considera apenas o custo com a disposição final de lodo em aterro sanitário na ETE 1 e ETE2. Essa estratégia é mais usual nas estações de tratamento, onde o lodo é levado para disposição final com um alto teor de umidade o que resulta em elevados custos com disposição final em aterros sanitários.

Os sistemas 2 e 3 são aqueles que possuem a maior quantidade de custos operacionais associados, pois necessitaram da compra do gás natural como complemento para o processo de secagem térmica. Entretanto, são as alternativas que apresentaram o menor custo operacional diário, uma vez que é possível essa redução de seus custos de operação com a possibilidade de geração de energia elétrica. Sendo este custo, consequência de não possuírem o ganho financeiro com a produção de energia elétrica. Entretanto, os custos ainda são menores que no Sistema 1, pois a secagem térmica proporcionou uma redução significativa no custo com disposição final de lodo.

A principal desvantagem do sistema 4 é a necessidade de grandes requisitos de área para a secagem, o que inviabiliza sua utilização em estações onde o espaço disponível para o tratamento é reduzido.

#### 4.2. Economia observada no Sistema de Secagem Solar

Tabela 4.3: Indicadores Analisados

Indicador	Simbologia	Unid	Sistema1	Sistema2	Sistema3	Sistema4
Energia elétrica (requerida) pelo secador térmico	E elétrica (req)	kWh/dia	-	758,7	716,5	392,2
Investimento total sistema de secagem Térmica (VP)	CAPEX (total VP)	R\$	-	R\$ 7.712.568	R\$ 3.942.659	R\$ 3.089.488
Custo total de operação e manutenção ao longo do projeto (VP)	OPEX (total VP)	R\$	R\$ 17.776.960	R\$ 5.163.745	R\$ 4.573.116	R\$ 6.463.389

Fonte: autor.

Com base nos dados da tabela 4.3 acima: para o sistema 4 seria gerada uma economia elétrica de 47%, uma economia de 22 % no investimento total do Sistema e um acréscimo de 30% nos custo de operação e manutenção ao longo do projeto em estudo comparativo com os outros sistemas analisados.

## **5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

Através da pesquisa bibliográfica foi possível abordar a temática do tratamento de lodos oriundos de ETE's e associá-lo ao processo de secagem térmica solar, atingindo definições claras e posicionamentos positivos quanto ao emprego da técnica.

A pesquisa bibliográfica foi possível, contudo ainda há pouca diversidade de material, sendo necessária a abordagem de diferentes aspectos do processo para que este possa ser aprimorado.

O processo de secagem de lodo é uma unidade essencial na ETE's para reduzir o volume de lodo e os custos de transporte, mas requer alta energia. A fim de reduzir o custo da energia e emissão de CO<sub>2</sub>, a secagem solar em estufa é uma alternativa que precisa ser complementada com um sistema adicional para atingir altos índices de secagem.

Observamos os seguintes pontos a serem considerados, a necessidade de grandes requisitos de área para a secagem o que inviabiliza sua utilização em estações onde o espaço disponível para o tratamento é reduzido.

Teríamos uma economia elétrica de 47%, uma economia de 22 % no investimento total do Sistema e um acréscimo de 30% nos custos de operação e manutenção ao longo do projeto em estudo comparativo com os outros sistemas analisados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 12.209. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. 2011.

AL-MUZAINI, S. Performance Of Sand Drying Beds For Sludge Dewatering . The Arabian Journal for Science and Engineering. Volume 28, Number 2 B,(2003).

ANDREOLI, CLEVERTON V.; SPERLING, MARCOS VON; FERNANDES, FERNANDO. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: UFMG. 2001.

ANDREOLI, CLEVERSON VITÓRIO (coordenador). Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento. ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_solar/3\\_2.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_2.htm)>. Acesso em: 2 de abril de 2017.

ARITMA ÇAMURLARI Bertaraf Yöntemleri ve İşletme Maliyetleri Remondis Su ve Atık Su Teknolojileri San.ve Tic. A.Ş. from: [http://www.csb.gov.tr/dosyalar/images/file/Deniz%20KURT\\_Aritma%20Camurlari%20Sunum\\_110117%20\(1\).pdf](http://www.csb.gov.tr/dosyalar/images/file/Deniz%20KURT_Aritma%20Camurlari%20Sunum_110117%20(1).pdf) .Acesso em Setembro de 2017.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL (2000). Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)>. Acesso em 01 de junho de 2017.

BENAMOUN, L. Solar drying of wastewater sludge: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 16, Issue 1,2012.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. Programa de Mestrado em Engenharia de Processos – UNIVILLE. Joinville: Ciência & Engenharia,2008.

BUDIHARDJO, I.; MORRISON, G. L.Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. Sidney, Austrália. Solar Energy, vol.83, 2009.

BUX, M.; BBAUMANN, R.; PHILIPP, W; CONRAD, T.; MUHLBAUER, W. Class-A by solar drying recent experiences in Europe. Proceedings of the WEFTEC (Water Environment Federation) Congress , Atlanta, 2001.

CORDEIRO, J.S.; Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coordenador). Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. Projeto PROSAB 2, Rio de Janeiro: ABES, 2001.

DAVID, A. C. Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio. Dissertação de Mestrado em Engenharia. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002.

DAVID, Airton Checoni; TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Secagem térmica de biossólidos na região metropolitana de São Paulo. In: 21º. Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental, João Pessoa. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

DIAS, LUCILENE SILVA. Estudo Prospectivo e Econômico da Substituição do Chuveiro Elétrico pelo Aquecedor Solar na Cidade de Uberlândia – MG. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, 2005.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A.. Solar Engineering of Thermal Processes. Canada: John Wiley & Sohns 4<sup>th</sup> Edition, 2013.

EPA. Innovations In Sludge Drying Beds A Partical Technology, 1987.

FERNANDES, F. ANDREOLI C.V., SPERLING M. V., Biological Wastewater Treatment Sludge Treatment and Disposal. Biological Wastewater Treatment Series, IWA Vol. 6, 2007.

FLAGA, A. Sludge Drying. Institute of Heat Engineering and Air Protection, Cracow University of Technology, ul. Warszawska, Kraków, Poland, 2007.

FRANÇA JUNIOR, Antônio Tavares de. Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2008.

FONDA, KENNETH D., LYNCH, EIAN Going for the Green in Thermal Drying: Evaluation of Innovative New Technologies and Industry Trends. Proceedings of the Water Environment Federation, Residuals and Biosolids, WEF, 2009.

FOUST, A.S.; WENZEL L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. Princípios das operações unitárias. 2<sup>nd</sup>.ed. Trad. Macedo H. e outros, UFRJ, LTC Editora. 1980.

GRANDIN, S.R. – Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

GOLDEMBERG, José; PALETTA, Francisco Carlos. Série energia e sustentabilidade energias renováveis. São Paulo: Blucher. 2012.

HARRINGTON, C Anaerobic Digestion a Tried and True Sustainable Solution.HRGreen, INC. Accessed <http://www.hrgreen.com/Documents/Articles/HRG-Anaerobic Digestion-Harrington.pdf>, 2013.

HII, C., JANGAM, S., ONG, S., MUJUMDAR, A. Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations, 2012.

HOUDKOVÁ, L., BORÁN, J., UCEKAJ, V., ELSÄBER, T., & STEHLÍK, P. Thermal processing of sewage sludge – II. Applied Thermal Engineering , Volume 28, Issue 16, 2008.

HUBER. [www.huber-technology.com.br](http://www.huber-technology.com.br). **Secagem Solar e Regenerativa HUBER SRT**, 2015. Disponível em: <<http://www.hubertechnology.com.br/br/produtos/tratamento-de-lodo/secagem/secagem-solar-e-regenerativa-huber-srt.html>>. Acesso em: Agosto 2017.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. Tratamento de Esgotos Domésticos. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

KALOGIROU, S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Elsevier. 2009.

KRAWCZYK P, BADYDA K. Modeling of thermal and flow processes in a solar waste- water sludge dryer with supplementary heat supply from external sources. Journal of Power Technologies 91 (1),2011.

K. MALHOTRA AND M. OKAZAKI, Contact drying in mechanically agitated granular beds: a review of fundamentals, in Advances in Drying, vol. 5, A.S. Mujumdar, Ed. Washington: Hemisphere Publishing Corporation,1992.

LABEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações). Casa Eficiente: consumo e geração de energia. v. 2. editores: Roberto Lamberts... [et al.]. – Florianópolis : UFSC, 2010.

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. J. Caracterização de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético. Londrina: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011.

LIANGDONG Ma. et al. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. Dalian, China. Building and Environment. Vol. 45, 2010.

LIANG R. et al. Theoretical and experimental investigation of filled-type evacuated tube solar collector with U tube. Dalian, China. Solar Energy. Vol. 85, 2011.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. Campinas-SP: Editora Átomo. 2005.

LINDEMEYER, Ricardo Matsukura. Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Estágio apresentada à disciplina de Estágio Supervisionado – CAD 5236, como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Administração da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LYSEN ERIK H. Pico Solar PV Systems for Remote Homes. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. IEA PVPS Task 9, 2013.

LOBATO, Livia Cristina de Silva. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 2011. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MANCINI, T., G. J. KOLB, AND M. PRAIRIE, Solar Thermal Power, Advances in Solar Energy: An Annual Review, Rio de Janeiro of Research and Development, Vol.11, edited by Karl W. Boer, American Solar Energy Society, Boulder, ISBN 0-89553-254-9, 1997

MAYISKURT, AYŞEGÜLAKSOYF, DILEKSANIN; Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements, THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2015.

MARTINAZZO, Michel. Análise econômica da implantação e utilização de sistemas de aproveitamento de energia solar e de águas pluviais em uma residência unifamiliar. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR - Pato Branco, 2014.

MATHIOUDAKIS, V.L., KAPAGIANNIDIS, A.G., ATHANASOULIA, E., DIAMANTIS, V.I., MELIDIS, P. VE AIVASIDIS, A. Extended Dewatering of Sewage Sludge in Solar Drying Plants. Desalination, Volume 248, 2009.

MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. 4th.ed. McGraw-Hill, 1988.

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th edition. ed. McGraw Hill, New York: METCALF & EDDY Inc, 2003.

MOURÃO, Ronaldo R. de F. Sol e Energia no Terceiro Milênio. Ed. Scipione, São Paulo, 2002.

MOREIRA, JOSÉ ROBERTO SIMÕES. Energias renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. São Paulo-SP: Editora LTC. 2017.

MUJUMDAR, A.S.; YUE, P.L.; CHEN, G. Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. Handbook of Industrial Drying. 3ª ed., CRC Press., 2006.

NEVES, João C. M. das. Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo, na cidade de Cascavel – PR. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2013.

NORTON, B. Anatomy of a solar collector. Refocus, vol. 7, cd. 3, p. 32-35. 2006. Disponível em: [http://www.academia.edu/1306088/Anatomy\\_of\\_a\\_solar\\_collector\\_Developments\\_in\\_Materials\\_Components\\_and\\_Efficiency\\_Improvements\\_in\\_Solar\\_Thermal\\_Collector\\_Systems](http://www.academia.edu/1306088/Anatomy_of_a_solar_collector_Developments_in_Materials_Components_and_Efficiency_Improvements_in_Solar_Thermal_Collector_Systems)>. Acesso em: 2 de maio de 2017.

NUNES, José Alves. Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais. 5ª Ed. Aracajú: Info Graphics Gráfica & Editora Ltda, 2008.

ÖĞLENI, N., ÖZDEMİR, S. Pathogen reduction effects of solar drying and soil. Tubitak Turk J Agric For 34, 2010.

OTEX Solar Sludge Drying <http://www.youtube.com/watch?v=7ys-5GCv9No> (acesso em Abril de 2017).

PACHECO, C.R.F. Fundamentos de Processos de Secagem. Apostila. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1995.

PARK, Kil Jin. Conceitos de Processo e Equipamentos de secagem. Campinas: 2007. 127 p. Disponível em < <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>> acesso em 08 de junho de 2017.

PENEREIRO, J. C.; Melo, L. P.; Coradi T. B. Construção de um aquecedor solar de baixo custo sem cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios. Revista de Ciência & Tecnologia, v. 10, no . 1, 2010.

PEREIRA, Arlindo Jorge Caetano. Análise do custo do ciclo de vida da ETA de Queimadela. 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

PEREIRA, SERGIO LUIZ. Medições e Análise da Secção de Secagem, Publicação Técnica, Albany International, 2009.

PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. Manual de engenharia química. 5ª ed. Trad. Macedo H. e outros, UFRJ, ed. Guanabara Dois. 1973.

PINHEIRO, A. V. Alternativas para destinação final do lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

PRADO, R.T.A. et al. Levantamento do estado da arte: Energia solar. Projeto tecnologias para construção habitacional mais sustentável. São Paulo Projeto FINEP 2386/04. 2007.

RADAIDEH J., BARJENBRUCH M., WRIEGE-BECHTHOLD A. Recovery of renewable energy at wastewater treatment Plants. Proceeding of the 10th International Conference On Environmental Science And Technology. Rhodos Island, Greece, 2011.

RICHTER, Carlos A. Tratamento de lodos de estação de tratamento de água. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

RITTERBUSCH S., BUX M. SOLAR DRYING OF SLUDGE - Recent Experiences in Large Installations. 3<sup>rd</sup> European Conference on Sludge Management, September 6-7, Leon, Spain, 2012.

ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

ROOT, W.L., Indirect drying of solids. Chem Eng., 1983.

SCHARENBERG U.M., PÖPPKE M. Large-scale Solar Sludge Drying in Managua/Nicaragua. Water and Waste, 2010.

SHANAHAN, E. F., ROIKO A., TINDALE N.W., THOMAS M.P., WALPOLE R., KURTBOKE D. I., Evaluation of Pathogen Removal in a Solar Sludge Drying Facility Using Microbial Indicators. International journal of environmental research and public health, vol. 7, issue 2, 2010.

SALIHOĞLU N.K., PINARLI V., SALIHOĞLU G. Solar drying in sludge management in Turkey. Renewable Energy, vol.32, issue 10, 2007.

SANTOS, H. M.; ARRUDA, A. F.; TAVARES, M. G. O.; MOREIRA, R. C. Caracterização de lodo e efluente de ETE e água de rio a partir de avaliação química e ecotoxicológica. Goiânia: Instituto de Química – Universidade Federal de Goiás, 2012.

SANIN, F. D.; CLARKSON, W. W.; VESILIND, P. A. Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges. 1. ed. United States of America, 2010.

SAHNI, E. K., CHAUDHURI, B. Contact drying: a review of experimental and mechanistic modeling approaches. International journal of pharmaceuticals, 2012.  
SEGINER, I., BUX, M. Modeling Solar Drying Rate of Wastewater Sludge. Drying Technology, vol. 24, issue 11, 2006.

SEGINER, I., IOSLOVICH, I., BUX, M. Optimal Control of Solar Sludge Dryers. Drying Technology, vol. 25, issue 2, 2007.

SOUZA, Aloysio.G. et al. Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Disponível em: < <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosabrealifinal.pdf>>. Acesso em: 20 de Julho de 2017.

SOARES, Sérgio R. A.; MATOS, Zanna M. R. de; BERNARDES, Ricardo S. Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.2, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 2001.

SOUZA, Weveton Gesiel de: Pós-secagem natural de lodos de estações de tratamento de água e esgoto s/ W.G, de Souza. – São Paulo, 2012.

SPERLING, M. V.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001

STASTA, P., BORAN, J., BEBAR, L., STEHLIK, P., ORAL, J. Thermal processing of sewage sludge. Applied Thermal Engineering, Vol. 26, Issue 13, 2006.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência. 2003.

TCHOBANOGLOUS, G., BURTON, F. L., STENSEL, H. D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Mc-Graw Hill, 2003.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de Esgotos. 4ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 452 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1) 2014..

WEF - Water Environment Federation; ASCE – American Society of Civil Engineers. Design of municipal wastewater treatment plants. Volume II, WEF Manual of practice n.8, Alexandria, 1992.

## ANEXO - DIMENSIONAMENTO DAS ESTAÇÕES

Tabela 5.1: Características do esgoto e vazão de projeto

Parâmetro	Valor	Observação
População Atendida (hab)	100.000	-
Consumo per capita (l/hab.d)	160	-
Coeficiente de vazão máxima diária ( $k_1$ )	1,2	-
Coeficiente de vazão máxima horária ( $k_2$ )	1,5	-
DBO (Kg/d)	5.400	$Pop \times (54 \text{ g/hab.dia})_i / 1000$
DQO	11.000	$Pop \times (110 \text{ g/hab.dia})_{ii} / 1000$
NTK	1.100	$Pop \times (11 \text{ g/hab.dia})_{iv} / 1000$
P	200	$(Q_{MED} \times 20 \text{ mg/l})_{iv} / 1000$
ST	6.000	$Pop \times (60 \text{ g/hab.dia})_i / 1000$
Qmédia (m³/d)	16.000	$(Pop \times C) / 1000$
Qinfiltração (m³/d)	4.800	Adotado
Qmáxima (m³/d)	28.800	$Q_{esgoto} \times (k_1) \times (k_2)$
Qtotal (m³/d)	33.600	$Q_{máxima} + Q_{infiltração}$
i Conforme NBR 12.209 (ABNT, 1992) ii Conforme VON SPERLING (2012) iii Conforme NBR 9.649 (ABNT, 1986) iv Adotado		

Tabela 5.2 – Parâmetros de projeto – Lodo ativado

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Taxa de transferência de oxigênio específica p/ demanda carbonácea $t_{toC}$	kgO <sub>2</sub> /kgDBO <sub>5</sub>	0,80	(1)
Taxa de transferência de oxigênio específica p/ demanda nitrogenada $t_{toN}$	kgO <sub>2</sub> /kgNTK	4,30	(1)
Coeficiente estequiométrico para desnitrificação $t_{toD}$	kgO <sub>2</sub> /kgNTK	2,86	(1)
(1) Von Sperling (2012)			



Tabela 5.3 – Parâmetros de projeto – Lodo ativado

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Carga DBO	Kg/d	1.890	-
Carga Sólidos Suspensos	Kg/d	939	-
Carga NTK	Kg/d	990	-
Coeficiente de produção celular Y	gSSV/gDBO5removida	0,60	(1)
Idade de Lodo $\theta_c$	d	10	(1)
Concentração de sólidos suspensos voláteis $X_v$	mg/l	1.500	(1)
Coeficiente de respiração endógena $K_d$	d <sup>-1</sup>	0,08	(1)
Fracção biodegradável $f_b$	mgSSVb/mgSSV	0,70	(1)
Produção de lodo secundário $P_{x,ex}$	kgSS/kgDBO5removida	0,70	(1)
(1) Von Sperling (2012)			

Tabela 5.4 – Parâmetros do decantador primário

Parâmetro	Unidade	Valor
Taxa de aplicação hidráulica TAH para $Q_{med}$	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	90
Produção específica de lodo primário	kgSS/kgDQOaplicada	0,30
Eficiência de remoção de DBO5	%	30
Eficiência de remoção de sólidos suspensos	%	55
Eficiência de remoção de NTK	%	10

Tabela 5.5 – Parâmetros de projeto - Tanque de aeração após decantador primário

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte
Carga DBO	Kg/d	3.780	-
Carga Sólidos Suspensos	Kg/d	2.700	-
Carga NTK	Kg/d	990	-
Coeficiente de produção celular Y	gSSV/gDBO5removida	0,60	(1)
Idade de Lodo $\theta_c$	d	10	(1)
Concentração de sólidos suspensos voláteis $X_v$	mg/l	2.250	(1)
Coeficiente de respiração endógena $K_d$	d <sup>-1</sup>	0,08	(1)
Fracção biodegradável $f_b$	mgSSVb/mgSSV	0,70	(1)
Produção de lodo secundário $P_{x,ex}$	kgSS/kgDBO5removida	0,70	(1)
(1) Von Sperling (2012)			

Tabela 5.6 – Parâmetros para os decantadores secundários - Tanque de Aeração após UASB

Parâmetro	Unidade	Valor
TAH	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	30
TAS	$\text{kgSS}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	120
Amin,TAS	$\text{m}^2$	533
Amin,TAH	$\text{m}^2$	720
Numero de decantadores secundários	-	2
Diâmetro mínimo	m	21,41
Diâmetro adotado	m	21,50
Altura parte cilíndrica	m	3,50
Declividade do fundo	%	8
Volume total	$\text{m}^3$	2.758,17
Volume parcial	$\text{m}^3$	1.379,09