

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**THADEU BERNAL SOTO  
VITOR RIBEIRO ORRICO**

## **ANÁLISE TÉRMICA DE UM SECADOR DE LODOS**

**VITÓRIA  
2009**

**THADEU BERNAL SOTO  
VITOR RIBEIRO ORRICO**

## **ANÁLISE TÉRMICA DE UM SECADOR DE LODOS**

Projeto de Graduação  
apresentado ao Departamento  
de Engenharia Mecânica do  
Centro Tecnológico da  
Universidade Federal do  
Espírito Santo, como requisito  
parcial para obtenção do grau  
de Engenheiro Mecânico.  
Orientador: Prof. Rogério  
Silveira de Queiroz, Dr.

**VITÓRIA  
2009**

**THADEU BERNAL SOTO  
VITOR RIBEIRO ORRICO**

## **ANÁLISE TÉRMICA DE UM SECADOR DE LODOS**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em \_\_ de \_\_\_\_\_ de 2009.

### **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiróz.**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Juan Sérgio Romero Saenz**  
**Examinador**

Agradecemos ao Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiróz pela cooperação e envolvimento com o projeto, assim como sua disponibilidade e paciência com nossos erros.

Aos profissionais da Sanevix Engenharia José Mauro Pegoretti, Vitor Pegoretti, Zenildo Nascimento, José Carlos Butke e Kaio Brahim por idealizar o projeto e por ceder tempo e material para a realização do experimento.

As nossas famílias pela paciência e por confiar em nós nessa caminhada tão importante para o nosso futuro como engenheiros.

## RESUMO

O trabalho ora apresentado aborda o problema de dimensionar as características básicas de um secador de lodo, proveniente de estações de tratamento de esgoto doméstico, usando como fonte de energia o biogás produzido na própria estação.

A análise termodinâmica de um modelo de secador por esteira em translação foi realizada com o intuito de dimensionar a possibilidade de uso de ar falso, misturado aos produtos da combustão do biogás como controle da temperatura necessária à secagem, sem riscos de explosão.

A produção de gás típica de uma estação de tratamento de esgoto de 106.790 toneladas por mês mostrou-se suficiente para o propósito de secagem segura.

Durante o projeto, a falta de propriedades termodinâmicas, de dados sobre o fenômeno de secagem e de parâmetros mais generalizados de modelagem tornaram complexa a tarefa de dimensionamento de vazões.

Sugere-se uma linha de trabalhos futuros que possa sistematizar propriedades, gerar informações mais genéricas e elaborar modelos com mais variáveis e menos parâmetros que os encontrados na literatura, além do uso de soluções numéricas transientes e em regime permanente.

## **ABSTRACT**

The work herein presented is an approach to the problem of how to design the basic characteristics of an equipment to heat and dry sludge from an treatment station, using biogas produced at the station as the source of energy.

The thermodynamic analysis of a drier model that uses a conveyor in translation motion was performed aiming the design to make possible the use of false air mixed to biogas combustion products as the controller of the temperature necessary to the drying process, without explosion risks.

The typical gas production from a sludge treatment station around 106,790 tons a month was shown to be sufficient for the purpose of safe drying process.

During the project the lack of thermodynamic properties data about the drying phenomenon and the lack of more generalized modeling parameters make the design of flows a complex task.

It is suggested that some future works could be done to systematize properties, to generate more generic information and to elaborate models fed by more variables than parameters that those found in literature and to use numerical solutions for transient and steady-state drying problems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condições constantes de Secagem.....	19
Figura 2 - Variação da umidade de um sólido com o tempo de secagem.....	20
Figura 3 - Velocidade de secagem em função do tempo. ....	20
Figura 4 – Esquema de um sistema de secagem térmica.....	14
Figura 5 – Desenho representativo do adensador por gravidade.....	16
Figura 6 – Representação do Leito de Secagem. ....	17
Figura 7 – Centrífuga para desidratação de lodos. ....	18
Figura 8 - Esquema típico de um filtro-prensa de esteira.....	19
Figura 9 – Desenho esquemático de um filtro-prensa de placas.....	20
Figura 10 – Secagem direta. ....	23
Figura 11 – Secagem indireta. ....	24
Figura 12 - Classificação de secadores de acordo com a operação.....	26
Figura 13 – Secador rotativo. ....	28
Figura 14 – Detalhe de um secador rotativo.....	29
Figura 15 – Secador transportador de esteiras de fluxo cruzado.....	30
Figura 16 – Secador a transporte pneumático “flash dryer”. ....	31
Figura 17 - Fluxograma de cálculos. ....	34
Figura 18 - Caixa retangular de fibra de vidro, coberta com isopor.....	42
Figura 19 - Ventilador aquecedor.....	42
Figura 20 - Termômetro da entrada do secador.....	43
Figura 21 - Termômetro colocado no lodo.....	43
Figura 22 - Termohigrometro da saída do secador. ....	44
Figura 23 - Bandeja de aço carbono coberta de lodo.....	44
Figura 24 - Vista interna do secador. ....	46

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1 Geral .....	3
2.2 Específicos .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Tratamento de Esgoto .....	4
3.1.1 Pré-tratamento .....	4
3.1.2 Tratamento Primário .....	5
3.1.3 Tratamento Secundário .....	6
3.1.4 Tratamento Terciário .....	6
3.1.5 Desinfecção .....	7
3.2 Secagem Térmica .....	7
3.2.1 Terminologia .....	7
3.2.2 Umidade do Sólido .....	9
3.2.3 Secagem com condições constantes .....	9
3.3 Sistema de Secagem .....	13
3.3.1 Consumo de combustível .....	15
3.3.2 Desidratação do lodo .....	15
3.3.2.1 Adensamento por gravidade .....	16
3.3.2.2 Adensamento por flotação .....	25
3.3.2.3 Leito de secagem .....	17
3.3.2.4 Centrífugas .....	18
3.3.2.5 Filtros-prensa de esteira .....	18
3.3.2.6 Filtros-prensa de placas .....	20
3.4 Transferência de calor .....	21
3.4.1 Classificação quanto ao modo de transferência de calor .....	31
3.4.1.1 Secadores diretos .....	31
3.4.1.2 Secadores indiretos .....	23
3.4.1.3 Secadores por radiação .....	24
3.4.1.4 Secadores mistos .....	25
3.4.2 Classificação quanto à operação .....	25
3.5 Secadores Térmicos .....	27
3.5.1 Tipos de secadores .....	27
3.5.1.1 Secador rotativo .....	27
3.5.1.2 Secador transportador de esteira .....	29
3.5.1.3 Secador pulverizador “spray-dryer” .....	30



3.5.1.4 Secador a transporte pneumático “flash-dryer” .....	30
3.6 Biossólido.....	31
4. METODOLOGIA.....	34
4.1 Experimento .....	41
4.1.1 Descrição dos materiais.....	41
4.1.2 Descrição do experimento .....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS.....	50
7. REFERÊNCIAS.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento de resíduos tóxicos provenientes de residências ou de atividades industriais vem ganhando importância fundamental nos projetos de desenvolvimento acompanhado de responsabilidade ambiental, o chamado desenvolvimento sustentável, realizado pelas grandes cidades. Com o aumento populacional, a quantidade de resíduos vem aumentando e o problema se amplifica. Sendo assim, a adoção de processos de tratamento de esgoto e de consequentes estudos para se encontrar um local apropriado para a destinação final do material efluente se torna essencial.

Nesse âmbito, a atividade de secagem térmica, aliada ao processo de tratamento de esgoto e a uma atividade de pré-secagem do lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) apresenta considerável crescimento. Nesse processo, além de se conseguir aproveitar a energia proveniente do biogás produzido nas ETEs, é possível utilizar o produto final na saída dos secadores, o lodo higienizado conhecido como biossólido, para atividades ligadas a agricultura e outros fins.

O Brasil ainda é um país que precisa evoluir muito no que diz respeito ao aproveitamento e a destinação final do lodo de esgoto. Com uma grande produção diária de esgoto e com uma agricultura de alto potencial, é fácil entender o interesse que a secagem térmica apresenta para o país. O desenvolvimento da tecnologia necessária e sua aplicação é o principal problema encontrado pelas grandes empresas para a implantação dos secadores, assim como a maioria dos equipamentos de alta tecnologia encontrados no mercado mundial.

Outro problema de vital importância é o elevado custo de implantação dos equipamentos necessários para a realização do processo de secagem. O equipamento utilizado no processo de secagem térmica, o secador propriamente dito, é o que possui o custo mais elevado. No entanto, com a realização de projetos por diferentes empresas, o contínuo processo de melhorias e a concorrência entre produtos, os custos tendem a diminuir, como acontece com qualquer nova tecnologia que surge na indústria.

Portanto, o contínuo desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas a esse processo, e a outros que possam surgir, é chave no projeto ambiental das grandes cidades, cada vez mais inseridas em um cenário onde não se podem desperdiçar os recursos de maneira predatória, além de ser necessário prestar atenção ao destino final que eles terão.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Realizar a análise térmica do processo de secagem de um secador de lodos do tipo esteira com fluxo paralelo empregado no tratamento de esgoto realizado nas ETEs.

### 2.2 Específicos

Foi estabelecido como objetivos específicos:

- a) Levantar dados bibliográficos sobre os métodos de tratamento de esgoto, modos de desidratação e secagem térmica de lodos existentes;
- b) Calcular a mistura ar-combustível para a ocorrência da combustão e a quantidade de ar a ser injetada a fim de reduzir sua temperatura até um valor pré-determinado;
- c) Calcular a potência do ventilador necessário para o insuflamento do ar na câmara de secagem;
- d) Levantar o coeficiente de transferência de calor por convecção através de um experimento;
- e) Calcular a disponibilidade energética do sistema.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Tratamento de Esgoto

O tratamento de esgoto é hoje necessário dado o desenvolvimento das grandes cidades. Com os problemas ambientais cada vez maiores, é preciso cuidar do esgoto produzido, para que as cidades possam obter um melhor nível de qualidade de vida e também a saúde da população seja preservada.

São poucos os grandes centros urbanos no país que possuem uma grande quantidade de seu esgoto tratada, acontecendo casos do esgoto ser lançado a céu aberto e até algumas vezes em rios e praias. Isso afeta todos os setores da população, além de afetar também o ecossistema natural. Para eliminar tais efeitos, é preciso seguir um tratamento bem definido, constituído de várias etapas que serão agora definidas.

##### 3.1.1 Pré-tratamento

Essa etapa antecede ao tratamento do esgoto propriamente dito. Nela, ocorre a retirada de sólidos grosseiros, que podem entupir as tubulações e as bombas das estações de tratamento (ETE). Dependendo de cada estação, os constituintes do pré-tratamento podem variar, mas os mais comuns encontrados são:

- Gradeamento: Retira os sólidos grosseiros, ou seja, de grandes diâmetros;
- Caixa de areia: A sedimentação da areia faz com que esse tipo de sólido afunde nessa caixa, enquanto os sólidos de sedimentação mais lenta continuam o caminho do pré-tratamento. Evita o desgaste abrasivo das tubulações;
- Caixa de gordura: Ajuda a retirar um pouco da gordura presente no esgoto afluente, o que agiliza o processo de remoção de matéria orgânica do esgoto. Nem sempre está presente no pré-tratamento.

### 3.1.2 Tratamento Primário

A partir desta etapa, o tratamento propriamente dito do esgoto tem início. Agora o esgoto, bombeado nas Estações Elevatórias de Esgoto (EEE), chega às ETEs. Nessa primeira etapa, é retirada até 70% da matéria orgânica existente no esgoto, indicada pela DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio). Os constituintes dessa etapa são grandes tanques, onde existe a presença de bactérias que irão digerir o esgoto. Nessa fase, normalmente existe a utilização de bactérias anaeróbias, ou seja, que sobrevivem em ambientes sem oxigênio.

Com a passagem do esgoto, as bactérias trabalham e digerem o esgoto continuamente, formando uma camada líquida, conhecida como lodo primário. Esse lodo costuma ser descartado mensalmente, e o seu destino vem se tornando uma das maiores fontes de pesquisa atualmente no trabalho com estações de tratamento de esgoto. Os vários tipos de aproveitamento para ele serão discutidos mais à frente.

Os principais tipos de tanques presentes nos processos atuais para a etapa de tratamento primário são o RAC (Reator anaeróbio compartimentado), o decantador primário ou o UASB (**Upflow Anaerobic Sludge Blanket** ou Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente), sendo que existe apenas um desses em cada estação.

O UASB tem sido o tipo de tanque mais utilizado atualmente, devido à sua eficiência. Nele é possível separar as três fases do esgoto, com tubulações que ligam o esgoto líquido à próxima etapa, câmaras de gás ascendentes, que eliminam a fase gasosa, e obstáculos colocados próximos à câmara de gás, onde uma boa quantidade de sólidos que não se sedimentou no tanque fica retida.

### 3.1.3 Tratamento Secundário

Após a passagem do esgoto pelo tratamento primário, ocorre o tratamento secundário. Nele se processa a remoção de sólidos que não são sedimentáveis e também de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo. Atualmente, a maioria das ETEs tem contado com equipamentos que retirem o nitrogênio presente no esgoto, já que se trata de um nutriente que ligado na forma de amônia ou nitratos é bastante prejudicial. Esses compostos de nitrogênio passam por um tratamento onde são reduzidos a nitrogênio gasoso, que é inerte, e então é liberado na atmosfera.

Biofiltros e decantadores secundários são os principais equipamentos presentes nesse tratamento. Os biofiltros são compostos por materiais onde a matéria orgânica fica aderida ao subir, funcionando exatamente como um filtro. Alguns exemplos desses materiais são mangueiras corrugadas e tubetes.

O tratamento secundário permite a remoção de 90% da matéria orgânica presente no esgoto. Existe nele a formação do lodo secundário, devido a presença de bactérias aeróbicas, ou seja, que precisam de oxigênio para viver. Esse lodo secundário pode ser recirculado pela EEE para os reatores anaeróbicos, para suprirem uma eventual falta de lodo.

### 3.1.4 Tratamento Terciário

Nem sempre presente nas estações, consiste na eliminação adicional de poluentes tóxicos ou eliminação adicional de poluentes não degradados no tratamento secundário.

### 3.1.5 Desinfecção

A maior parte da demanda bioquímica orgânica já foi retirada nas outras etapas, no entanto essa etapa pode aumentar ainda mais a eficiência do processo de tratamento de esgoto, podendo chegar até 99% de retirada de DBO. Um equipamento muito utilizado atualmente nessa etapa é o Ultravioleta (UV). Lâmpadas de raios ultravioletas são colocadas dentro de tubos de quartzo, com alta resistência térmica, e essas lâmpadas são encaixadas de dentro de uma caixa construída em aço inoxidável. Com a passagem do esgoto, dentro da caixa, a luminosidade emitida pela lâmpada de UV acaba por matar os microorganismos que ainda restavam no esgoto. No entanto, devido a sua alta eficiência, é um equipamento muito caro e nem sempre sua utilização é possível.

## 3.2 Secagem Térmica

É a operação destinada à remoção de um líquido agregado a um sólido, em um meio gasoso insaturado através da vaporização térmica. A vaporização ocorre em uma temperatura inferior à temperatura de ebulição do líquido na pressão do sistema.

O meio gasoso, ou meio de secagem, pode ser o ar, gases de combustão, ou até uma composição deles. O material sólido a ser secado pode ser um material de forma definida, ou pastoso ou ainda uma suspensão de sólidos. Vale ressaltar que o produto final será um material sólido com alguma umidade, ou seja, não é possível a retirada total do líquido presente.

Os métodos conhecidos como mecânicos, tais como filtragem, prensagem ou centrifugação, são considerados processos de desaguamento ou pré-secagem. O termo secagem deve ser utilizado para processos que retirem o líquido do sólido pelo processo de vaporização.

### 3.2.1 Terminologia

Os termos mais utilizados no processo de secagem térmica são os seguintes:



Umidade Absoluta ( $\omega$ ): É a massa de vapor de água contida no ar que está associada ao ar seco. Em outras palavras, é a massa de vapor de água contida em determinada massa de ar seco. Uma maneira de se encontrar esse dado é a utilização das cartas psicrométricas, onde com valores de duas variáveis de estado, é possível encontrar o valor da umidade absoluta.

Umidade Relativa ( $\phi$ ): Consiste na pressão parcial de vapor de água no ar dividida pela pressão de saturação do vapor de água na temperatura do ar.

Ponto de Orvalho ( $P_o$ ): Pode também ser chamado de temperatura de saturação, ou seja, é a temperatura na qual uma mistura de vapor de água e ar se torna saturada.

Temperatura de Bulbo úmido ( $T_u$ ): É a temperatura de um termômetro colocado em meio líquido, onde o seu bulbo normalmente é coberto por uma gaze e fica em contato com a água. Essa temperatura é sempre menor que a temperatura do ambiente.

Temperatura de Bulbo Seco ( $T$ ): É a temperatura da mistura ar-vapor.

Água ligada: Água associada ao sólido, onde a pressão de vapor é menor que a pressão da água pura na mesma temperatura. As ligações internas nela são muito fortes, portanto com os processos de desaguamento mecânicos não é possível sua retirada. Sendo assim, é necessária a utilização do processo de secagem para conseguir quebrar essas ligações. Naturalmente, quanto maior for a quantidade de água a ser retirada, uma maior quantidade de energia deverá ser despendida.

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

Umidade livre: Pode ser retirada do sólido na condição de umidade relativa do ambiente onde ele se encontra

Difusão interna: Consiste no movimento do líquido ou de vapor de água em um sólido, devido à diferença de concentração entre eles.

### 3.2.2 Umidade do Sólido

A umidade de um sólido diz respeito à quantidade de água nele presente, tanto na forma ligada ou livre. É expressa em quantidade total (base úmida) ou em quantidade em sólido seco (base seca).

A umidade de um sólido em base seca é representada pela equação 1:

$$\omega_d = M_a/M_d \quad (1)$$

Onde  $\omega_d$  é a umidade do sólido em base seca,  $M_a$  é a quantidade de água que ele possui e  $M_d$  é a quantidade seca desse sólido.

Já a umidade de um sólido em base úmida é representada pela equação 2:

$$\omega_w = M_a/(M_a + M_d) \quad (2)$$

Onde  $\omega_w$  é a umidade do sólido em base úmida.

### 3.2.3 Secagem com condições constantes

A secagem deve ocorrer com temperaturas do meio de secagem mais altas do que as do sólido a ser seco.

Observa-se que a umidade e a temperatura dentro dos secadores variam normalmente, com o passar do tempo de operação. Mas, para se estudar o processo de secagem, deve-se considerar que a temperatura e a umidade do meio gasoso permanecem constantes com o tempo. A seguir, tem-se a figura 1, que é representativa das condições atuantes no processo de secagem.

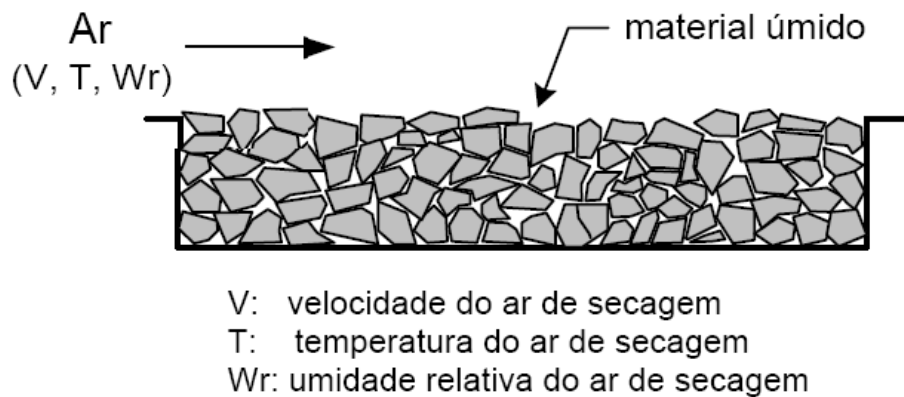


Figura 1 - Condições constantes de Secagem.  
Fonte: DAVID (2002)

Nessa figura, o sólido perde calor apenas pela superfície superior, com as paredes e a superfície inferior sendo isoladas. Com o conhecimento da umidade livre inicial do sólido e da temperatura ambiente, se dá início ao processo. A partir desse instante, várias medições são realizadas, com a variação da massa e do tempo, construindo-se uma tabela com diferentes valores de temperatura, velocidade e umidade do meio de secagem para esses parâmetros.

Uma curva importante a ser verificada no processo de secagem é a variação da umidade do sólido com o tempo do processo. Um exemplo dessa curva pode ser verificado na figura 2. Fica claro que a umidade do sólido diminui rapidamente em um primeiro instante, passando por um momento de decréscimo constante, até chegar ao último momento, onde o seu decréscimo é bem lento, pois quanto menos umidade existir no sólido, mais difícil será para se desumidificar o material.

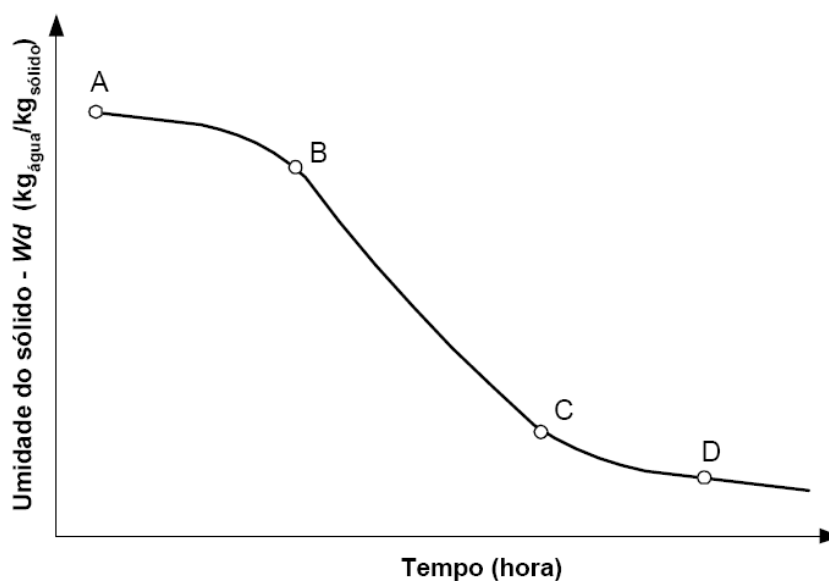


Figura 2 - Variação da umidade de um sólido com o tempo de secagem.  
Fonte: DAVID (2002)

Com os dados do gráfico da umidade, pode-se construir o gráfico da velocidade em função do tempo de secagem. Pode-se inferir da curva acima que a velocidade inicial é alta, passando por um período onde ela se torna constante, até chegar ao momento onde ela diminui. A figura 3 é um exemplo dessa curva.

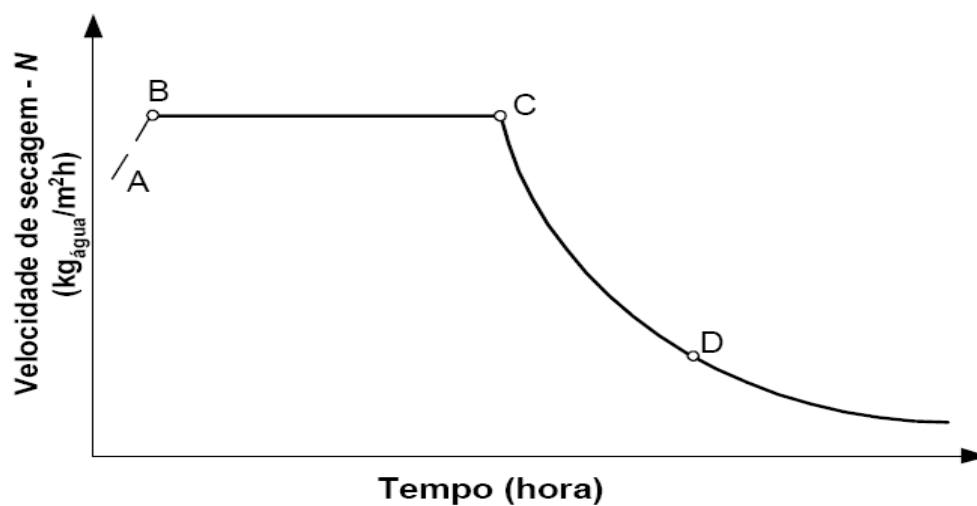


Figura 3 - Velocidade de secagem em função do tempo.  
Fonte: DAVID (2002)

O primeiro período da figura 2 não é considerado um processo de secagem. Nele, o material apenas está ganhando calor com a passagem de ar aquecido, até que entre

em regime permanente. Nesse período, que é bastante curto, pouquíssima umidade é retirada do material.

O período de secagem no qual a velocidade é constante é de suma importância na avaliação geral do processo. De acordo com FOUST (1980, apud DAVID, 2002, p.38), após o contato do sólido úmido com o meio de secagem, a temperatura do sólido se ajusta até atingir o regime permanente, resultando na velocidade constante de secagem.

A temperatura da superfície do sólido é igual a temperatura de bulbo úmido do meio de secagem. Já a temperatura no interior do sólido é diferente, devido a diferença do movimento da massa e do calor. Quando essa temperatura se iguala a temperatura de bulbo úmido do meio de secagem, a taxa de secagem se torna constante.

Nesse período, a velocidade de secagem depende de três fatores conforme Perry (1973, apud DAVID, 2002, p.39):

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

O ponto onde a velocidade de secagem deixa de ser constante corresponde ao ponto de umidade crítica, onde não existe mais um filme contínuo de água cobrindo a superfície.

O período de secagem decrescente costuma ser muito mais demorado que o de secagem constante, porém, com uma retirada de líquidos muito menor. Isso ocorre devido a dificuldade crescente de se secar o sólido a medida que ele se aproxima da umidade de equilíbrio com o ambiente. A velocidade de secagem desse período é determinada pelas condições internas do material, devendo-se controlar as condições externas para que não alterem as características do material.

Com o prosseguimento da secagem, a água deixa de ser continua, estado esse conhecido como Pendular. Nessa fase, a passagem de ar pelo sólido não vaporizará mais líquido, e sim a passagem de calor por condução pela superfície do material.

Apesar de todas essas considerações sobre o processo de secagem, na maioria das vezes em atividades industriais, as condições de temperatura e umidade não são constantes ponto a ponto. No entanto, em cada ponto durante o tempo, elas podem ser consideradas constantes, conforme PACHECO (1995, apud DAVID, 2002, p.41).

Outras dificuldades encontradas para a escolha de um secador, além da dificuldade em prever sua curva de velocidade e as variações das condições de secagem, são a diferença entre a área de transferência térmica e a de transferência de massa e a configuração do escoamento do gás, de acordo com (FROUST, 1980, apud DAVID, 2002, p.42).

Então, para se ter uma melhor eficiência no uso de um secador térmico, é necessário se construir um modelo em escala industrial, simulando as condições de escala produtiva. Vale destacar os principais parâmetros de avaliação da eficiência de um secador térmico, quais sejam (PERRY, 1973, apud DAVID, 2002, p.42):

- Teor de umidade do sólido na entrada e na saída;
- Temperatura de entrada e saída do gás;
- Temperatura do material na entrada e na saída;
- Taxa de alimentação;
- Velocidade do gás;
- Tempo de detenção no secador;
- Consumo de combustível.

### 3.3 Sistema de Secagem

Um sistema de secagem é composto por vários equipamentos. Além do secador, existem também o silo de armazenamento de lodo desidratado, o queimado de combustível, condensador, sistema de controle de odores, etc..

As temperaturas envolvidas em um sistema de secagem podem variar bastante, dependem do processo de secagem utilizado e do tipo de secador empregado. Usualmente o ar quente entra no secador na faixa de 400 a 450 °C e sai na faixa de

90 a 150°C e o lodo deixa o secador na faixa de 70 a 100°C (WEF, 1992, apud David, 2002, p.50).

A figura 4 mostra um esquema de um sistema de secagem térmica de lodo para produção de biossólido, utilizado na agricultura.

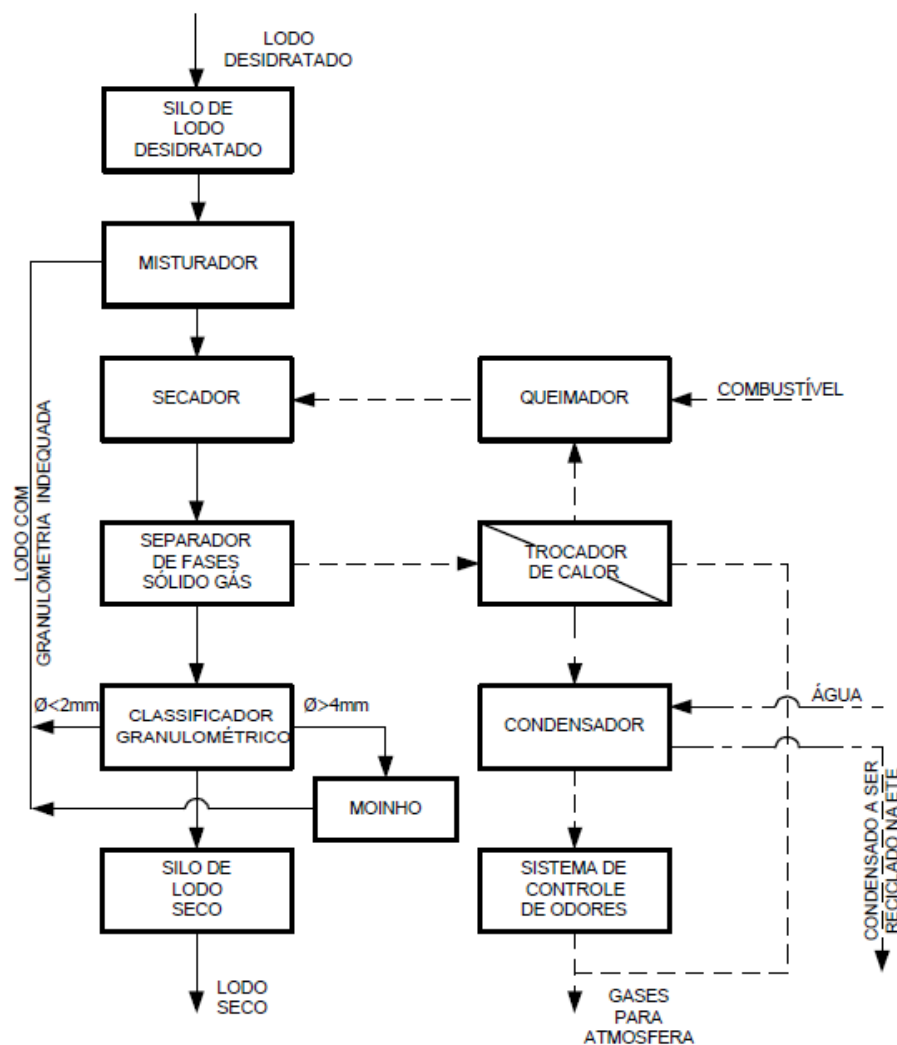


Figura 4 – Esquema de um sistema de secagem térmica.  
Fonte: CEEJ (apud DAVID 2002).

### 3.3.1 Consumo de combustível

A geração do calor para a secagem do lodo é produzida pela da queima do combustível, que pode ser: biogás, gás natural, óleo combustível, ou até mesmo uma combinação deles. A quantidade de energia necessária para o processo de secagem depende de vários fatores como a umidades de entrada e a de saída do lodo no processo, a eficiência térmica do equipamento e o tipo e características do equipamento utilizado.

De um modo geral, segundo informações de fabricantes de secadores, a quantidade de energia necessária para evaporar a água contida no lodo é da ordem de 800 a 1000 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 (DAVID, 2002, p.47).

### 3.3.2 Desidratação do lodo

A desidratação do lodo é a etapa que antecede o processo de secagem propriamente dito e seu objetivo é reduzir o volume de água no lodo para:

- Facilitar manuseio;
- Reduzir o volume para os processos posteriores;
- Reduzir o custo de transporte;
- Reduzir o uso de energia para secagem ou incineração;
- Reduzir a produção de chorume nos aterros sanitários.

Na atualidade, existem diversas técnicas para a realização desses processos, algumas usam a própria evaporação da água e outras utilizam energia externa através de dispositivos mecânicos para diminuir o tempo de processo, dentre eles: a filtração, a centrifugação, a compactação e a compressão (DAVID, 2002, p.14).

A escolha do dispositivo correto varia de acordo com o tamanho da estação de tratamento. Pequenas estações geralmente utilizam leitos ou lagoas de secagem e grandes estações utilizam os dispositivos mecânicos justamente para diminuir o tempo de processo, podendo aumentar a capacidade de desidratação de lodo.



Os principais processos utilizados para o adensamento e desidratação natural ou mecânica são:

- Adensamento por Gravidade;
- Adensamento por Flotação;
- Leitos de Secagem;
- Centrífugas;
- Filtros-Prensa de Esteiras;
- Filtros-Prensa de Placas.

### 3.3.2.1 Adensamento por gravidade

Nesta etapa, o lodo entra através de um poço central do tanque situado em sua parte superior. Após a entrada, o lodo sofre processos de sedimentação e compactação. Este processo pode aumentar, por exemplo, o teor de sólidos no lodo descartado de 1% para 5%. A figura 5 mostra um desenho representativo de um adensador por gravidade.

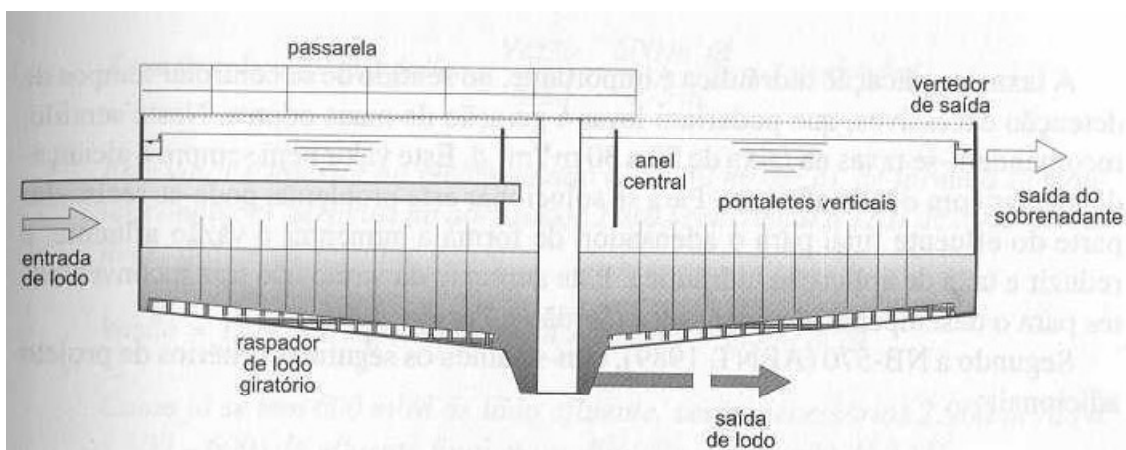


Figura 5 – Desenho representativo do adensador por gravidade.  
Fonte: Andreoli et al.(apud FERREIRA & NISHIYAMA, 2003).

### 3.3.2.2 Adensamento por flotação

O adensamento por flotação

[...] é uma operação unitária para separar as partículas sólidas da fase líquida. A separação é obtida através da introdução de micro-bolhas de ar que ao entrarem em contato com as partículas do lodo, flotam, devido à diminuição de sua densidade e ao empuxo resultante. Com isso, é formado um manto na superfície do tanque, obtendo-se, assim, um efluente

clarificado abaixo desta camada (TSUTIYA et al., 2002, apud FERREIRA & NISHIYAMA, 2003, p. 3).

### 3.3.2.3 Leito de secagem

O leito de secagem é uma das técnicas mais antigas que existem e consiste basicamente num tanque retangular, com paredes de alvenaria e fundo inclinado, de concreto. O interior do tanque é coberto por tijolos maciços, a chamada camada-suporte. Abaixo dela há uma camada de areia e brita de diferentes granulometrias e por fim, abaixo da camada de areia, há o sistema de drenagem, que escoar a água do lodo (ANDREOLI et al., apud FERREIRA & NISHIYAMA, 2003, p. 3).

A figura 6 mostra uma representação esquemática de um leito de secagem.

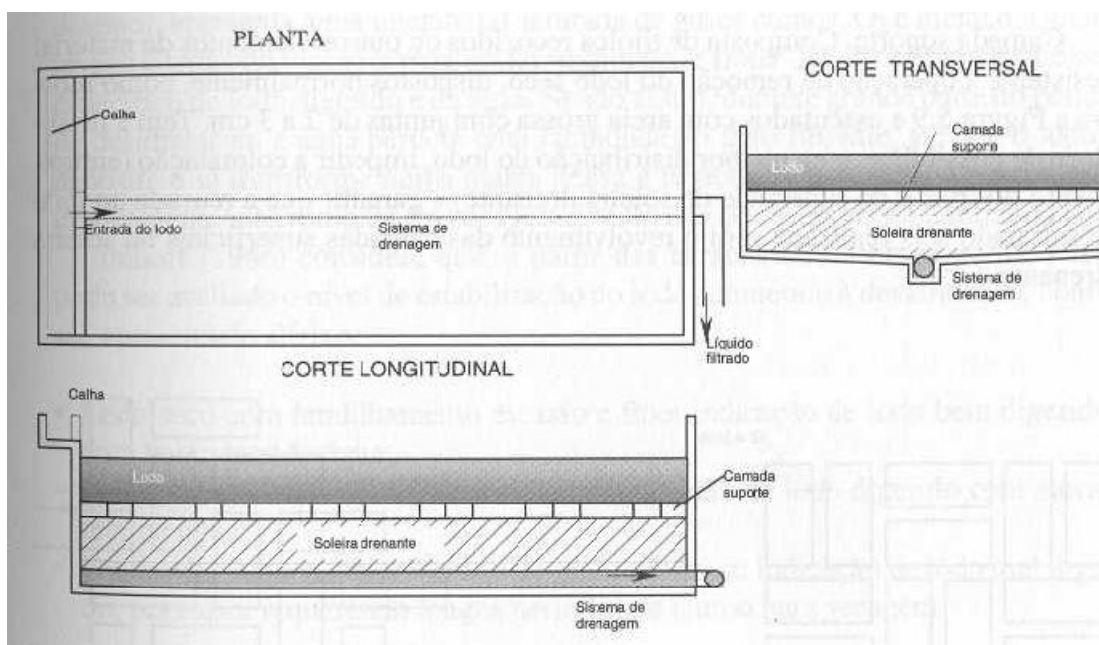


Figura 6 – Representação do Leito de Secagem.

Fonte: Andreoli et al.(apud FERREIRA & NISHIYAMA, 2003).

### 3.3.2.4 Centrífugas

A desidratação por centrífuga é um processo similar ao adensamento por gravidade, porém com uma grande diferença que é a aplicação de uma força centrífuga à mistura, o que acelera o processo.

A separação das fases sólida e líquida é feita por um tambor cilíndrico que gira a altas velocidades, depositando a fase sólida nas paredes internas. A retirada desse material é feita por um raspador em forma de rosca.

Segundo a WEF (1992, apud DAVID, 2002, p. 15), concentrações de sólidos de 30 a 35% têm sido alcançadas com a utilização de centrífugas. A figura 7 mostra esquematicamente uma centrífuga.

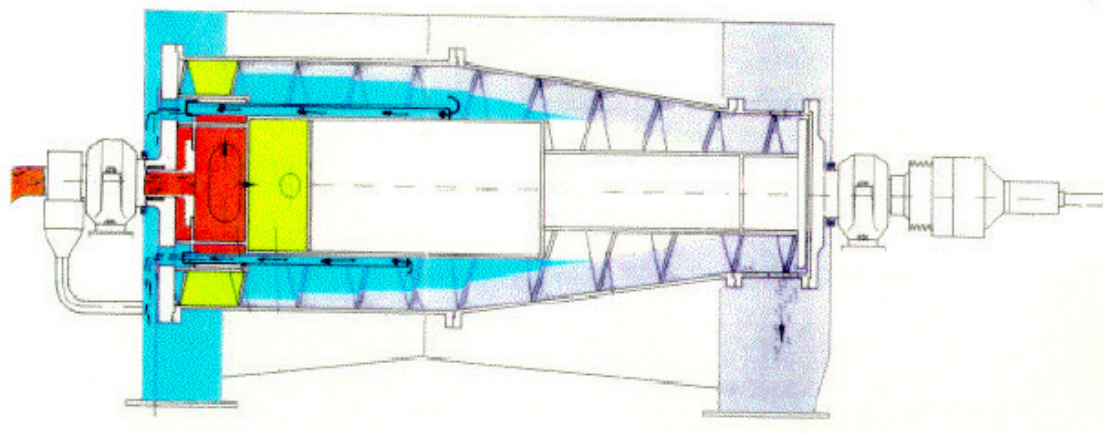


Figura 7 – Centrífuga para desidratação de lodos.  
Fonte Catálogo da Alfa Laval (apud DAVID 2002).

### 3.3.2.5 Filtros-prensa de esteira

O filtro-prensa de esteira é um dispositivo para desidratação mecânica de lodos de operação contínua, que combina a drenagem por gravidade com compressão mecânica (DAVID, 2002, p. 15).

O processo de desidratação pode ser dividido em três processos básicos:

- Condicionamento químico;
- Drenagem por ação da gravidade;
- Compactação mecânica.

O condicionamento químico consiste em adicionar um polímero que ocasionará a floculação do lodo antes da alimentação da máquina. Em seguida, o lodo é depositado em uma esteira porosa onde perde grande parte da água livre até atingir uma consistência mais viscosa. Na parte da compactação mecânica, o lodo adensado é introduzido entre duas esteiras porosas que se movimentam em uma série de rolos onde é prensado progressivamente (DAVID, 2002, p.16).

O filtro-prensa de esteira tem como vantagens o baixo custo de energia elétrica e baixo valor na aquisição, porém as desvantagens dele são o elevado nível de ruído e o grande número de rolamentos (geralmente entre 40 a 50), o que requer um bom controle na manutenção do equipamento (FERREIRA & NISHIYAMA, 2003, p. 6).

Dependendo da concentração inicial de sólidos secos e da origem do lodo, com o uso de um filtro-prensa de esteira pode-se obter um lodo desidratado com umidade de 15 a 60% no final do processo. A figura 8 mostra um esquema típico de um filtro-prensa de esteira.

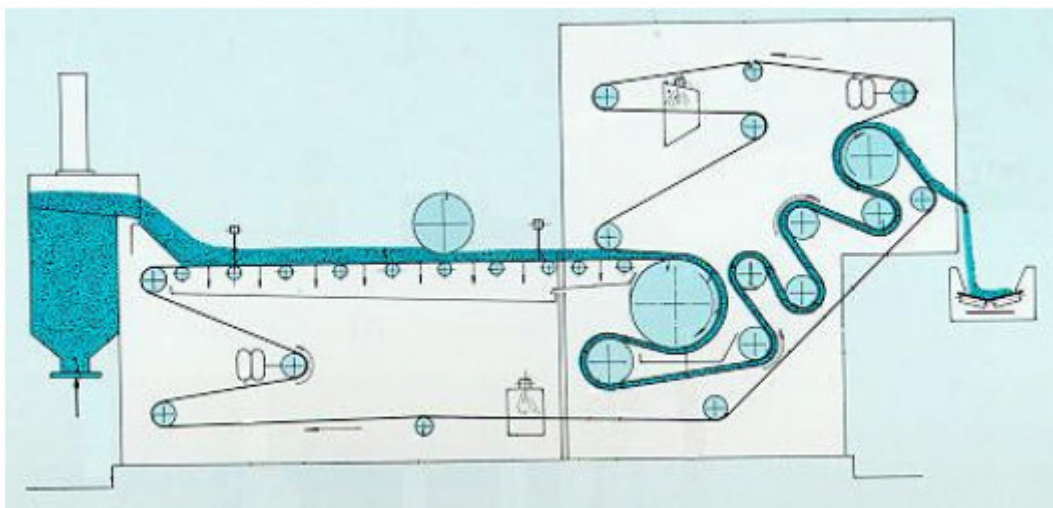


Figura 8 - Esquema típico de um filtro-prensa de esteira.  
Fonte: Catálogo da Degremont (apud DAVID 2002).

### 3.3.2.6 Filtros-prensa de placas

#### O filtro-prensa de placas

[...] consiste de uma série de placas retangulares, com cavidades em ambos os lados que, ao serem juntadas, deixam um espaço entre duas placas consecutivas, formando uma câmara para alojar as telas de filtração, onde o lodo é introduzido e prensado (DAVID, 2002, p.17).

O lodo é bombeado para dentro das câmaras, que se encontram alojadas entre as placas ao longo do conjunto. Conforme o lodo flui contra os elementos filtrantes permeáveis, que retêm os sólidos, permitindo somente a passagem dos líquidos, a pressão vai sendo aumentada gradualmente formando a torta de lodo a partir da superfície em contato com a tela. Os líquidos continuam fluindo através das placas até serem conduzidos aos coletores específicos. No final do processo, a torta é removida pela separação das placas.

Com o filtro-prensa de esteira, consegue-se obter teores de umidade entre 48 a 70%. O tempo total do processo varia entre 2 a 5h. A figura 9 mostra esquematicamente um filtro-prensa de placas (DAVID, 2002, p.19).

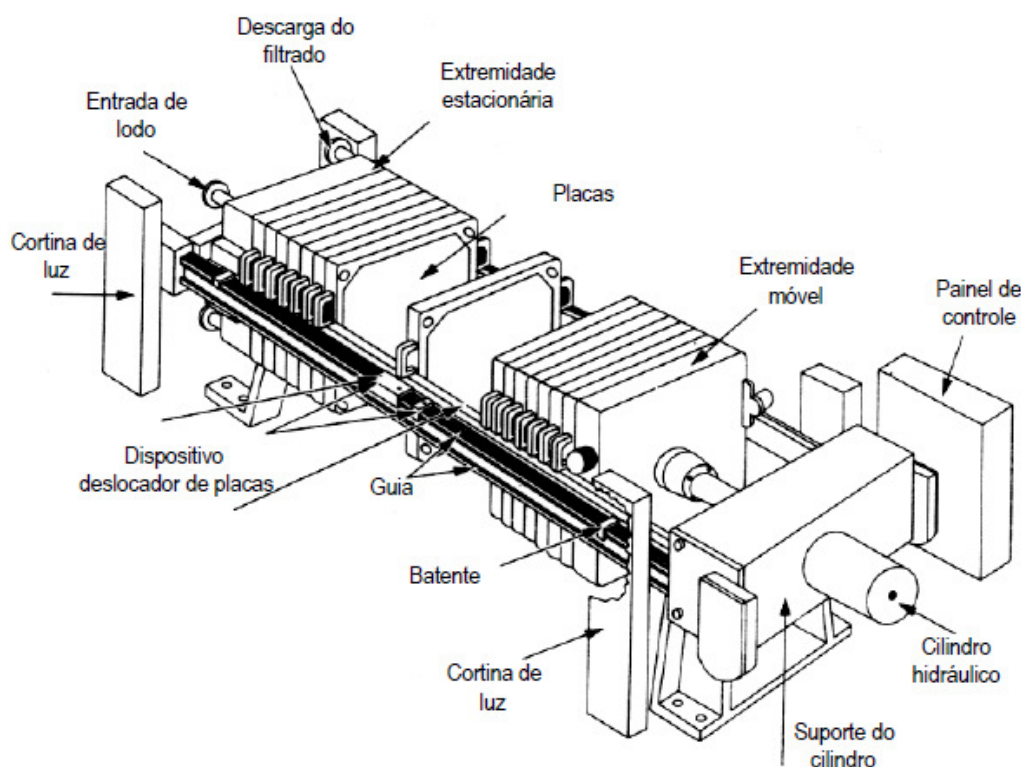


Figura 9 – Desenho esquemático de um filtro-prensa de placas.

Fonte: Metcalf & Eddy (apud DAVID, 2002)

As principais vantagens de um filtro-prensa de placas são:

- Elevada retirada de sólidos;
- Baixo consumo de produtos químicos para condicionamento do lodo.

Suas desvantagens são:

- Custo de aquisição;
- Substituição regular das telas de filtração realizadas com mão de obra qualificada;
- Peso do equipamento.

Essas desvantagens fazem com que o uso desse tipo de equipamento seja limitado a ETEs de médio e grande porte.

### 3.4 Transferência de calor

O calor transferido no secador para o lodo irá aumentar sua temperatura, causando a evaporação da água contida na superfície do mesmo.

Segundo David (2002, p.48),

[...] durante esse 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.

Para a escolha do secador apropriado, é necessário o entendimento de diversos fatores externos que influenciam no processo de secagem, são eles:

- Temperatura;
- Umidade;
- Área da superfície de secagem;
- Velocidade e direção do gás de secagem;
- Tempo de secagem;
- Agitação;
- Forma física do lodo.

No geral, o método de transferência de calor irá caracterizar o tipo de secador utilizado, esses métodos podem ser:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

Alguns secadores utilizam mais de um método de transferência, são chamados de secadores mistos, e estarão descritos posteriormente.

Os secadores podem ser classificados por diversas formas, porém, as principais formas de classificação desses equipamentos são pelo modo de transferência de calor para os sólidos úmidos e pelo modo de operação.

### 3.4.1 Classificação quanto ao modo de transferência de calor

Quanto ao modo de transferência de calor, os secadores podem ser classificados como: diretos, indiretos, por radiação e mistos.

#### 3.4.1.1 Secadores diretos

Nos secadores diretos, o ar quente, gases de combustão ou vapor superaquecido entram em contato direto com o lodo, a troca de calor se dá por convecção. A principal vantagem desse tipo de secagem é uma troca de calor mais elevada, o que possibilita a secagem de lodo com teores de umidade inferiores a 20%, isso acontece devido ao contato direto entre as partículas de lodo e o meio de secagem. A principal desvantagem desse tipo de secador é que quando se usam gases de combustão ou ar, é grande a geração de gases com odores.

A troca de calor por convecção é expressa matematicamente por:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_G - T_L) \quad (3)$$

Onde:

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

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção;

$A$  = área exposta à secagem;

$T_g$  = temperatura do gás;

$T_l$  = temperatura do lodo.

A figura 10 ilustra esquematicamente como acontece a troca de calor e a umidade em uma secagem direta.

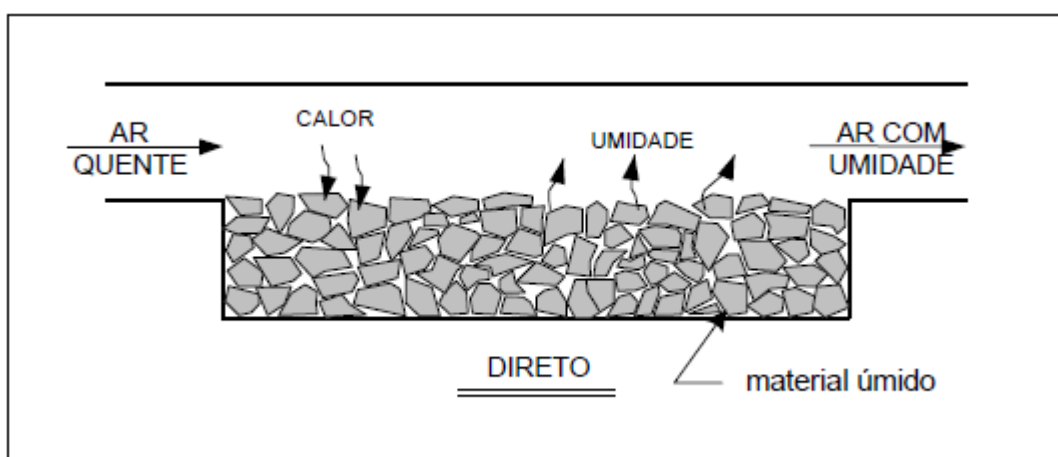


Figura 10 – Secagem direta.  
Fonte: David (2002).

### 3.4.1.2 Secadores indiretos

Nesse método, o lodo a ser secado fica separado do meio de secagem por uma parede metálica. A parede metálica recebe o calor que pode ser proveniente de óleo térmico ou vapor saturado. Para que o calor seja transferido, a temperatura do vapor ou do óleo tem que ser muito superior a do lodo úmido.

O vapor de umidade que sai do lodo fica em cima do mesmo, sendo então necessária uma corrente de ar para a retirada desse vapor e assim evitar que ocorra a condensação desse vapor na câmara de secagem.

A troca de calor por condução é expressa matematicamente por:

$$Q_{cond} = k \cdot A \cdot (T_M - T_L) / L \quad (4)$$

Onde:



$Q_{\text{cond}}$  = calor transferido por condução;

$k$  = coeficiente de transferência de calor por condução;

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

$T_m$  = temperatura do meio de secagem;

$T_l$  = temperatura do lodo;

$L$  = comprimento da área de secagem.

A figura 11 mostra esquematicamente um secador indireto.

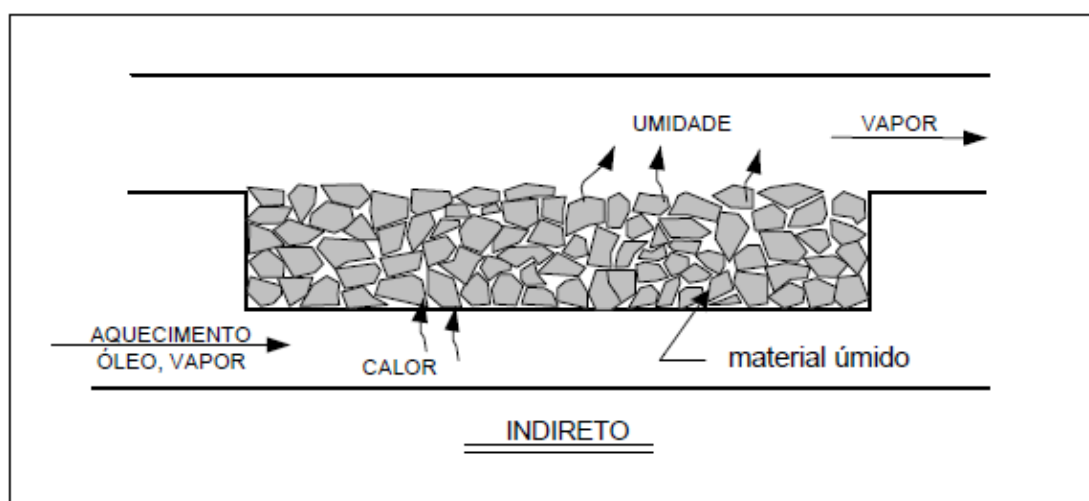


Figura 11 – Secagem indireta.

Fonte: David (2002).

Segundo Frost (apud DAVID, 2002, p. 52) “[...] a quantidade de ar de arraste necessária para evitar a condensação de vapor é de 0,5 kg de ar por kg de vapor”.

Uma desvantagem desse método é a incrustação do lodo em contato com a parte aquecida, sendo então necessária a retirada freqüente desse lodo. Isso pode ser feito de várias maneiras, tais como a agitação do lodo, a raspagem freqüente da superfície de troca de calor.

### 3.4.1.3 Secadores por radiação

O processo de secagem por radiação consiste basicamente de inserir o lodo na câmara de secagem, disposto em uma esteira e fornecer calor por uma fonte de

radiação. Esse método necessita de uma corrente de ar para arrastar a umidade retirada do lodo, assim como os secadores indiretos. O comprimento de onda dos raios é ajustado ao processo, fazendo com que o ar de arraste quase não absorva nenhuma radiação. A forma da transferência de calor por radiação é expressa matematicamente por:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{rad}^4 - T_l^4) \quad (5)$$

Onde:

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

$\varepsilon$  = emissividade da superfície aquecida;

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann;

$T_{rad}$  = Temperatura absoluta da superfície radiante;

$T_l$  = Temperatura absoluta do lodo.

#### 3.4.1.4 Secadores mistos

Esse método é basicamente uma combinação dos métodos supracitados, pois pode envolver dois ou mais tipos de transferência de calor.

#### 3.4.2 Classificação quanto à operação

Segundo a classificação apresentada por Nonhebel & Moss (apud ALONSO, 2001, p. 33), os secadores são separados quanto ao modo de operação da seguinte forma, de acordo com a figura 12 abaixo.

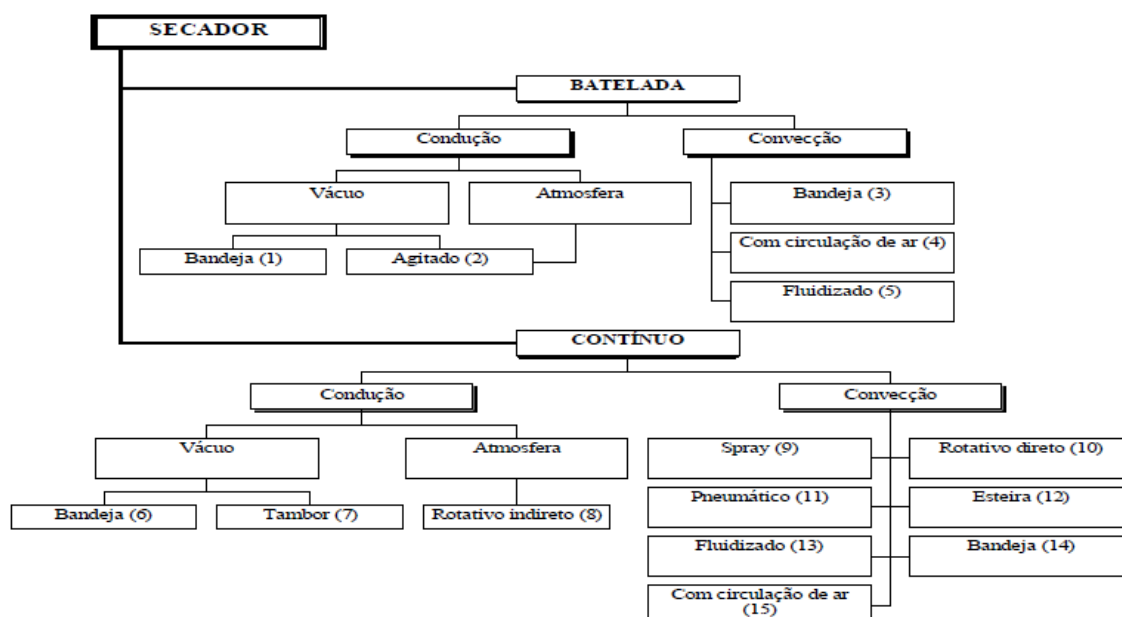


Figura 12 - Classificação de secadores de acordo com a operação.

Fonte: Alonso, 2001.

Onde cada tipo de secador operando de um modo diferente atende às exigências de processo de diferentes produtos, exemplificada na tabela 1:

Tabela 1: Relação dos secadores com os produtos mais adequados.

Fonte: Alonso, 2001.

Secador	Produtos							
	Filme	Granulares	Lama	Líquido	Lodo ou pasta	Pasta compacta	Pré formados	Sólido fibroso
Agitado		•	•	•	•			
Bandeja	•	•			•	•	•	•
Com ar Circulado		•					•	•
Esteira	•	•	•		•	•	•	
Fluidizado		•			•		•	•
Pneumático		•			•		•	•
Rotativo direto		•						•
Rotativo indireto		•				•		•
Spray			•	•	•			
Tambor	•		•	•	•			

### 3.5 Secadores Térmicos

O processo de secagem térmica consiste em evaporar a água presente no lodo pela transferência de calor que pode ser direta ou indireta. A água evaporada é condensada e retorna à entrada da ETE para ser tratada.

O lodo sai do secador na forma de “pellets” e com um diâmetro entre 2 e 5 mm. Pelo uso de altas temperaturas, os “pellets” são livres de elementos patogênicos, podendo então ser utilizado na agricultura. O processo de secagem é totalmente fechado, pois os odores produzidos não podem ser lançados diretamente na atmosfera por conterem gases nocivos ao meio ambiente.

Atualmente, existem diversos tipos de secadores no mercado. Eles se diferenciam basicamente pelo método de transferência de calor utilizado e pela capacidade de produção de bio sólido. Cada tipo de secador tem suas vantagens e desvantagens que devem ser levadas em conta no projeto, como custo operacional, disponibilidade energética, atendimento às exigências legais, etc..

Os principais tipos de secadores térmicos são:

- Secador rotativo;
- Secador transportador de esteira;
- Secador pulverizador “spray dryer”;
- Secador a transporte pneumático “flash dryer”.

#### 3.5.1 Tipos de secadores

##### 3.5.1.1 Secador rotativo

O secador rotativo é um tipo de secador que opera por batelada, pode ser do tipo direto ou indireto. No secador rotativo do tipo direto, o lodo entra em contato direto com o fluxo de ar quente ao longo do seu percurso, já no secador rotativo do tipo indireto, o cilindro por onde circula o lodo é encamisado por outro cilindro, por onde circula ar quente, vapor ou até mesmo um óleo térmico.

O secador rotativo possui suspensores, que basicamente são palhetas fixas na parede interna do cilindro por onde circula o lodo que têm a função de mexer o lodo conforme o cilindro vai girando.

Conforme podemos observar pela figura 13, os secadores rotativos são geralmente de grandes dimensões, mas para o seu projeto, é necessário a determinação do tempo de retenção que depende de alguns fatores como a densidade e ângulo de repouso do sólido, da disposição dos suspensores no secador, da inclinação do secador e da densidade da massa do material presente no secador (Zempulski & Zempulski, 2007, p.10).



Figura 13 – Secador rotativo.  
Fonte: TECNAL (apud Zempulski & Zempulski, 2007).

O secador rotativo tem como vantagens, a grande quantidade de lodo que pode ser seco de uma vez. O secador rotativo está representado detalhadamente na figura 14, assim como os suspensores.

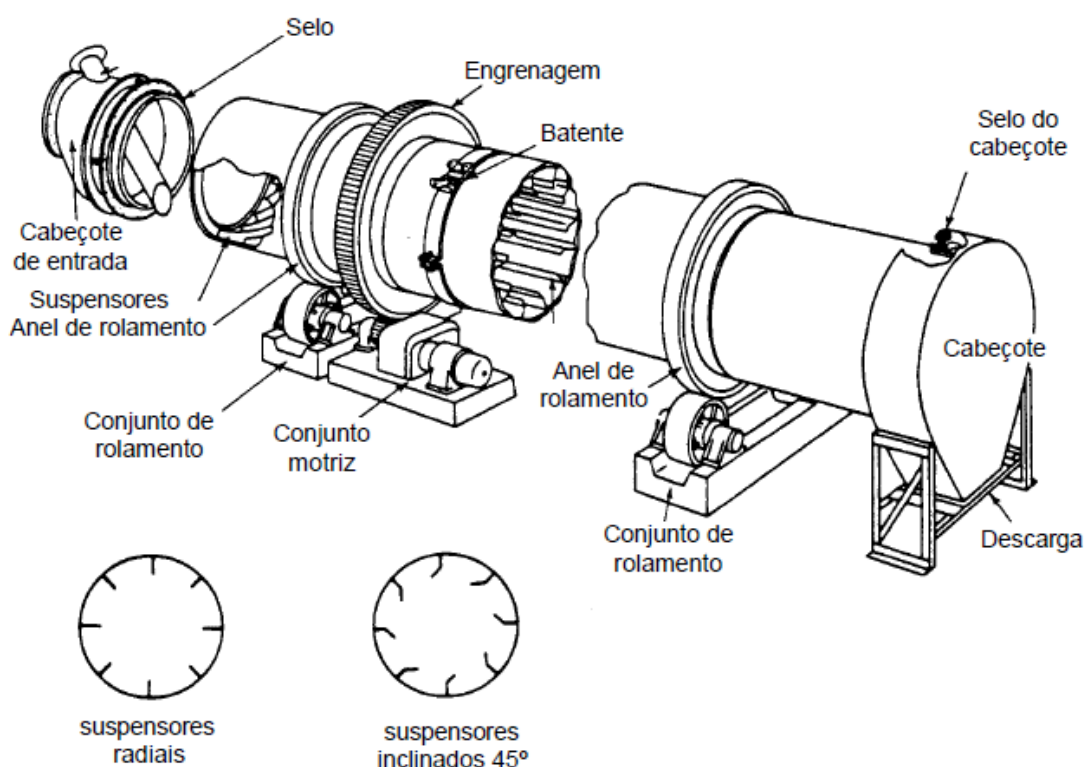


Figura 14 – Detalhe de um secador rotativo.  
Fonte: WEF (apud DAVID, 2002).

### 3.5.1.2 Secador transportador de esteira

O secador transportador de esteira é um secador de alimentação contínua. Pode ser de dois tipos, com fluxo de ar cruzado ou com fluxo de ar paralelo. O processo com fluxo de ar cruzado consiste em depositar o lodo em uma esteira porosa com o fluxo de ar cruzando perpendicularmente a esteira. Já no fluxo de ar paralelo, o fluxo de ar quente passa sobre a esteira.

Pode-se observar na figura 15, que o controle da camada de lodo na esteira tem que ser rigorosamente controlada, pois uma camada de lodo com uma espessura acima ou abaixo para a qual o secador foi projetado interfere potencialmente na umidade final do lodo.

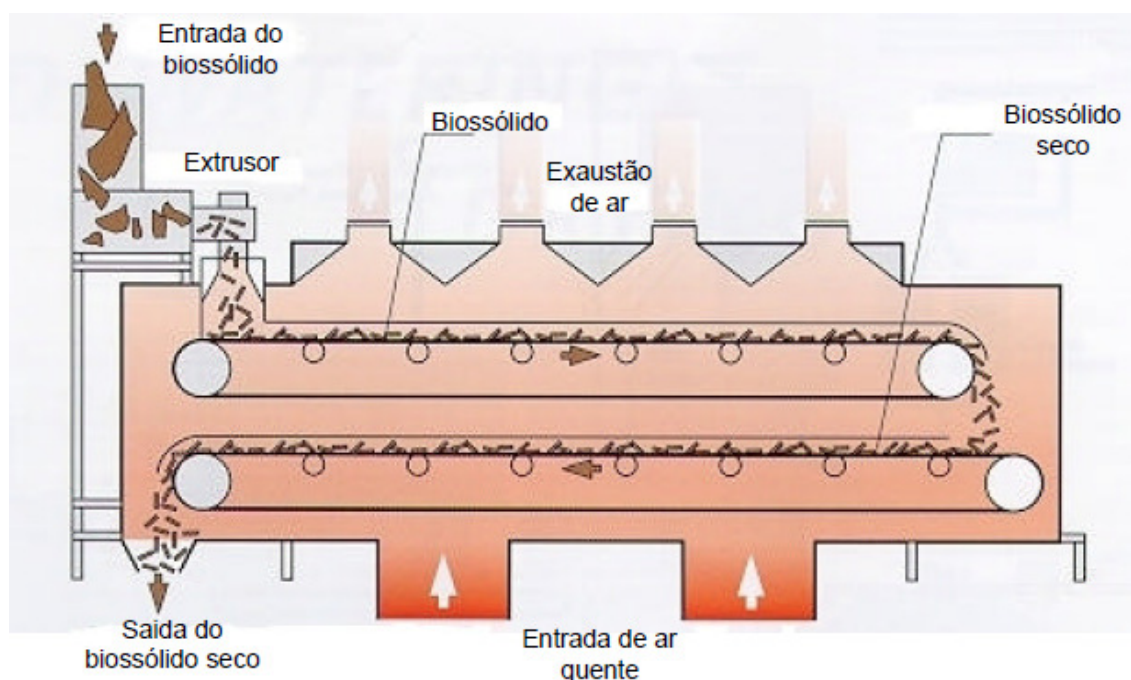


Figura 15 – Secador transportador de esteiras de fluxo cruzado.  
Fonte: Catálogo da Netzsch (apud DAVID, 2002).

### 3.5.1.3 Secador pulverizador “spray-dryer”

Este tipo de secador consiste em uma câmara cilíndrica grande, posicionada na vertical, onde o material, ainda na forma líquida, é alimentado por uma centrífugadora de alta velocidade (DAVID, 2002, p.59).

Essa força centrífuga é necessária para pulverizar o lodo para o topo da câmara de secagem onde ocorre a transferência de calor e umidade de uma forma muito rápida pelo contato direto das partículas de lodo com o gás quente.

### 3.5.1.4 Secador a transporte pneumático “flash-dryer”

O secador a transporte pneumático, também conhecido como flash dryer é descrito como sendo

[...] um longo tubo vertical, no qual circula um gás quente em alta velocidade, arrastando os sólidos para cima enquanto realiza a secagem. Os lodos úmidos são misturados com os lodos secos em um misturador, e são triturados e pulverizados na corrente de gás quente que evapora rapidamente a água das partículas de lodo, enquanto o lodo é arrastado pelo tubo até o ciclone, que separa os sólidos dos gases (DAVID, 2002, p. 55).



A utilização do flash-dryer não gera “pellets” e sim pequenas partículas de lodo, sendo então necessária a utilização de outros processos para transformá-los em “pellets”.

A desvantagem desse tipo de secagem é a grande formação de particulados, o que requer a instalação de filtros de manga para a retirada dos finos antes de lançar os gases na atmosfera após a passagem do lodo pelo ciclone separador e a quantidade de equipamentos necessários para a realização do processo conforme ilustrado na figura 16, o que gera um custo inicial alto.

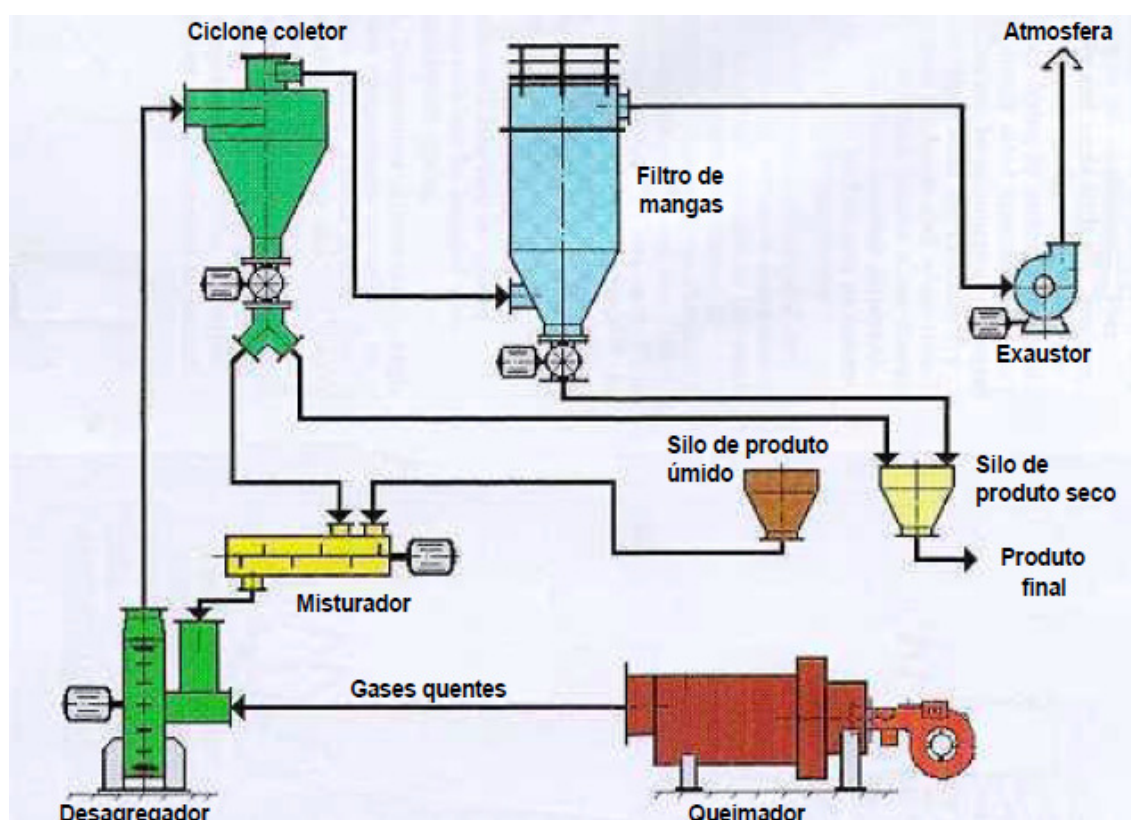


Figura 16 – Secador a transporte pneumático “flash dryer”.

Fonte: Adaptado de WEF (apud DAVID, 2002).

### 3.6 Biossólido

Biossólido é o lodo formado ao fim do processo de tratamento de esgoto nas ETEs, que passa por tratamento biológico para redução de agentes patogênicos.

Com a crescente e necessária adequação ambiental e sanitária dos grandes aglomerados urbanos, seu uso tem sido muito difundido, assim como as diversas



formas de sua utilização. As aplicações do biofóssido mais comuns que podem ser citadas são:

- Fertilizante;
- Condicionador de solos;
- Matéria prima para compostagem;
- Fonte de energia;
- Adjuvante para fabricação de tijolos.

De todas essas aplicações, as mais utilizadas têm sido como fertilizante e condicionador de solos, sendo necessário, entretanto um estudo prévio de viabilidade, visando prever os impactos ambientais que podem ser causados.

O Brasil é um país com grande potencial para utilização do biofóssido, devido a existência de amplas faixa de terras cultiváveis, mas com baixa fertilidade desses. No país, o uso do biofóssido em áreas agrícolas depende da aprovação prévia do órgão governamental responsável pela fiscalização ambiental local. Para a sua utilização como fertilizante ou condicionador de solos, também é necessário o registro do fabricante no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Dentre as alternativas de aplicação do biofóssido, a compostagem (reciclagem agrícola) é uma particularmente adequada ao Brasil, devido ao seu baixo custo.

Em sua composição o biofóssido apresenta, além da matéria orgânica, concentrações variáveis de macro (N, P, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn, B, Mo, C). No entanto, ao lado dos nutrientes das plantas e da matéria orgânica, o biofóssido também apresenta níveis de metais pesados, que são perigosos agentes poluidores, Então, torna-se necessário definir muito bem a dose de biofóssido a ser aplicada no empreendimento agrícola, de modo a diminuir os riscos ambientais.

O adequado processamento do biofóssido inclui uma secagem e desinfecção eficiente. Isso viabiliza seu uso como fertilizante agrícola, constituindo uma solução final interessante, através da ciclagem de nutrientes no ecossistema. Existem várias formas de associar secagem e higienização do lodo.

O leito de secagem já é uma tecnologia bem difundida desse assunto, principalmente em estações de pequeno porte, devido a eficiência do processo e ao seu baixo custo. Contudo, já existem novos tipos de tratamento de lodo, além do que aproveita a energia do sol, que aumentam a eficiência do processo.

O tratamento conhecido como secagem térmica vem sendo bastante empregado atualmente, sendo que ele consiste no aproveitamento da própria energia produzida no tratamento anaeróbio do esgoto, energia essa proveniente do biogás produzido nos reatores das ETEs.

O Biogás é produzido no processo fermentativo da biomassa (bactéria) do esgoto. Seu constituinte energético é o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), sendo que normalmente ele é quase todo lançado na atmosfera. Isso gera um grave problema ambiental, pois o gás metano é mais impactante que o  $\text{CO}_2$  em termos de efeito estufa. Com o objetivo de aproveitar a energia proveniente do biogás e combiná-la com o lodo do esgoto, produzindo assim bio sólido aproveitável, surgiu o tratamento conhecido como secagem térmica.

## 4. METODOLOGIA

A utilização do biogás produzido na ETE como o tipo de combustível é a maior economia de energia no processo, já que se esse gás não fosse utilizado, ele seria descartado.

Uma ETE com entrada de esgoto com cerca de 40 L/s produz aproximadamente 1195,23 m<sup>3</sup> de biogás ao dia, sendo que esse biogás é composto por aproximadamente 65% de CH<sub>4</sub> e 35% de CO<sub>2</sub>.

Foi utilizado um fluxograma como base para todos os cálculos desse trabalho, sendo que esse está demonstrado na figura 17.

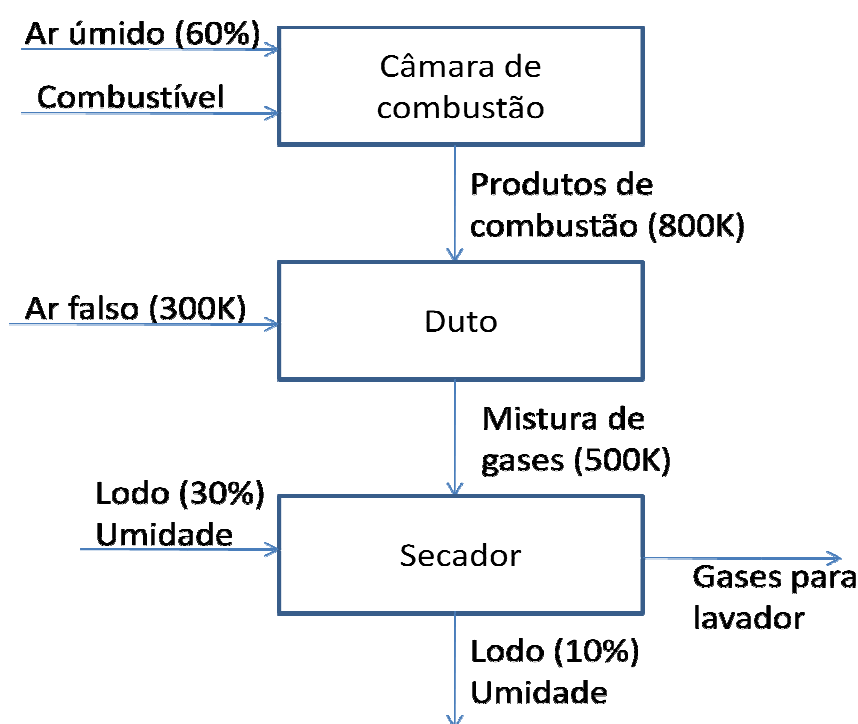
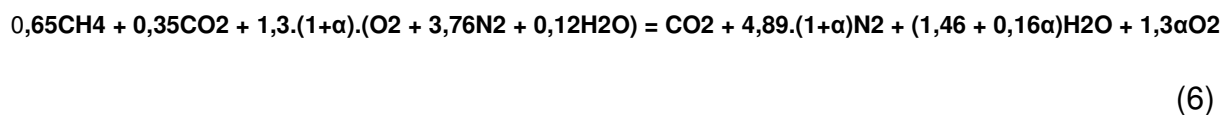


Figura 17 - Fluxograma de cálculos.

Para calcular a reação de combustão, calcula-se a mistura de ar-combustível necessária para atingir uma temperatura de 800 K, pois uma temperatura maior, embora implicasse em uma menor quantidade de ar para a ocorrência da combustão, implicaria em uma restrição de materiais para a câmara. Já para uma temperatura menor, a quantidade de ar necessária para a combustão seria muito alta, implicando certas restrições para o processo. O ar utilizado no cálculo da combustão, não é o ar teórico ( $O_2 + 3,76N_2$ ) e sim um ar com 60% de umidade

relativa ( $O_2 + 3,76N_2 + 0,12H_2O$ ), que consiste em uma média de umidade anual local.

A equação estequiométrica da combustão do biogás é a seguinte:



Pela equação de combustão, foram obtidos os valores demonstrados na tabela 2 abaixo para temperatura, excesso de ar e relação ar-combustível.

Tabela 2: Temperatura, excesso de ar e relação A/C

Temp(K)	Excesso de ar	Relação A/C
600	9,378	72,593
700	7,040	56,238
800	5,627	46,518
900	4,682	39,742
1000	4,006	35,019
1100	3,500	31,478
1200	3,107	28,731
1300	2,794	26,541
1400	2,539	24,756
1500	2,327	23,275
1600	2,149	22,027

Com base nesses dados foram gerados os seguintes gráficos de Relação ar/combustível x Temperatura e Excesso de ar x Temperatura.

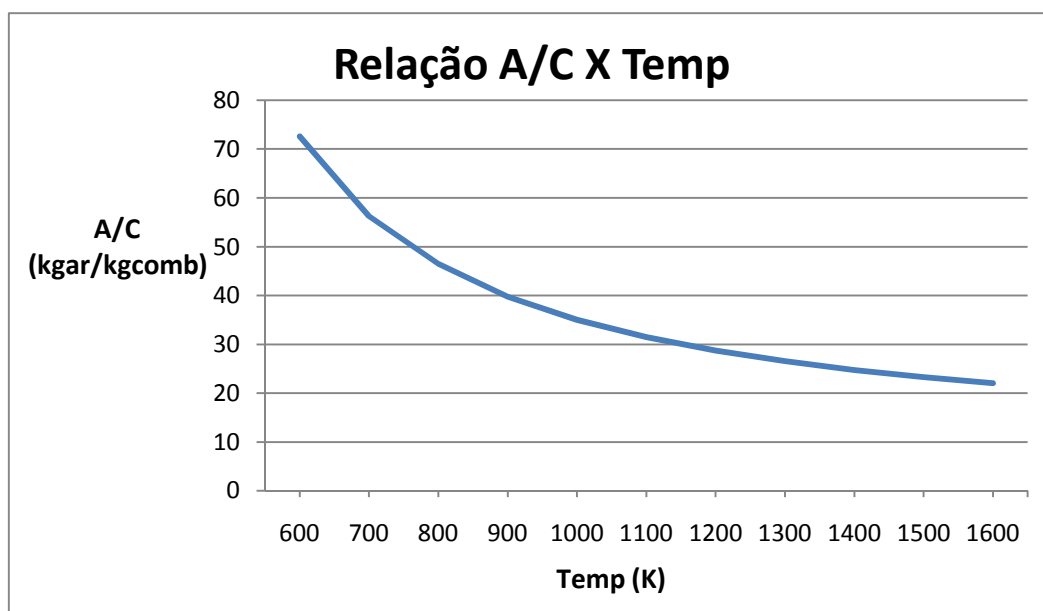


Gráfico 1 – Relação Ar/Combustível x Temperatura.

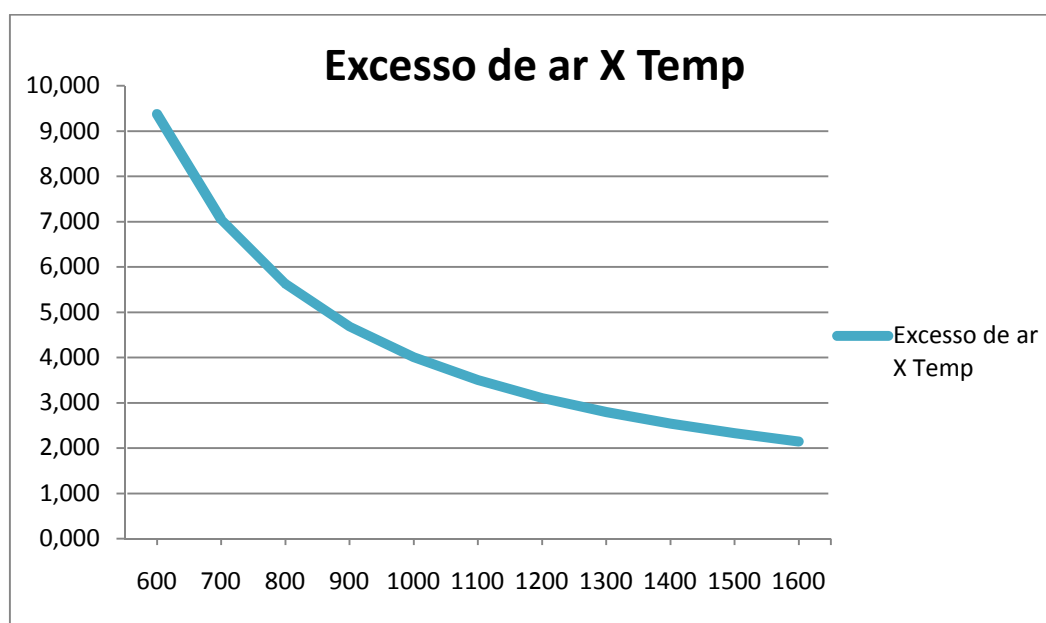


Gráfico 2 – Excesso de ar x Temperatura (K).

O excesso de ar necessário na reação, para que os produtos da combustão tenham uma temperatura de 800K é de 5,63, ou seja, 563% da quantidade de ar teórico e a relação ar/combustível encontrada foi de 46,52 kgar/kgcomb.

A temperatura de 800K, de acordo com literaturas consultadas, ainda é muito alta para a secagem de lodos, pois pode ocorrer a auto-ignição do mesmo. Portanto, faz-se necessário o insuflamento de ar na temperatura aproximada de 300K (ar falso)

para trocar calor com os produtos de combustão, abaixando a temperatura para 500K.

A realização dos cálculos da quantidade de ar necessária para essa redução de temperatura foi feita com base na seguinte equação, que corresponde a Primeira Lei da Termodinâmica:

$$(m_p + m_{ar}).c_{pm}.T_s = m_p.c_{pp}.T_p + m_{ar}.c_{par}.T_{ar} \quad (7)$$

Onde:

$m_p$ : vazão mássica dos produtos de combustão;

$m_{ar}$ : vazão mássica do ar falso;

$c_{pm}$ : calor específico da mistura (produtos de combustão + ar falso);

$T_s$ : temperatura desejada de equilíbrio;

$c_{pp}$ : calor específico dos produtos de combustão;

$T_p$ : temperatura dos produtos de combustão;

$c_{par}$ : calor específico do ar a 300K;

$T_{ar}$ : temperatura ambiente (300K).

Com base nessa equação, têm-se duas incógnitas, a vazão mássica de ar falso e o calor específico da mistura, sendo então necessária uma iteração de um desses valores. Como o controle da quantidade de ar falso é mais complicado de se fazer, foram iterados os valores do calor específico da mistura.

Sabe-se que o calor específico da mistura será um valor intermediário entre o calor específico dos produtos de combustão a 800 K ( $c_{pp}= 1,080 \text{ Kj/Kg.K}$ ) e o do ar falso a 300 K ( $c_{par}=1,020 \text{ Kj/Kg.K}$ ) , pois a temperatura da mistura é um valor que se encontra entre as temperaturas de entrada dos componentes ( $T_s= 500 \text{ K}$ ). Tendo isso em vista, foram obtidos os dados mostrados na tabela 3 para a vazão mássica de ar falso e o calor específico da mistura.

Tabela 3: calor específico da mistura e vazão mássica de ar falso.

cpm	mar
1,020	3,061
1,025	3,040
1,030	3,018
1,035	2,996
1,040	2,975
1,045	2,953
1,050	2,932
1,055	2,910
1,060	2,888
1,065	2,867
1,070	2,845
1,075	2,824
1,080	2,802

Baseado nisso, foi construído o gráfico Mar X cpm, ilustrado abaixo.

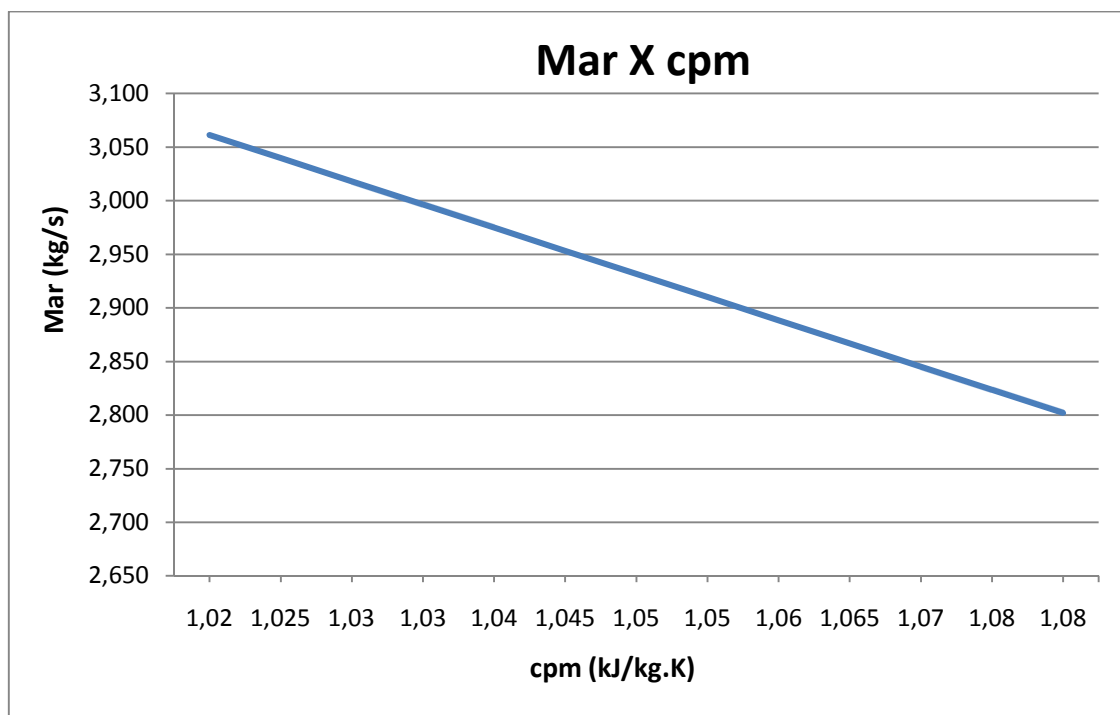


Gráfico 3 – Mar X cpm.

A quantidade de ar falso que entrará no secador dependerá da temperatura dos produtos de combustão, quanto maior a temperatura destes, maior será a

quantidade de ar necessária para chegar aos 500K adotados. Esse controle pode ser feito com a utilização de um controlador proporcional que regulará a vazão de ar necessária.

A potência do ventilador necessário para o insuflamento da vazão total dos componentes vai variar de acordo com a vazão de ar falso, pois ela influencia diretamente na velocidade que esses componentes vão entrar no secador, sendo que a velocidade afeta a perda de carga do duto, que finalmente afeta no cálculo da potência do ventilador. A perda de carga considerada foi de duas vezes o valor da perda de carga distribuída, para se ter uma margem de segurança confiável. A potência do ventilador é calculada pela diferença de pressão multiplicada pela vazão volumétrica de gás e pela densidade do gás que, neste caso, foi aproximada para a densidade do ar a temperatura de 500K visto que a quantidade de ar é muito superior a quantidade de outros gases. Os dados obtidos de potência do ventilador, a vazão mássica de ar e a perda de carga estão demonstrados na tabela abaixo.

Tabela 4: Potência do ventilador, vazão mássica de ar e perda de carga.

mar	Perda de carga	Potência do ventilador (CV)
3,061	9,646	0,222
3,040	9,560	0,219
3,018	9,474	0,216
2,996	9,389	0,213
2,975	9,304	0,210
2,953	9,220	0,207
2,932	9,136	0,204
2,910	9,052	0,202
2,888	8,969	0,199
2,867	8,886	0,196
2,845	8,803	0,193
2,824	8,721	0,191
2,802	8,639	0,188

Com os dados de vazão mássica de ar e potência do ventilador, foi gerado o seguinte gráfico:



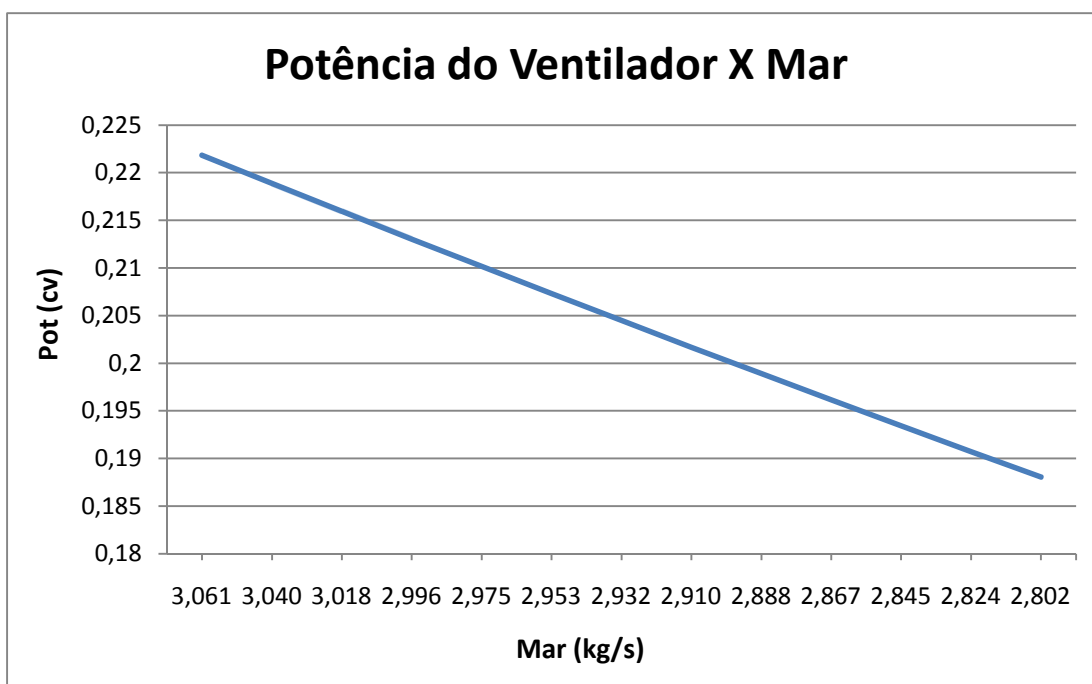


Gráfico 4- Potência do Ventilador x Mar

Pode-se observar no gráfico que a potência do ventilador não é muito elevada, devido ao fato do comprimento da tubulação ser pequeno (5 metros).

Para os cálculos conseguintes, é necessário que se escolha o tipo de secador empregado. Na revisão bibliográfica deste trabalho foram apresentados os tipos mais empregados na indústria atual. Analisando os diversos tipos e fazendo um paralelo entre suas vantagens e desvantagens, foi selecionado o secador do tipo esteira com fluxo de ar paralelo. Como se trata de um secador direto, a troca de calor do ar para o lodo se dá exclusivamente por convecção.

O secador será dimensionado a fim de atender a demanda de produção de lodo de uma cidade com aproximadamente 20.000 habitantes, sendo produzido diariamente um total de 57,6 m<sup>3</sup> de lodo com uma densidade aproximada de 1030 kg/m<sup>3</sup>. Como o lodo antes de entrar no secador, passará por uma centrífuga, realizando assim um processo de desidratação, a umidade absoluta de entrada do mesmo é de 30%. O secador tem como objetivo reduzir essa umidade para 10%.

Tendo em vista um tempo de operação de 8 horas diárias, adotou-se uma esteira com 1 metro de largura e com um comprimento de secagem de 5 metros.

Para um melhor aproveitamento do calor gerado, a altura da camada de lodo não pode ser muito elevada, então se adotou uma altura de 0,02 metros de lodo. Com esses parâmetros, chegou-se a uma velocidade média da esteira de 0,1 m/s.

A fim de levantarem-se todos os dados necessários para o correto dimensionamento do secador, se fez necessária a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Devido a dificuldade de se obter analiticamente esse parâmetro, foi desenvolvido, com base em conhecimentos teóricos, um experimento para a determinação de tal coeficiente. Os materiais e o procedimento adotado estão descritos a seguir.

## 4.1 Experimento

Com o objetivo de simular os resultados a serem obtidos com a utilização de um secador industrial, foi realizado um experimento com um secador em pequenas escala, usando a mesma teoria e buscando validar o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção “h”.

A experiência foi realizada dentro de um ambiente fechado, visando diminuir ao máximo o efeito da umidade ambiente, que poderia afetar a coleta dos dados.

### 4.1.1 Descrição dos materiais

Para simular o secador térmico, foi construída uma caixa retangular de fibra de vidro, com as dimensões de 1m x 0,25 m x 0,24 m. Apesar da fibra de vidro já ser um material com bom isolamento térmico, foram utilizadas 4 folhas de isopor, 2 nas dimensões 1 m x 0,24 m x 0,05 m e 2 nas dimensões 1 m x 0,25 x 0,05 m, com o objetivo de realizar um isolamento mais eficiente da caixa. A figura 18 mostra o experimento montado com o isopor fixo na caixa por fita isolante.



Figura 18 - Caixa retangular de fibra de vidro, coberta com isopor.

Para realizar a secagem térmica do lodo foi utilizado um ventilador com resistência interna, funcionando como aquecedor do sistema. A potência média utilizada foi de 750 W. O ventilador foi colocado na entrada da caixa, para permitir que a entrada do fluxo de ar aquecido fosse o mais paralela possível, aumentando assim a eficiência da troca de calor. A figura 19 abaixo mostra o ventilador acoplado na entrada do secador, com a potência média e o termostato no máximo.

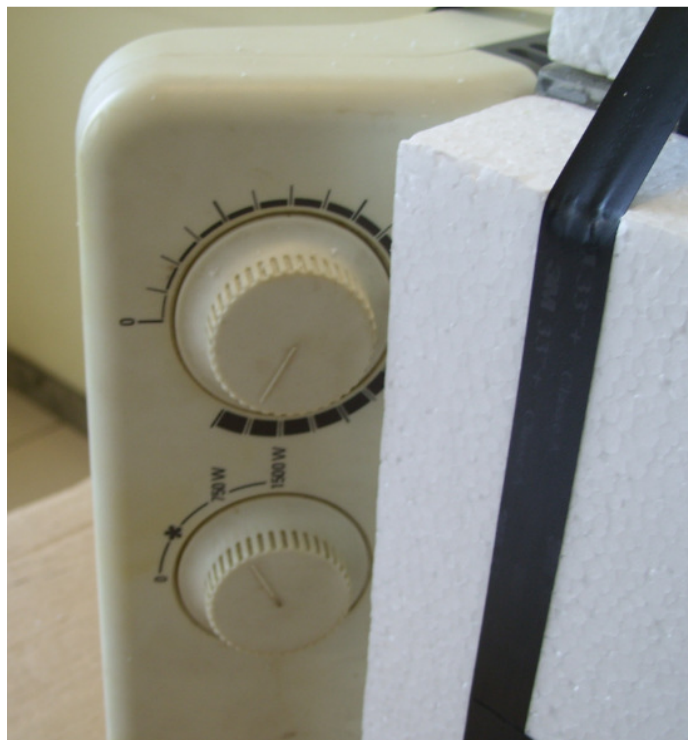


Figura 19 - Ventilador aquecedor.

Foram utilizados dois termômetros e um termohigrometro, para a medição da temperatura de entrada, a temperatura do lodo e a temperatura na saída da caixa.

O termômetro utilizado para a medição da temperatura na entrada do secador é da marca GULTON, modelo GULterm 1001 e consegue fazer medições de  $-40$  a  $199,9^{\circ}\text{C}$  com resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . A figura 20 mostra uma foto desse termômetro.



Figura 20 - Termômetro da entrada do secador.

O termômetro utilizado para a medição da temperatura do lodo é da marca Minipa e seu modelo é MV-36I. Este termômetro consegue realizar medições entre  $-10$  e  $220^{\circ}\text{C}$  com resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Este termômetro é mostrado na figura 21.



Figura 21 - Termômetro colocado no lodo.

O termohigrometro utilizado para a medição da temperatura na saída do secador é da marca PERCEPTEC, modelo DHT-2220. Ele consegue realizar medições de temperatura na faixa de 0 a 50°C com resolução de 0,1°C. A figura 22 mostra o termohigrometro.



Figura 22 - Termohigrometro da saída do secador.

O lodo utilizado no experimento foi retirado da ETE de Mosesp, no município de Viana. Uma bandeja de aço carbono 1020, nas dimensões 0,40 m x 0,20 m x 0,05 m, foi construída para ser preenchida pelo lodo. A figura 23 abaixo mostra a bandeja cheia de lodo.



Figura 23 - Bandeja de aço carbono coberta de lodo.

#### 4.1.2 Descrição do experimento

A montagem do experimento começou com uma abertura com as dimensões da bandeja na parte inferior da caixa de fibra de vidro. A bandeja foi ali colocada e logo preenchida a fim de igualar o nível de lodo com o da caixa de fibra de vidro. A caixa toda foi coberta com isopor, que serviu como material isolante. Após isso, os termômetros e o termohigrometro foram fixados, com o primeiro termômetro sendo fixado na parte de cima do secador, próximo a entrada para poder aferir a temperatura mais alta do fluxo de ar. O segundo termômetro foi colocado dentro do lodo, após ser feito um pequeno orifício na lateral da caixa, com seu visor ficando do lado de fora para poder serem anotadas as devidas temperaturas. O termohigrometro foi colocado na saída do secador, preso ao teto, para poder medir a menor temperatura que o fluxo de ar iria assumir.

Por último, o ventilador de ar aquecido foi fixado na entrada do secador, tentando assim obter um fluxo de ar o mais paralelo possível. A figura 24 mostra o experimento montado e funcionando, visto internamente.



Figura 24 - Vista interna do secador.

Com o secador montado, ligaram-se todos os equipamentos para que eles entrassem em equilíbrio entre si, levando cerca de 10 minutos para tal equilíbrio acontecer. Com o objetivo de se encontrar um valor mais confiável do coeficiente de convecção, foram realizadas 10 medições. A cada 5 minutos, as temperaturas de entrada, a temperatura do lodo, a temperatura de saída eram tomadas.

Com os valores de temperatura aferidos, utilizou-se a equação (3) de transferência de calor por convecção, para calcular o valor de  $h$ .

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 5 abaixo mostra as temperaturas obtidas em cada intervalo de tempo pré-determinado. A cada tomada de temperatura, obteve-se o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção.

Tabela 5- Valores de temperatura, média e desvio padrão de h.

Tempo (min)	Tentrada (°C)	Tlodo (°C)	Tsaída (°C)	h (W/m <sup>2</sup> K)	Desvio
5	39.3	24.7	35.5	307.794	193.7685
10	40.1	25.2	37.9	174.6087	60.58324
15	40.4	25.8	38.8	129.5975	15.57204
20	40.5	26.2	39.3	99.23722	14.78821
25	40.5	26.6	39.5	85.07747	28.94795
30	40.5	26.8	39.8	60.42363	53.60179
35	40.6	27.0	39.8	69.56334	44.46208
40	40.7	27.3	39.9	70.6016	43.42382
45	40.7	27.4	39.9	71.13244	42.89298
50	40.7	27.6	39.9	72.21843	41.80699
			h médio	114.025	
			Desvio médio		53.98476

Com a tabela acima, também pôde se construir o gráfico 5, com a variação do valor de h em função do tempo em minutos. Esse gráfico está mostrado a seguir.



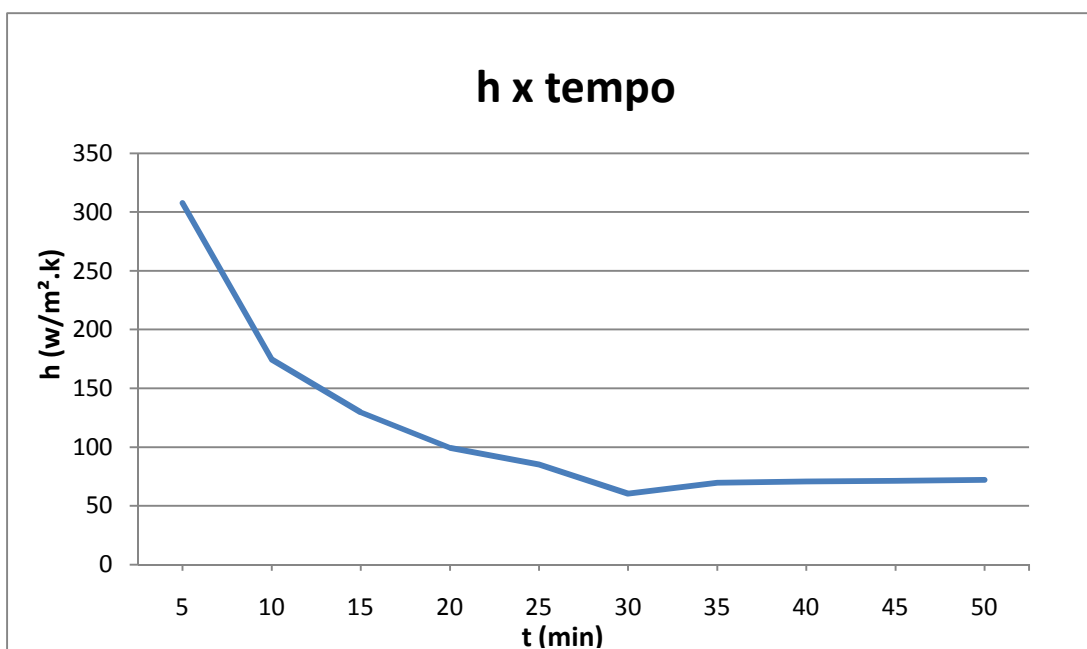


Gráfico 5 - Coeficiente de convecção h x tempo.

Conforme se pôde observar, o coeficiente de convecção tende a diminuir rapidamente nos primeiros minutos, chegando a praticamente se estabilizar nos 15 minutos finais. Isto se deve ao fato de que no início do processo de secagem, conforme os resultados teóricos, a transferência de calor se dá por um regime transiente, já que a diferença de temperatura dos gases e do lodo é alta. Assim, a velocidade de secagem é mais alta.

Com o decorrer do tempo, a transferência de calor atinge o regime permanente, atingindo então uma velocidade de secagem constante, o que causa uma menor transferência de calor, resultando em valores menores do coeficiente h.

Após obter esses valores, calculou-se um coeficiente h médio de 114,025 W/m²K que foi utilizado no cálculo da quantidade de calor total que será possível trocar no tempo de operação diário do secador. Calculou-se também, as quantidades de calor sensível e calor latente que vão ser necessárias dentro de secador. O calor sensível consiste no calor que é transferido para o material até que ele chegue a sua temperatura de mudança de fase. Já o calor latente corresponde a quantidade de calor necessária para que toda a massa do material mude de fase.

No caso do secador, o calor latente indica a vaporização da água presente no lodo. Como o lodo que vai sair do secador não pode ter menos de 10% de água, não será possível secar toda a água nele presente.

O potencial de troca de calor por convecção do secador analisado funcionando durante 8 horas diárias, utilizando a equação 3 e considerando o valor de  $h$  de  $114,025 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , é de  $2.085.296.515,00 \text{ kJ}$ . A quantidade de energia necessária para a mudança de fase da água é um somatório da quantidade de calor sensível para alcançar a temperatura de mudança de fase mais a quantidade de calor latente para fazer essa mudança, sendo que a quantidade diária de calor sensível é de  $6.110.784 \text{ kJ}$  e a quantidade diária de calor latente é  $35.280.031,00 \text{ kJ}$ , somando as duas quantidades necessárias temos um total de  $41.390.815,00 \text{ kJ}$ .

Com isso, observa-se que a quantidade de energia gerada é muito maior do que a necessária para o processo de secagem, podendo assim, haver um aproveitamento dessa energia de outra maneira, como por exemplo, um tipo de co-geração.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS

O uso de secadores transportadores de esteira (com alimentação contínua) é viável para a secagem de lodo proveniente de uma estação de esgoto, quando o combustível a ser utilizado para suprir energia ao processo é gerado pelo próprio estoque de lodo.

Com base em uma produção típica de gás por uma estação de 106.790 ton de esgoto mensais, camadas de 20 mm de espessura, repousando sobre uma esteira em movimento a 0,1 m/s podem ser aquecidas com controle de temperatura dos gases feito por injeção de ar falso, gerando biossólidos de utilidade como fertilizante e adjuvantes de tijolos.

A produção de biogás pela estação típica analisada é 1200 m<sup>3</sup>/dia.

As vazões de lodo a serem secas são da ordem de 7400 Kg/h, utilizando vazão de produtos de combustão e ar falso em torno de 4,8 Kg/s. (1,8 Kg/s de produtos de combustão e 3,0 Kg/s de ar falso), permitindo fácil controle da temperatura com a variação de ar falso.

Um dos pontos fundamentais de elaboração de projetos dessa natureza é a existência de dados confiáveis e de abrangência razoável, que supram informações do tipo, coeficientes de convecção, calores específicos, comportamento temporal da variação de conteúdo de água no lodo e constantes de uso em modelos térmicos, com razoável generalidade.

Os trabalhos consultados mostram modelos muito específicos, com constantes adaptadas a situações peculiares o que torna impossível sua utilização em problemas diferentes do originalmente estudado.

Sugere-se para trabalhos futuros uma série de abordagens do problema de secagem de lodo, abrangendo:

- Experimentações generalizadas para determinação de número de Nusselt em função de Reynolds e Prandtl e alguma outra propriedade inerente ao lodo;

- Experimentações generalizadas para elaboração de uma base teórica sobre a transferência de massa de água contida no lodo, expressa como função de propriedades do lodo;
- Medições de propriedades térmicas do lodo;
- Geração de soluções numéricas de modelos bidimensionais de secagem do lodo (transientes e em regime permanente) a partir de abordagens suficientemente generalizadas.

## 7. REFERÊNCIAS

ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores**. Campinas, 2001.

AZEVEDO, A. D. P.; POLISEL, K. C.; AMADEI, R. M. **Estudo piloto de termo secagem de lodo produzido na ETE central Ubatuba- São Paulo**. Caraguatatuba. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/II-356.pdf>>. Acesso em: 08 ago.2009.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. São Paulo, 2002.

FERREIRA, R. A. R.; NISHIYAMA, L. **Principais equipamentos e processos utilizados no condicionamento e tratamento do lodo de esgoto**. Uberlândia, 2003.

MELO, W. J. de. **Nível de fertilidade em solos tratados com biossólido oriundo da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri**. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos/nivel-fertilidade-solos/nivel-fertilidade-solos.shtml>>. Acesso em 07 ago.2009.

POGIANI, F.; Silva, P. H. M. da. **Programa de biossólidos e plantações florestais (PROBIO)**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/probio/>>. Acesso em 07 ago.2009.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO, **Sistema de tratamento de esgoto**. Aracruz, 2006. Disponível em: <<http://saaeara.com.br/arquivo/2006/Tratamento%20de%20Esgoto.pdf>>. Acesso em 10 out.2009.

ZEMPULSKI, M. F. S.; ZEMPULSKI, L. N. **Equipamentos e processo de secagem**. Curitiba, 2007.