

# RELATÓRIO 02 – DIAGNÓSTICA TECNOLÓGICO

**Prefeitura Municipal de Ubatuba**  
**Secretário Municipal de Meio Ambiente**  
Juan Jose Blanco Prada

**Coordenadora e Responsável Técnica:**  
Enga. Adva. Christiane Dias Pereira  
CREASP- 150191



**Contrato:**  
170/2015

**Novembro de 2015**



## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>6</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SEGUNDO A ÓTICA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	11
<b>2 PRECEITOS LEGAIS.....</b>	<b>13</b>
2.1 LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA.....	13
2.1.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	13
2.1.2 LEI NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO.....	16
2.1.3 PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	17
2.1.4 PLANO ESTADUAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE SÃO PAULO.....	18
2.1.5 PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE UBATUBA .....	18
<b>3 PANORAMA TECNOLÓGICO .....</b>	<b>20</b>
3.1 ASPECTOS GERAIS .....	20
3.2 TECNOLOGIA DE BIODIGESTÃO – TRATAMENTO BIOLÓGICO ANAERÓBIO .....	22
3.2.1 CLASSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO.....	25
3.2.2 FERMENTAÇÃO ÚMIDA .....	28
3.2.3 FERMENTAÇÃO SECA CONTÍNUA E DESCONTÍNUA .....	29
3.2.4 GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	30
3.2.5 BALANÇO HÍDRICO.....	31
3.3 TECNOLOGIA DE COMPOSTAGEM – TRATAMENTO BIOLÓGICO AERÓBIO .....	34
3.3.1 TECNOLOGIAS DE COMPOSTAGEM .....	36
3.3.2 SISTEMAS EXTENSIVOS .....	37
3.3.3 COMPOSTAGEM EM LEIRAS TRIANGULARES SEM AERAÇÃO FORÇADA.....	38



3.3.4	COMPOSTAGEM EM LEIRAS TRAPEZOIDAIS COM AERAÇÃO PASSIVA .....	39
3.3.5	SISTEMAS INTENSIVOS .....	40
3.3.6	COMPOSTAGEM EM LEIRAS TRIANGULARES COM AERAÇÃO FORÇADA .....	41
3.3.7	SISTEMA DE COMPOSTAGEM EM TÚNEL .....	43
3.3.8	COMPOSTAGEM EM LEIRA TABULAR.....	44
3.3.9	COMPOSTAGEM EM LEIRA TRAPEZOIDAL.....	46
<b>3.4</b>	<b>TECNOLOGIAS DE SECAGEM – TRATAMENTO BIOLÓGICO AERÓBIO.....</b>	<b>46</b>
<b>3.5</b>	<b>TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS.....</b>	<b>48</b>
3.5.1	PIRÓLISE .....	49
3.5.1.1	OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS .....	49
3.5.1.2	AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA.....	50
3.5.1.3	PIRÓLISE COMO PARTE DE INCINERAÇÃO POR SISTEMA DE FUSÃO .....	50
3.5.1.4	PIRÓLISE STAND-ALONE .....	51
3.5.1.5	PIRÓLISE COMO PROCESSO PRÉVIO .....	52
3.5.2	GASEIFICAÇÃO .....	52
3.5.2.1	OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS .....	52
3.5.2.2	AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA.....	54
3.5.3	PLASMA.....	56
3.5.3.1	OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS.....	56
3.5.3.2	PIRÓLISE DE PLASMA .....	57
3.5.3.3	GASEIFICAÇÃO DE PLASMA .....	58
3.5.3.4	AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA.....	59
3.5.4	CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC) .....	59
3.5.4.1	OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS.....	59



3.5.4.2	AVALIAÇÃO DE TÉCNICA .....	61
3.5.5	DESPOLIMERIZAÇÃO CATALÍTICA EM BAIXA PRESSÃO (KDV) .....	61
3.5.5.1	OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS .....	61
3.5.5.2	AVALIAÇÃO DA TÉCNICA .....	66
<b>4</b>	<b><u>REFERÊNCIAS DE PLANTAS DE TRATAMENTO</u></b> .....	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>NA EUROPA</b> .....	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>NA ALEMANHA</b> .....	<b>67</b>
4.2.1	EXEMPLOS DE PLANTAS DE TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO .....	71
<b>4.3</b>	<b>NO BRASIL</b> .....	<b>74</b>
<b>5</b>	<b><u>MATRIZ DE IMPACTO TECNOLÓGICO</u></b> .....	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>AVALIAÇÃO DE ROTA TECNOLÓGICA PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES</b> .....	<b>84</b>
<b>6</b>	<b><u>CONCLUSÃO</u></b> .....	<b>87</b>
	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b> .....	<b>89</b>



## Lista de figuras

Figura 1-1 - Hierarquia do gerenciamento dos resíduos firmada nas diretrizes da UE e na lei de circulação da economia na Alemanha (2012) .....	10
Figura 3-1 - Rotas tecnológicas de conversão energética de biomassa .....	21
Figura 3-2 - Desenvolvimento de tecnologias de fermentação secas e úmidas na Europa .....	25
Figura 3-3 - Parâmetros para escolha do processo de biodigestão .....	26
Figura 3-4 - Níveis de biogás produzidos pelos diferentes tipos de Fermentação .....	27
Figura 3-5 - Esquema de um biodigestor de mistura integral para fermentação úmida de forma contínua .....	28
Figura 3-6 - Balanço energético no processo termofílico para fermentação úmida, seca contínua e fermentação seca descontínua .....	30
Figura 3-7 - Porcentagem de emissões líquidas com base na quantidade de material encaminhado para o tratamento .....	32
Figura 3-8 - Variação do nível de temperatura na leira durante o processo de compostagem .....	35
Figura 3-9 - Leira de compostagem, sendo montada e revirada por pá-carregadeira	38
Figura 3-10 - Revolvimento de leira triangular .....	39
Figura 3-11 - Sistema de aeração passiva .....	40
Figura 3-12 – Leira de compostagem com aeração passiva .....	40
Figura 3-13 - Modelo didático de sistema de compostagem com aeração forçada e cobertura .....	42
Figura 3-14 - Sistema em leiras envelopadas com aeração forçada .....	42
Figura 3-15 - Perfil do túnel de compostagem intensiva .....	43
Figura 3-16 - Túnel de compostagem intensiva .....	44
Figura 3-17 - Perfil da leira de compostagem tabular .....	45
Figura 3-18 - Compostagem em leira plana e revolvível .....	45



Figura 3-19 - Esquema geral da carbonização hidrotérmica básica.....	60
Figura 3-20 - Produtos oriundos da conversão pela pirólise, gaseificação e combustão .....	62
Figura 4-1 – Plantas de TMB, EMB e EMF na Alemanha .....	69
Figura 4-2 - Fluxograma do tratamento mecânico-biológico com compostagem .....	72
Figura 4-3 - <i>Layout</i> do tratamento mecânico-biológico com compostagem .....	72
Figura 4-4 - Fluxograma do tratamento mecânico-biológico com biodigestão anaeróbia e compostagem.....	73
Figura 4-5 - <i>Layout</i> do tratamento mecânico-biológico com biodigestão anaeróbia e compostagem .....	73

## Lista de tabelas

Tabela 2-1 – Redução de percentual de resíduos secos.....	17
Tabela 2-2 - Redução de percentual de resíduos úmidos.....	17
Tabela 3-1 - Período de operação de plantas de fermentação para resíduos orgânicos e verdes.....	24
Tabela 3-2 - Vantagens e desvantagens: Fermentação Seca x Fermentação Úmida..	32
Tabela 3-3 - Dados Comparativos: fermentação seca contínua x descontínua (por batelada) .....	33
Tabela 3-4 - Sistematização das tecnologias aeróbia .....	37
Tabela 3-5 - Parâmetros para a categorização dos processos alternativos térmicos e termoquímicos.....	48
Tabela 3-6 - Comportamento de vários polímeros artificiais em diferentes temperaturas .....	63
Tabela 4-1 - Status quo relativo às instalações de tratamento para resíduos orgânicos e verdes (Base 2012) assim como as instalações de tratamento mecânico-biológico de resíduos domiciliares (Base 2011), todas as instalações situadas na Alemanha	70
Tabela 4-2 – Plantas em planejamento.....	74



Tabela 4-3 – Plantas contratadas entre 2010 e 2014 .....	75
Tabela 4-4 - A Alternativas tecnológicas para tratamento de RSU- licenciadas e em licenciamento no Estado de São Paulo.....	75
Tabela 5-1 – Classificação do grau de magnitude para a matriz de impacto tecnológico .....	79
Tabela 5-2 – Classificação da Avaliação para a matriz de impacto tecnológico.....	79
Tabela 5-3 - Formação da matriz de impactos tecnológicos – Fermentação úmida....	80
Tabela 5-4 – Formação da matriz de impactos tecnológicos – Fermentação seca contínua .....	81
Tabela 5-5 – Formação da matriz de impactos tecnológicos – Fermentação seca descontínua.....	82
Tabela 5-6 - Formação da matriz de impactos tecnológicos – Compostagem .....	83
Tabela 5-7 - Formação da matriz de impactos tecnológicos – Reciclagem.....	84
Tabela 5-8 – Formatação da matriz de impactos tecnológicos compilação de resultados .....	85



## 1 Introdução

Ao longo do tempo, foram construídas diferentes percepções sobre os resíduos produzidos pelo homem. Desde a perspectiva religiosa na Idade Média, em que os resíduos eram associados à doença, até uma visão mais ecológica nos nossos dias, desta forma a constituição dos resíduos ajuda a contar a história do desenvolvimento das civilizações.

Tidos como “inservíveis” até meados do século XX, os resíduos representaram por muito tempo um modelo de mercado baseado na coleta e disposição final em lixões ou aterros sanitários com predominância de empresas associadas à construção civil. Hoje, este mercado tornou-se uma oportunidade que une uma boa causa a um bom negócio, mais amplo e diversificado.

O mercado sustentável, do qual o manejo de resíduos faz parte, possui uma perspectiva favorável nos próximos anos no Brasil, principalmente devido ao potencial de escala estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), corroborado pelos Planos Estaduais e Municipais que tem eclodido nos últimos 5 anos.

As regras estipuladas na PNRS terminam com a dualidade do antigo sistema coleta-disposição final, inserindo na cadeia dos resíduos algumas obrigações que exigem maior complexidade operacional em decorrência da introdução de tecnologia no setor.

Atividades como o planejamento (plano de gerenciamento integrado), a logística reversa (recuperação de embalagens pós-consumo e equipamentos com a vida útil comprometida), o armazenamento temporário (contêineres), a educação ambiental (produção de comunicação ambiental), o tratamento de resíduos (incineração, tratamento mecânico biológico) e a disposição final (em aterros, do resíduo último), além das atividades subjacentes, inerentes a um sistema mais amplo de limpeza pública, como àquelas relacionadas à legalidade da atividade como o licenciamento, manutenção de plantas de tratamento, importação e transferência de tecnologia, relacionamento com o governo e mapeamento de linhas de financiamento, metodologia para gerenciamento de projeto, entre outras, fazem com que o funcionamento do sistema dependa, sobretudo, da gestão integrada.

Os mais novos descobrimentos quanto aos temas relativos à proteção dos recursos naturais e diminuição da emissão de gases de efeito estufa por meio de medidas de gerenciamento de resíduos foram levados em consideração durante a elaboração deste relatório. Experiências europeias e em especial na Alemanha foram tomadas como base durante a análise do conceito tecnológico, porém de forma adaptada, a fim de atender a diversidade dos resíduos brasileiros, as condições climáticas e as características locais de mercado.



Inicialmente é importante nivelarmos o conhecimento acerca das motivações que levaram a comunidade científica de todo o mundo a alertar os governos sobre os impactos ambientais oriundos dos resíduos sólidos. Se hoje a União Europeia (UE) possui diretivas determinando a obrigatoriedade do tratamento, assim como o Brasil (PNRS), foi porque houve debates de diferentes níveis que concluíram pela periculosidade de um manejo inadequado, principalmente para as futuras gerações que receberão como herança os passivos ambientais mais agressivos que a revolução industrial nos destinou.

Ainda, de acordo com as estimativas dos peritos de 8 a 12 % das emissões de gases de efeito estufa se produzem em países em desenvolvimento e países emergentes a partir dos processos de gerenciamento de resíduos. Uma causa fundamental são as emissões de metano originárias do aterramento de resíduos urbanos sem tratamento (in natura), os quais nestes países contêm uma alta parcela de fração orgânica. (Fricke em 2009).

A Alemanha tinha como técnica de referência a captação de biogás nos aterros e sua utilização energética na década de 90. No entanto, após certo período, identificou-se que os meios técnicos empregados permitiam apenas a captação de 40-60 % do biogás gerado no aterro, ou seja, apesar de toda tecnologia empregada, uma parcela relevante de emissões gasosas permanecia sendo lançada na atmosfera.

No que se refere ao comprometimento das águas subterrâneas resultante das emissões líquidas provenientes da decomposição biológica (chorume) e lixiviação, temos o aterramento de resíduos in natura, mesmo o enquadrado como sanitário, como um procedimento de proteção de caráter paliativo e temporário, onde sistemas de proteção, como as ferramentas de impermeabilização e o tratamento do chorume, perderão sua capacidade de funcionamento em um lapso máximo de 30 a 50 anos (quando considerada técnica de impermeabilização normatizada na Alemanha). Assim, contaminantes minerais e orgânicos são carregados para as águas subterrâneas inevitavelmente.

Diante deste quadro existe em alguns países da União Europeia (UE), como por exemplo Alemanha e Áustria, desde o ano 2005 a proibição legal de aterramento de resíduos in natura. Na UE esta proibição estará sendo realizada de forma escalonada nos próximos anos.

O tratamento dos resíduos visa atingir os seguintes objetivos:

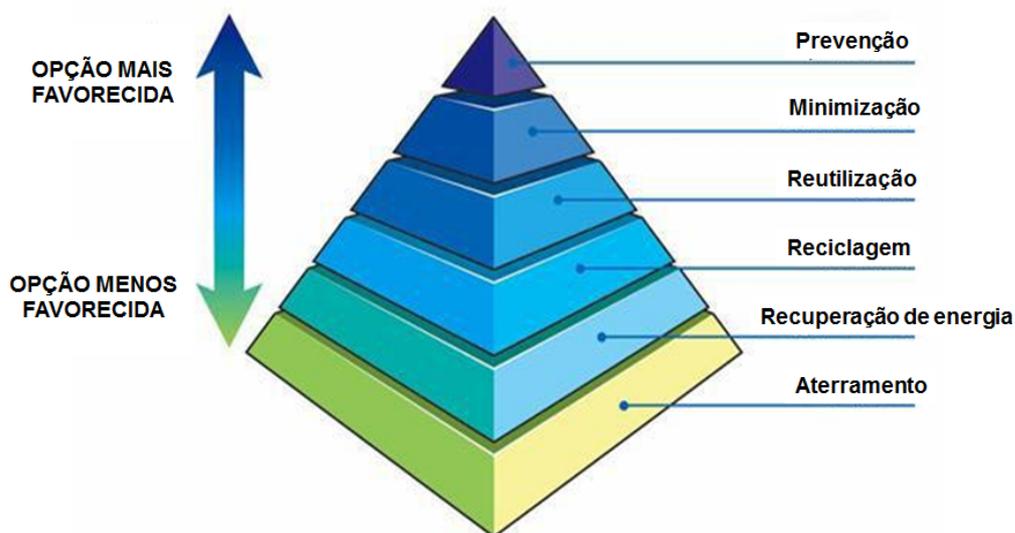
- 1) Inertização dos rejeitos através estabilização biológica das frações orgânicas, minimizando o potencial de emissão de biogás e da carga orgânica do chorume;
- 2) Diminuição da quantidade de resíduos a serem aterrados, tanto em massa quanto em volume, potencializando a vida útil do aterro;
- 3) Absorção e eliminação de substâncias contaminantes;

- 4) Reciclagem de materiais e recuperação energética dos resíduos visando a proteção dos recursos naturais.

O componente central da diretiva de resíduos da UE, que subordina todos os estados europeus, determina o gerenciamento integrado dos resíduos com foco na valorização contínua e cíclica através da hierarquização dos procedimentos em 5 graus. Esta hierarquia prioriza a reciclagem frente aos procedimentos de recuperação energética (veja Figura 1-1).

A médio prazo deve-se considerar o incremento dos preços relativos à matéria-prima primária, onde esta elevação alavancará a valorização da matéria-prima secundária resultando em uma evidente rentabilidade nas plantas de tratamento. Essa tendência é consubstanciada por outros mercados que dialogam intrinsecamente com a valorização de resíduos, como o caso do petróleo e de metais, como o aço, que aparecem como os primeiros subprodutos a garantir a viabilidade econômica de matéria prima reciclada, bem como o mercado de papéis. Portanto, o desenvolvimento do mercado para os materiais secundários estará voltado, em curto prazo, para a substituição das substâncias primárias comentadas. O mesmo se aplica à energia produzida pelo biogás e pelo combustível derivado de resíduos (CDR).

**Figura 1-1 - Hierarquia do gerenciamento dos resíduos firmada nas diretrizes da UE e na lei de circulação da economia na Alemanha (2012)**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2012.

Nos últimos 7 anos houve um aumento de mais que 100 % nos preços dos adubos, isto ocorreu devido à elevação do preço do fosfato. Futuramente também deve-se contar com o aumento de preços dos adubos alavancado pelo aumento do preço do nitrogênio devido ao gasto em energia durante sua produção (Procedimento Ha-



ber-Bosch) e pelo aumento do preço do fósforo devido à crescente demanda e a baixa oferta.

## **1.1 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SEGUNDO A ÓTICA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

O enorme volume de resíduos gerado diariamente nos centros urbanos tem trazido uma série de problemas ambientais, sociais, econômicos e administrativos, todos ligados a crescente dificuldade de implementar e manter áreas de disposição adequada destes resíduos.

Portanto é preciso conter a geração de resíduos e dar um tratamento adequado ao mesmo. Para isso, é preciso investir em tecnologias que permitam reaproveitar e reciclar os materiais em desuso. Não podemos mais encarar o resíduo como um “resto inútil”, e sim como algo a ser transformado em nova matéria prima para retornar ao ciclo produtivo de forma salutar.

O reconhecimento da importância de diversos atores sociais como responsáveis na gestão de resíduos sólidos, a valorização da reciclagem e a promoção de ações educativas para mudanças de valores e hábitos da sociedade são alguns dos elementos centrais para uma gestão integrada, descentralizada e compartilhada.

Os impactos diferenciados gerados pelos resíduos sólidos urbanos – RSU – justificam a necessidade de intervenções concretas, possíveis unicamente a partir do planejamento de programas de gerenciamento adequados. A utilização de ferramentas de gestão na solução do problema decorre da ampla variedade de resíduos gerados no cotidiano das cidades, exigindo distintas ações técnicas como solução. Faz-se então necessário o tratamento de materiais residuais passíveis de reinserção na atividade econômica maximizando significativamente o ganho ambiental conseqüente da minimização e reutilização dos “resíduos” através de sua valorização.

O termo resíduo engloba os diversos materiais utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente. Entretanto, a valorização de resíduos, que pode se efetivar de várias formas (reciclagem, reutilização, compostagem, biodigestão, entre outras) é a forma apropriada para se praticar o conceito do desenvolvimento sustentável. A utilização de ferramentas de gestão na solução do problema é legitimada tendo em vista a ampla variedade de resíduos gerados no cotidiano das cidades, exigindo distintas ações técnicas para sua resolução.

Diante do exposto é primordial o tratamento de resíduos utilizando-se técnicas adequadas que permitam a reinserção dos mesmos na atividade econômica, com foco nos recicláveis provenientes das coletas seletivas domiciliares, nos resíduos mistos da coleta tradicional, nos entulhos procedentes das atividades vinculadas à constru-



ção civil, madeiras de origem verde e seca, entre outros. A valorização de resíduos poupa recursos, reduz a poluição, restringe a ocupação de solos para disposição final, cria postos de trabalho, contribui para um desenvolvimento sustentável e para um ambiente melhor.

Propostas de plantas de gestão integrada deverão estar pautadas não apenas na capacidade de realização de atividades produtivas, mas no vínculo destas atividades com o programa de educação ambiental objetivando ações permanentes e acessíveis à sensibilização de toda a população para o consumo responsável e para as práticas desejáveis à participação no programa de coleta.

Quanto à disposição final, cresce também, sobretudo nos países desenvolvidos, a tendência de disposição do que se chama "resíduo último", ou seja, para os aterros sanitários só deverão seguir aqueles resíduos que já tiverem esgotado sua possibilidade de tratamento, aproveitamento e reciclagem. Deseja-se tirar do resíduo algum proveito, acelerando a sua inertização, minimizando e recuperando as áreas de disposição final. Assim, busca-se quebrar o ciclo unicamente acumulativo do resíduo, que polui o solo, a água e o ar e impede o uso futuro mais nobre das áreas dos aterros sanitários.

Dentro deste contexto, um aterro sanitário deve ser entendido como um lugar onde se confinam apenas os resíduos que tenham esgotado suas possibilidades de reutilização, valorização e tratamento sendo estes dispostos em condições controladas, minimizando assim os impactos ambientais.

A legislação da União Europeia e dos países membros, junto com medidas fiscais, formaram os pressupostos para a estratégia governamental de abandonar os métodos tradicionais de gestão de resíduos e de conscientizar a opinião pública acerca dos benefícios obtidos pelo uso do tratamento prévio.



## 2 Preceitos Legais

### 2.1 LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA

Ao nível federal, a aplicação de sistemas que comportam tecnologias de aproveitamento de resíduos é regulado por instrumentos legais dos campos de saneamento básico e energético, sendo que os principais são especificados a seguir.

Na área de saneamento básico os principais regulamentos são:

-  Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei no 12.305, de 02/08/2010) e seu decreto regulamentador (no. 7.404/2010)
-  Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB, Lei No. 11.445, de 05/01/2007) e seu decreto regulamentador (no. 7.217/2010).
-  Plano Nacional de Gerenciamento de Resíduos em revisão
-  Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo
-  Plano Municipal de Gestão de Resíduos de Ubatuba

#### 2.1.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Atualmente um destaque maior é dado à POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (Lei 12.305 de 2010) que é norteada pelos princípios básicos de minimização da geração, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final, seguindo esta ordem de prioridade. Para tanto, são definidos como diretrizes: o desenvolvimento de tecnologias limpas, alterações nos padrões de consumo e aperfeiçoamento da legislação. É interessante verificar que o documento considera a redução da periculosidade do material como uma forma de minimização de resíduos. São apresentados como instrumentos da Política de Gestão de Resíduos: os planos e programas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos; a capacitação técnica e valorização profissional; os instrumentos econômicos; a disseminação de informações; o licenciamento, o monitoramento e a fiscalização; as penalidades disciplinares e compensatórias; o apoio técnico e financeiro aos Estados, Distrito Federal e Municípios; a educação ambiental de forma consistente e continuada; a valorização dos resíduos.

Ao tempo que a PNRS impõe novos desafios ao setor privado, ao Poder Público também incumbem novas obrigações associadas aos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, visando concretizar os objetivos de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. E ainda, a reutilização e a recuperação energética conforme o artigo 9º, caput, e seu §1º.

Desta forma a PNRS aponta para a reestruturação da cadeia produtiva nacional, em razão da introdução dos conceitos de produção ecoeficiente, responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e logística reversa dos resíduos.

No âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei no 12.305, de 02/08/2010) e seu decreto regulamentador (no. 7.404/2010), alguns pontos a serem observados em projetos de aproveitamento energético da fração orgânica de RSU merecem ser destacados. O objetivo da redução de rejeitos, bem como o lançamento dos mesmos para disposição final adequada é um deles. (Art. 7, art. 9, art. 36), temos ainda no âmbito dos RSU que a PNRS:

-  Destaca o planejamento do setor, através de planos municipais de gestão integrada a serem elaborados até agosto 2012, além do plano nacional de gestão de resíduos sólidos, dos planos estaduais, e dos planos de gerenciamento de resíduos sólidos para geradores específicos. Segundo Pesquisa MUNIC de 2013, do IBGE, 1865 municípios declararam possuir planos de gestão integrada de resíduos. Em julho de 2015 o Senado Federal aprovou a prorrogação dos prazos para elaboração dos planos estaduais e municipais.
-  Destaca a erradicação dos lixões, através da obrigatoriedade de implementar aterros sanitários para os rejeitos até agosto 2014; (Art. 54) Em Julho de 2015 o Senado Federal aprovou a prorrogação escalonada do prazo de acordo com perfil do ente federativo, conferindo prazos mais longos para municípios com população inferior a 50 mil habitantes e mais curtos para as capitais de Estados e Municípios integrantes de região metropolitana ou de região integrada de desenvolvimento, que possuem maior população e maior capacidade orçamentária financeira. Assim as capitais e municípios de região metropolitana terão até 31 de julho de 2018 para acabar com os lixões. Os municípios de fronteira e os que contam com mais de 100 mil habitantes, com base no Censo de 2010, terão um ano a mais para implementar os aterros sanitários. As cidades que têm entre 50 e 100 mil habitantes terão prazo até 31 de julho de 2020. Já o prazo para os municípios com menos de 50 mil habitantes será até 31 de julho de 2021.
-  Valoriza em vários trechos a inclusão social, através da organização formal de catadores e a sua integração na gestão de resíduos, e a coleta seletiva de resíduos sólidos domésticos (Art. 18, art. 36);
-  Valoriza a regionalização da gestão de resíduos, através da priorização de financiamentos para consórcios intermunicipais (Art. 16);



- Introduz a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa para alguns grupos de resíduos.<sup>1</sup>

Especificamente em relação ao aproveitamento energético podemos citar os seguintes trechos da PNRS e do seu decreto regulamentador:

## **CAPÍTULO I - DISPOSIÇÕES PRELIMINARES**

Art. 9. Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§ 1. Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

## **CAPÍTULO V - DOS INSTRUMENTOS ECONÔMICOS**

Art. 42. O poder público poderá instituir medidas indutoras e linhas de financiamento para atender, prioritariamente, às iniciativas de:

VIII - desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos.

Decreto 7.404/2010:

### **TÍTULO IV - DAS DIRETRIZES APLICÁVEIS À GESTÃO E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**

Art. 36: A utilização de resíduos sólidos nos processos de recuperação energética, incluindo o co-processamento, obedecerá às normas estabelecidas pelos órgãos competentes.

Art. 37: A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010, assim qualificados consoante o art. 13, inciso I, alínea "c", daquela Lei, deverá ser disciplinada, de forma específica, em ato conjunto dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades.

Parágrafo único: O disposto neste artigo (Art. 37 – nota do autor) não se aplica ao aproveitamento energético dos gases gerados na biodigestão e na decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

---

<sup>1</sup> Embalagens de agrotóxicos e resíduos perigosos; pilhas e baterias; pneus; óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; produtos eletroeletrônicos e seus componentes.



## TÍTULO XI - DOS INSTRUMENTOS ECONÔMICOS

Art. 81: As instituições financeiras federais poderão também criar linhas especiais de financiamento para:

II - atividades destinadas à reciclagem e ao reaproveitamento de resíduos sólidos, bem como atividades de inovação e desenvolvimento relativas ao gerenciamento de resíduos sólidos.

### 2.1.2 LEI NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO

Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB, Lei No. 11.445, de 05/01/2007) e seu decreto regulamentador (no. 7.217/2010).

Conforme a LNSB, o saneamento básico é o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas.

A limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos são entendidos como o "conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do resíduo doméstico e do resíduo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas", sendo que neste contexto se inserem processos de aproveitamento energético de RSU.

Esta temática pode ser relacionada ao Art. 48 da LNSB: "a União, no estabelecimento de sua política de saneamento básico, observará as seguintes diretrizes: (IX) fomentar o desenvolvimento científico e tecnológico, a adoção de tecnologias apropriadas e a difusão dos conhecimentos gerados de interesse para o saneamento básico; e (X) minimizar os impactos ambientais relacionados à implantação e desenvolvimento das ações, obras e serviços de saneamento básico e assegurar que sejam executadas de acordo com as normas relativas à proteção do meio ambiente, ao uso e ocupação do solo e à saúde."

O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) aprovado em 2013 constituiu o eixo central da política federal para o saneamento básico, promovendo a articulação nacional dos entes da federação para a implementação das diretrizes da Lei 11.445/07. É instrumento fundamental a retomada da capacidade orientadora do Estado na condução da política pública de saneamento básico e, conseqüentemente, da definição das metas e estratégias de governo para o setor no horizonte dos próximos vinte anos, com vistas à universalização do acesso aos serviços de saneamento básico como um direito social. O plano estabelece diretrizes, metas e ações de saneamento básico até 2033. Os investimentos estimados para este período são de R\$ 508,4 bilhões. O Plansab prevê alcançar nos próximos 20 anos 99 % de cobertura no



abastecimento de água potável, e a universalização da coleta seletiva na parte de resíduos sólidos.

### 2.1.3 PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O plano nacional de resíduos sólidos elaborado em 2012 definiu como metas a redução tanto dos resíduos secos quanto úmidos (veja Tabela 2-1 e Tabela 2-2). Apesar de não ter sido editado encontra-se em fase de atualização pelo Ministério de Meio Ambiente.

Segundo Geraldo Reichert, Coordenador da Câmara Técnica de Resíduos Sólidos da ABES- nacional:

**Tabela 2-1 – Redução de percentual de resíduos secos**

Meta	Região	Plano de Metas				
		2015	2019	2023	2027	2031
Redução dos resíduos recicláveis secos dispostos em aterro, com base na caracterização nacional em 2013	Brasil	22	28	34	40	45
	Região Norte	10	13	15	17	20
	Região Nordeste	12	16	19	22	25
	Região Sul	43	50	53	58	60
	Região Sudeste	30	37	42	45	50
	Região Centro-oeste	13	15	18	21	25

Fonte: Geraldo Reichert - 2º Congresso técnico Brasil e Alemanha em Florinópolis, 2014.

**Tabela 2-2 - Redução de percentual de resíduos úmidos**

Meta	Região	Plano de Metas				
		2015	2019	2023	2027	2031
Redução do percentual de resíduos úmidos dispostos em aterros, com base na caracterização nacional realizada em 2013	Brasil	19	28	38	46	53
	Região Norte	10	20	30	40	50
	Região Nordeste	15	20	30	40	50
	Região Sul	30	40	50	55	60
	Região Sudeste	25	35	45	50	55
	Região Centro-oeste	15	25	35	45	50

Fonte: Geraldo Reichert - 2º Congresso técnico Brasil e Alemanha em Florinópolis, 2014.



#### **2.1.4 PLANO ESTADUAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE SÃO PAULO**

O Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo foi lançado em outubro de 2014 sendo um importante instrumento previsto nas Políticas Nacional e Estadual de Resíduos Sólidos, e que faz parte de um processo que objetiva provocar uma gradual mudança de atitude, hábitos e consumo na sociedade paulista.

O objetivo do plano é permitir ao Estado programar e executar atividades capazes de transformar a situação atual em uma condição desejada, de modo a aumentar a eficácia e a efetividade da gestão dos resíduos sólidos. O documento lida com questões de curto, médio e longo prazos, com vistas não só a resolver problemas imediatos, mas também a evitar e mitigar problemas futuros e potencializar boas práticas e soluções inovadoras na área.

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos é composto por quatro seções: o Panorama dos Resíduos, o Estudo de Regionalização e Proposição de Arranjos Intermunicipais, a Proposição de Cenários e as Diretrizes, Metas e Ações, que tratam de estratégias a serem adotadas ao longo de dez anos para assegurar a implementação do Plano Estadual, norteadas pela obrigatoriedade de adoção da hierarquização na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos – não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada dos rejeitos.

O plano estadual de resíduos sólidos elaborado pelo Governo do Estado em 2012 estabelece, de forma geral, as seguintes metas:

-  Meta 4.7 - Redução dos Resíduos Recicláveis Secos dispostos em Aterro (com base na caracterização nacional de 2013)

2019: 37 %; 2023: 42 % e 2025: 50 %

-  Meta 4.8 - Redução Percentual de Resíduos Úmidos dispostos em Aterros (com base na caracterização nacional de 2013)

2019: 35 % ; 2023: 45 % e 2025: 55 %

#### **2.1.5 PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE UBATUBA**

O plano foi construído de forma participativa pelos mais variados setores da sociedade civil e das partições públicas. Tendo como base os trabalhos desenvolvidos pela I Conferência Municipal do Meio Ambiente, celebrada em 2013, houve participação de centenas de pessoas nos trabalhos da I CMMA, especialmente dos delegados de cada região, tendo sido o mesmo oficializado juntamente com a Política Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos em 02 de Dezembro de 2014.



A política municipal estabelece como objetivos em seu art. 6º o incentivo à reciclagem, a redução de volume e da periculosidade dos resíduos, entre outras medidas e em seu art.9º firma como prioridades: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

### 3 Panorama Tecnológico

#### 3.1 ASPECTOS GERAIS

Os setores de gerenciamento de resíduos sólidos discutem hoje o resíduo como elemento chave para a gestão racional dos recursos naturais visando atender aos seguintes tópicos:

- 🌱 Proteção do clima – mitigando a emissão de gases de efeito estufa;
- 🌱 Aumento da eficiência dos recursos naturais – emprego de matéria-prima secundária.

Seguindo a tendência de valorização temos que a PNRS ratificou em suas diretrizes o processo de desenvolvimento e consolidação da efetiva Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos e incentivo à utilização de novas tecnologias de tratamento preliminarmente à disposição final. (FRICKE; PEREIRA, 2012, p. 3)

Sabe-se, portanto, que a expressiva geração de resíduos orgânicos em aterros sanitários implica em uma série de riscos ambientais caso não seja manejada de forma adequada, tais como: contaminação de mananciais, solo e subsolo por lixiviados, recalques e escorregamentos de aterros, combustão espontânea e emissão de gases de efeito estufa (BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006, p. 4-5).

Havendo uma gestão adequada das frações orgânicas não apenas controlam-se os mencionados riscos, mas também se garante a transformação da massa orgânica em material condicionante de solos e em energia.

É de domínio público que a Alemanha é tida como celeiro de tecnologias para a valorização de resíduos, expandindo suas atuações em todo o mercado europeu, asiático e africano. Atualmente sua participação no mercado de tratamento de resíduos transpassou o simples fornecimento de maquinários e tecnologias alcançando ações que vão desde desenvolvimento e implementação de sistemas de monitoramento até a definição de fontes jurídicas para regulamentação dos mercados de resíduos, situação esta que pode ser apontada em nosso artigo 9º da PNRS que é replica da normativa alemã para gestão de resíduos.

Após a adoção de opções de redução na fonte e reaproveitamento, deve-se buscar o tratamento dos resíduos de modo a reduzir o seu volume, carga orgânica ou toxicidade.

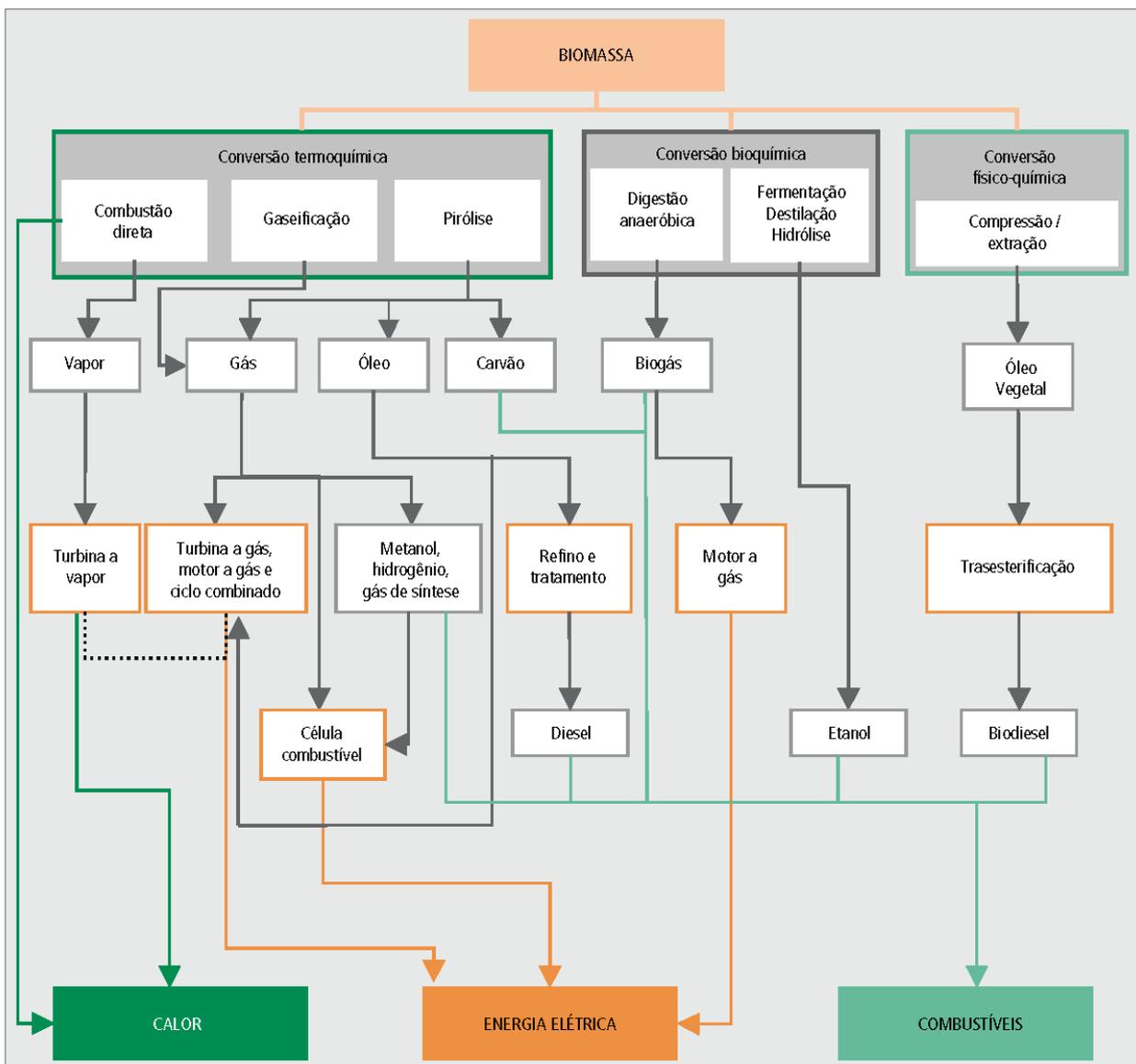
Segundo Schmidt (2011) em relatório "*Organic Waste to Energy: Estudo sobre o Aproveitamento Energético da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil – Tecnologias, Estado da Arte e Perspectivas*", pode-se definir energia renovável como fontes de energia que se renovam constantemente e com rapidez através de proces-

solos naturais, como, por exemplo, energia solar, eólica, geotérmica, marítima e de biomassa.

Ainda define Schmidt (2011), que o aproveitamento energético da biomassa se dá através de processos de transformação físico-químicos (carbonização, gaseificação, pirólise), termoquímicos (prensagem, extração) e bioquímicos (fermentação alcoólica, decomposição aeróbia e anaeróbia).

A Figura 3-1 apresenta a utilização dos resíduos como fonte energética, alguns processos de conversões químicas e bioquímicas e seus respectivos produtos.

**Figura 3-1 - Rotas tecnológicas de conversão energética de biomassa**



Fonte: BRASIL. Ministério de Minas e Energia, 2009.



Conforme apresentou Schmidt (2011) em relatório “Organic Waste to Energy: Estudo sobre o Aproveitamento Energético da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil – Tecnologias, Estado da Arte e Perspectivas”:

Existem três rotas tecnológicas para a utilização do resíduo como fonte energética. Uma delas é a combustão direta dos resíduos sólidos. Outra é a gaseificação por meio da termoquímica (produção de calor por meio de reações químicas). Finalmente, a terceira (mais utilizada para a produção do biogás) é a reprodução artificial do processo natural em que a ação de micro-organismos em um ambiente anaeróbio realiza a decomposição da matéria orgânica e, em consequência, a produção do biogás. (SCHMIDT, 2011, p. 39)

A recuperação de biogás – seja gerado em aterros energéticos ou em biodigestores – e consequente geração de energia por combustão do gás deve estar atrelada a uma destinação otimizada de resíduos sólidos. Dentro de uma gestão integrada de resíduos que engloba coleta seletiva, reuso, reciclagem de matérias e captação de biogás, têm-se um balanço energético fortemente positivo, pois acumula a economia de energia advinda da produção de bens a partir de matéria-prima secundária, em vez de extração de matéria-prima virgem, ainda os ganhos energéticos em função de uma logística otimizada e substitui os fertilizantes químicos pelo uso do substrato da biodigestão em projetos de agricultura periurbana.

O estudo Renewables (2007) Global Status Report, da REN21, informa que, apesar de pequena, a aplicação comercial de usinas a biogás nos últimos anos tem apresentado significativo crescimento nos países em desenvolvimento, particularmente na China e Índia. Países desenvolvidos, como Alemanha e Estados Unidos, também têm utilizado os resíduos urbanos e industriais para a produção de energia. (SCHMIDT, 2011, p. 18)

### **3.2 TECNOLOGIA DE BIODIGESTÃO – TRATAMENTO BIOLÓGICO ANAERÓBIO**

Após o conhecimento da atividade desses microrganismos, os produtos das indústrias derivados do leite e de bebidas alcoólicas fazem parte do setor mais importante da bioindústria de alimentos (ZEHNDER; SVENSSON, 1986 citados por FORESTI; FLORÊNCIO; VAN HAANDEL; ZAIAT; CAVALCANTI, 1999, p. 29).

A digestão anaeróbia é um processo biológico no qual um consórcio de diferentes morfotipos de microrganismos, na ausência de oxigênio molecular, promove a transformação de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em produtos mais simples como o metano e gás carbônico. Nos sistemas de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos, procura-se acelerar o processo da digestão, criando-se condições favoráveis para os microrganismos, tanto no que se refere à etapa de projeto quanto na de operação (BRASIL/MCT, 2006).



O processo de fermentação ganhou nos últimos anos cada vez mais destaque no mercado de gestão de resíduos impulsionado pela valorização das energias provenientes de fontes regenerativas. Tanto a tecnologia de fermentação como os diversos conceitos de utilização de biogás alcançaram maturidade no mercado e superaram as dificuldades operacionais iniciais.

As técnicas de fermentação encontram-se consolidadas e disponíveis no mercado diferindo quanto ao teor de frações secas que alimentarão o fermentador, temperatura de processo bem como quanto ao fluxo de resíduos. As técnicas variam de forma geral entre a fermentação seca, úmida e de forma específica entre fermentação seca contínua e descontínua.

Os processos de fermentação são designados como secos ou úmidos segundo o índice de substância sólida presentes em seu interior, onde processos de fermentação seca operam com índices de 20 a 55 % de substâncias secas.

No processo de fermentação úmida, o substrato é misturado até um índice de substância seca de até 20 % através da adição de líquido, geralmente água oriunda da prensagem das frações fermentadas e que recircula no processo, por vezes é necessária adição suplementar de água da rede. Esta mistura ocorre até que seja possível misturar e bombear a massa. Nessa etapa processual são excluídos materiais inertes como areias e pedras, que podem ocasionar problemas técnicos ao processo e quando são excluídos permitem um enriquecimento orgânico da massa.

Nos últimos anos foram adaptados processos inovadores para a preparação de substratos através do processo úmido. Variantes foram instituídas nos processos na forma de introdução de frações que garantam um maior ganho energético como os resíduos verdes. Ainda introduziu-se o sistema de compostagem ao término da fermentação. Também se otimizou a gestão dos líquidos processuais buscando sua recirculação e melhorando o sistema de prensagem. O objetivo do processo de percolação é atingir uma quantidade de percolados capazes de transportar os componentes orgânicos presentes nos resíduos na fase líquida que serão empregados durante a fermentação úmida.

Os processos de fermentação úmida mostraram bons resultados especialmente no aproveitamento de resíduos alimentícios e resíduos sólidos biogênicos comerciais, mas não para resíduos domiciliares. (FRICKE; PEREIRA, 2012, p. 43-45)

As técnicas de fermentação e os procedimentos de operação tiveram desenvolvimento significativo nos últimos anos, onde durante a década de 1990 prevaleceu a introdução de técnicas úmidas com implantações proporcionais dos estágios únicos ou duplos.

Avaliando os dados captados no relatório "Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe. Endbericht zu Förderprojekt 03 KB 022" (FRICKE, 2013),

a partir do ano 2000, foram instalados quase que exclusivamente os processos de fermentação secos. Atualmente esta tendência permanece e pode ser notada nas plantas que estão em fase de construção, ou seja, todas as plantas em construção privilegiam as técnicas de fermentação a seco. Conforme retratado no relatório, das 63 plantas de fermentação, 46 são operadas a partir do método seco. Desde 2004, 36 plantas foram construídas com processos secos e apenas cinco com processos úmidos (Tabela 3-1).

**Tabela 3-1 - Período de operação de plantas de fermentação para resíduos orgânicos e verdes, diferenciadas segundo os tipos de técnica e de operação**

	Quantidade							
	Total	antes de 1995	1995-1997	1998-2000	2001-2003	2004-2006	2007-2009	2010-2011
Total	63	1	11	9	1	10	18	13
<b>Processo úmido</b>	17	1	7	4	0	4	1	0
Um estágio	8	0	4	2	0	1	1	0
Dois estágios	9	1	3	2	0	3	0	0
<b>Processo seco</b>	46	0	4	5	1	6	17	13
Contínuo	21	0	3	5	1	3	5	4
Descontínuo	25	0	1	0	0	3	12	9
Um estágio	54							
Dois estágios	9							

Fonte: Fricke, 2013.

Nos últimos cinco anos identificou-se também na Europa a mesma tendência que a demonstrada na Alemanha, onde os processos secos tiveram suas implementações privilegiadas. Esta tendência torna-se mais evidente quando são avaliadas as plantas de fermentação voltadas para o tratamento dos resíduos domiciliares (DE BAERE; MATTHEUWS, 2010, citados por FRICKE, 2013).

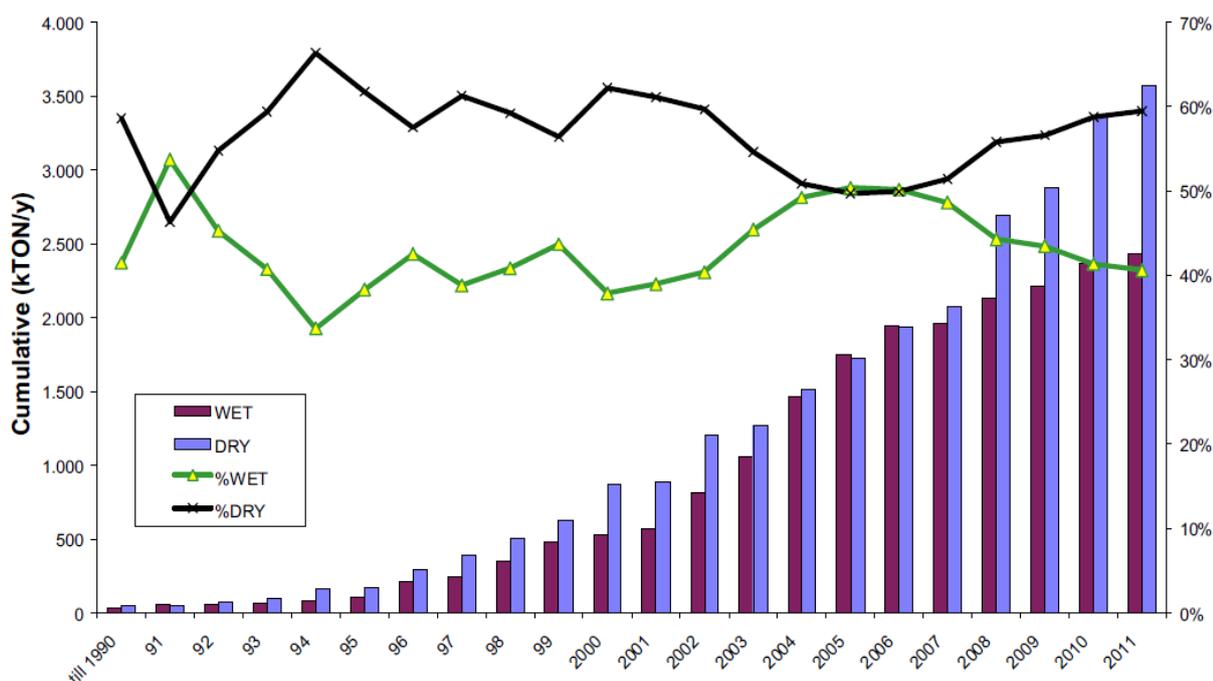
Considerando os procedimentos de operação, respectivamente estágio único ou duplo, para a fermentação de resíduos sólidos, destaca-se a tendência de utilização do método seco em detrimento do processo por via úmida. Assim, processos em duas fases, inevitavelmente, se tornarão menos importantes.

Em todos os tipos de fermentadores tem-se o processo de sedimentação de materiais pesados como uma das perturbações mais frequentes, fazendo com que se intensifique a busca por processos que minimizem a presença dessas substâncias no corpo do fermentador. Mesmo que medidas mitigadoras sejam empregadas, deve-se considerar a necessidade de abertura do fermentador para retirada de sedimentos, estes encaminhados para aterramento. Neste contexto, há necessidade de disposição de peças de reposição para um ajuste rápido do equipamento, quando do seu

desgaste ocasionado pela alteração das viscosidades e pela presença de materiais abrasivos que podem comprometer o funcionamento do eixo de mistura do fermentador.

A Figura 3-2 mostra o desenvolvimento ao longo dos anos de tecnologias de fermentação secas e úmidas na Europa.

**Figura 3-2 - Desenvolvimento de tecnologias de fermentação secas e úmidas na Europa**



Fonte: De Baere e Mattheeuws 2010, citados por Fricke, 2013.

### 3.2.1 CLASSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO

Os critérios técnicos para a escolha de um processo de biodigestão decorrem, via de regra, em função da oferta e da qualidade do substrato inicial (SCHMIDT, 2011, p. 42).

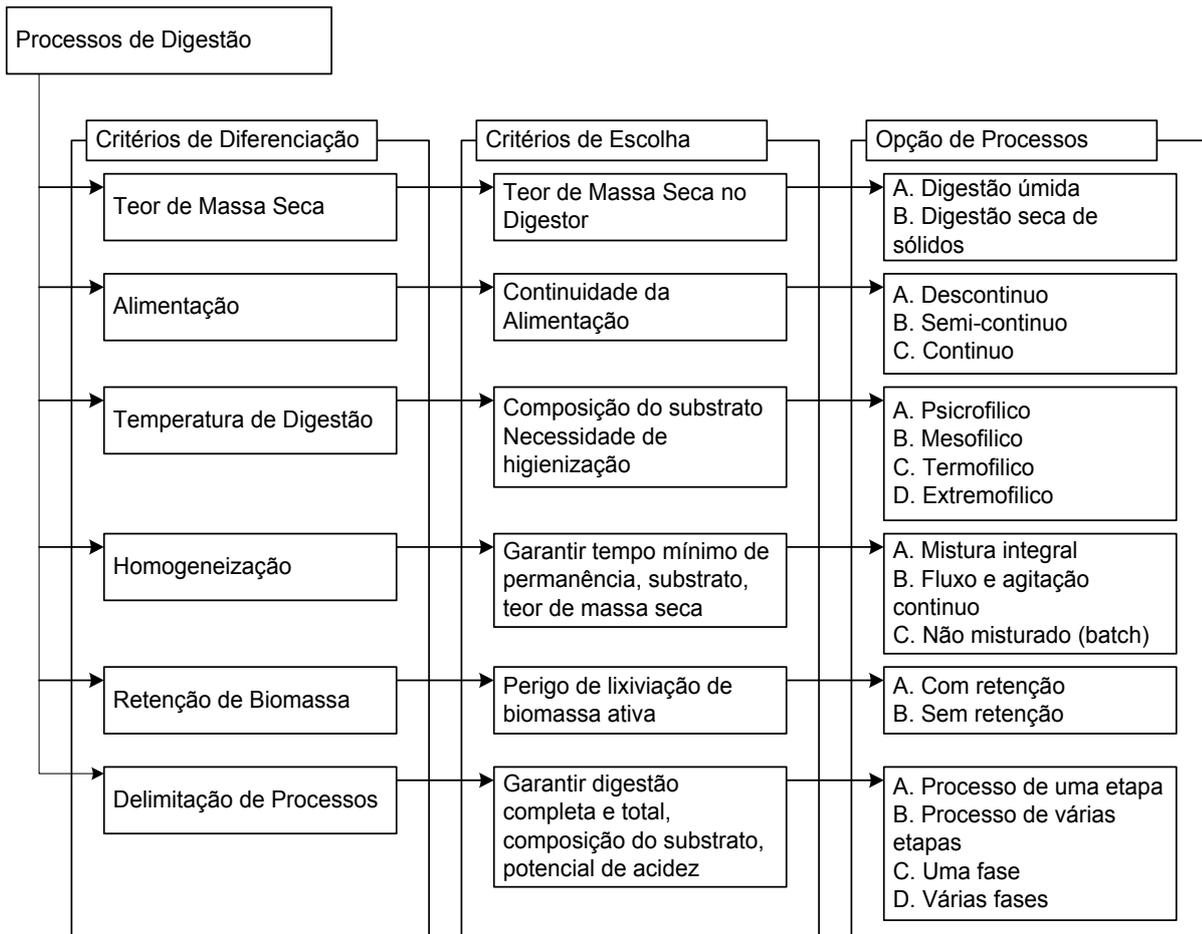
Conforme relata Schmidt (2011) em relatório "Organic Waste to Energy: Estudo sobre o Aproveitamento Energético da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil – Tecnologias, Estado da Arte e Perspectivas", os processos de fermentação podem ser diferenciados segundo:

- Taxa de massa seca do conteúdo do fermentador;
- Forma de carregamento do substrato a ser fermentado;
- Temperatura de fermentação;
- Forma de homogeneização;

- Forma de processamento da biomassa ativa, especificamente na fermentação de substratos de baixo valor de massa sólida, por exemplo, o esgoto;
- Forma de separação e interligação dos processos parciais.

Estas opções são classificadas e descritas na Figura 3-3:

**Figura 3-3 - Parâmetros para escolha do processo de biodigestão**



Fonte: Schmidt, 2011.

Segundo Schmidt (2011), em relatório "Organic Waste to Energy: Estudo sobre o Aproveitamento Energético da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil – Tecnologias, Estado da Arte e Perspectivas", a diferenciação em processos de fermentação úmida e seca depende do teor de massa seca do conteúdo do fermentador, que de qualquer forma precisa de um meio que oferece umidade suficiente para o desenvolvimento e sobrevivência dos micro-organismos.

Uma linha clara de diferenciação entre fermentação úmida e seca não é bem definida, não obstante esta diferenciação ocorre na prática da seguinte forma: no

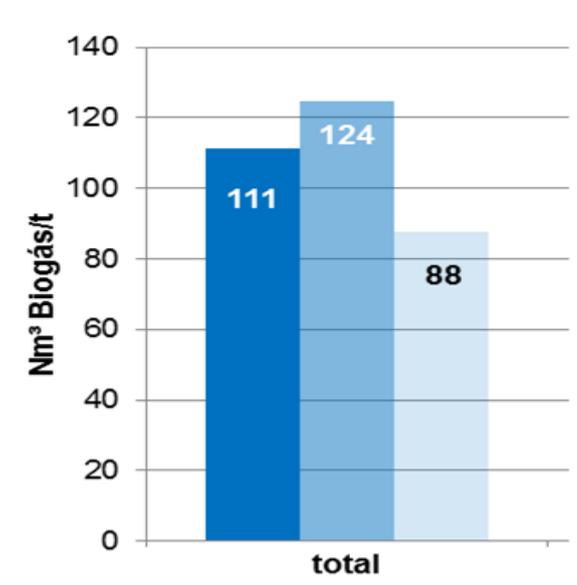
processamento de substratos provenientes de plantas energéticas, num teor de massa seca até 20 % utiliza-se a fermentação úmida, por o substrato ainda apresentar características que permitem o seu bombeamento. Quando o teor de massa seca excede 20 %, geralmente trata-se de um substrato que não é mais bombeável e, portanto, processos de fermentação seca são indicados, conforme relata Schmidt (2011).

O princípio de funcionamento do biodigestor é diretamente interligado com o processo de digestão, que por sua vez depende do substrato inicial. As opções tecnológicas mais comuns são processos de mistura integral, de fluxo contínuo e agitação constante, e o biodigestor modular em batelada (batch process). Além disso, existem processos combinados e especiais (SCHMIDT, 2011).

De acordo com o relatório “Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe” – elaborado por Fricke, em 2013, literatura – no que se refere a produção de biogás, temos que a fermentação úmida é mais eficiente, seguida da seca contínua. Porém, a desvantagem identificada no potencial de geração de biogás é compensada quando se avalia os métodos de fermentação úmida e seca contínua que demandam um material de entrada bastante limpo e em dimensões menores que 50 mm, possuem custos de manutenção mais elevados e geram efluentes líquidos que podem exigir tratamento.

A Figura 3-4 a seguir apresenta as diferentes variações e níveis de produção de biogás dos três tipos de fermentação abordados nesse trabalho.

**Figura 3-4 - Níveis de biogás produzidos pelos diferentes tipos de Fermentação**



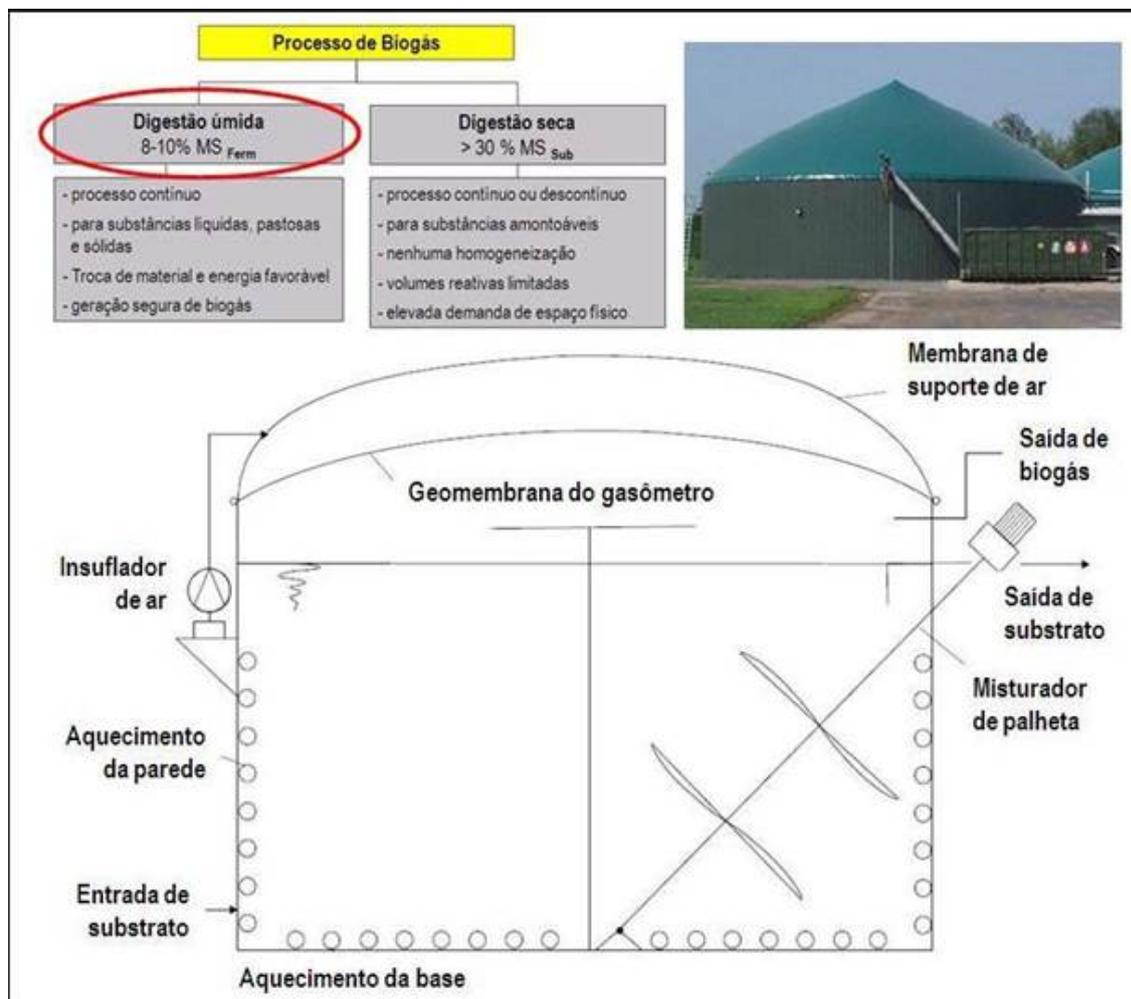
Fonte: Fricke e Pereira, 2013a.

### 3.2.2 FERMENTAÇÃO ÚMIDA

Segundo Schmidt (2011) em relatório “Organic Waste to Energy: Estudo sobre o Aproveitamento Energético da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil – Tecnologias, Estado da Arte e Perspectivas”, o processo de mistura integral (Continuously Stirred Tank Reactor – CSTR) é muito utilizado na digestão de resíduos da agricultura e da pecuária, estes de estrutura homogênea, representando aproximadamente 90 % dos sistemas de biogás instalados.

O biodigestor dispõe de uma base em concreto e paredes em aço ou concreto armado, podendo ser enterrado parcialmente ou totalmente enterrado. A cobertura do biodigestor é selada, impermeável ao gás, podendo ser uma membrana de geotêxtil ou laje de concreto. A mistura integral é realizada por uma grande variedade de sistemas de misturadores, conforme ilustrado na Figura 3-5.

Figura 3-5 - Esquema de um biodigestor de mistura integral para fermentação úmida de forma contínua



Fonte: Adaptado pelo autor, 2013 na base de Schmidt, 2011



Existem várias opções para induzir a mistura do substrato no biorreator. Há sistemas de mistura induzida (através de misturadores mecânicos ou injeção de gás), tanto para sistemas de mistura integral quanto para sistemas de fluxo contínuo e agitação constante (PlugFlow), conforme relata Schmidt (2011).

### **3.2.3 FERMENTAÇÃO SECA CONTÍNUA E DESCONTÍNUA**

No sistema contínuo, o fermentador é abastecido de forma constante com frações orgânicas frescas e resíduos fermentados. Tem-se uma geração de biogás contínua preservando sua qualidade no que se refere ao teor de metano.

Este sistema opera com um índice de frações sólidas entre 20 e 40 % onde as frações orgânicas são misturas com os líquidos processuais formando uma massa semissólida homogênea. Ao contrário de processos de fermentação úmidas em que os fermentadores são concebidos como reatores de mistura completo, na fermentação seca contínua predominam os fermentadores na forma de corrente de enxerto, onde os materiais são continuamente enxertados, transportados e fermentados.

Os processos de fermentação foram sofrendo transformação durante as últimas décadas sendo desenvolvido o sistema seco contínuo e, logo em seguida, o seco descontínuo, este a versão mais moderna da fermentação e classificado da seguinte forma:

O processo de digestão da massa seca acontece em espaços fechados na forma de garagens ou containers e é umedecida por líquidos processuais. O substrato é introduzido nos túneis de fermentação por uma pá-carregadeira e permanecerá até o término da fermentação. O fermentador permanecerá em operação durante algumas semanas então será aberto, descarregado e recarregado.

Assim, não há uma produção regular e de qualidade do biogás, devendo o sistema ser compensado quando da instalação de diversos túneis de fermentação que operam paralelamente em fases diferentes e também de tanque de percolação, garantindo assim índices totais de biogás de qualidade e regular. Os resíduos fermentados não precisam sofrer ação mecânica de prensagem, portanto não geram emissão líquida.

As técnicas de fermentação seca vêm sendo empregadas nos últimos anos para a valorização dos resíduos orgânicos de origem domiciliar e verdes.

Não há necessidade do emprego de técnicas de trituração, afastamento de contaminantes ou mesmo mistura com resíduos fermentados. O biogás é produzido pela degradação biológica nos túneis e também durante a decomposição dos líquidos armazenados no tanque de percolados. Este tanque tem a finalidade de garantir o umedecimento da massa e ainda a homogeneidade da carga de metano presente

no biogás. O percolado é recirculado, de modo que apenas uma pequena fração permanece na forma de emissão líquida devendo ser encaminhado para tratamento.

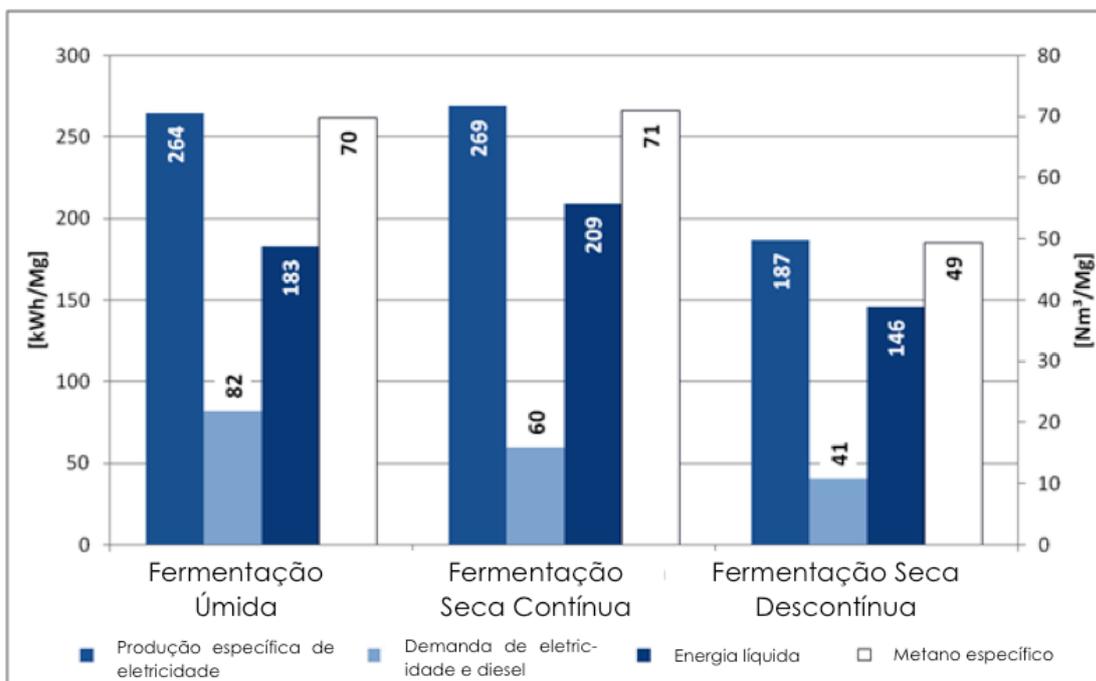
Os métodos oferecidos no mercado diferem principalmente quanto a concentração de percolados (periodicamente, intermitentemente ou continuamente) e o aquecimento do fermentador (pré-aquecimento biológico por ventilação, aquecimento do fermentador, aquecimento dos líquidos percolados), Schmidt (2011).

### 3.2.4 GERAÇÃO DE BIOGÁS

Avaliando os dados apresentados em “Apresentação técnica para módulo gestão de resíduos aplicado no curso de mestrado Engenharia Urbana e Ambiental na PUC-Rio” pelo Prof. Dr. Klaus Fricke da Universidade Técnica de Braunschweig, em março de 2013 (FRICKE; PEREIRA, 2013a), temos que o rendimento da geração de biogás não difere de forma significativa entre as tecnologias secas e úmidas. A fermentação seca descontínua tem uma geração inferior variando entre 80 até 117 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t e a contínua entre 100 até 130 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t.

A Figura 3-6 apresenta o balanço energético em processo termofílico para a fermentação úmida, seca contínua e seca descontínua.

Figura 3-6 - Balanço energético no processo termofílico para fermentação úmida, seca contínua e fermentação seca descontínua



Fonte: Fricke, Heussner, Huttner, Turk e Biblingmaier, 2013a.



Para a operação da planta é necessária energia na forma de calor e elétrica, que pode ser obtida com o processamento do biogás. A demanda de energia é menor na fermentação seca descontínua, consumindo de 3-10 % da energia elétrica e cerca de 10-20 % da energia térmica gerada a partir da fermentação. O consumo de energia é significativamente superior na fermentação úmida e seca contínua onde a concepção tecnológica é diferente contemplando mecanismos que demandam maior consumo (procedimento mecânico para mistura da massa orgânica e ainda maior necessidade de calor pela atividade termofílica) (UMWELTBUNDESAMT (UBA), 2010).

### 3.2.5 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico e suas consequências constituem parâmetros importantes para a decisão quanto a tecnologia a ser empregada.

Os líquidos são introduzidos no processo de fermentação contínua em decorrência da prensagem da massa fermentada. Uma porção desse líquido permanece recirculando no processo sendo que a maior parte dos líquidos gerados deverão ser encaminhados para tratamento. Na fermentação seca contínua e também na fermentação úmida tem-se um balanço hídrico com excedente que pode alcançar 20 – 30 % da massa encaminhada para processamento. Para tal estas plantas demandam a instalação de um tanque para armazenagem destes líquidos e futuro tratamento. Os lodos presentes nestes tanques podem ser misturados com as frações compostadas e serem empregados como condicionador de solos.

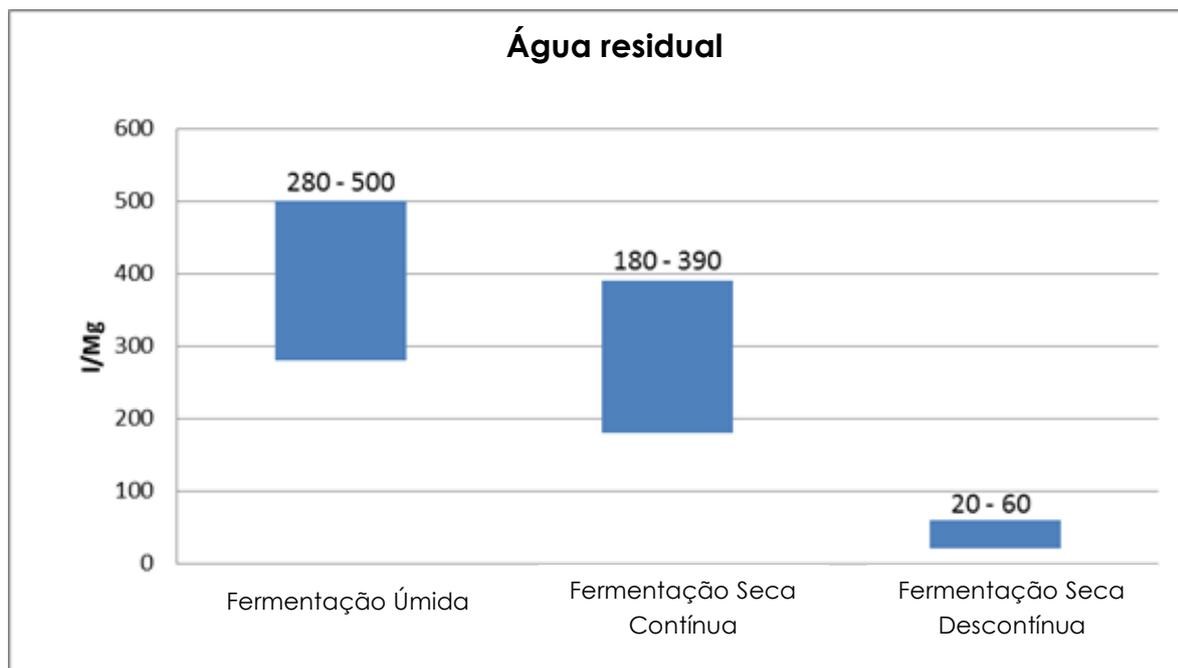
Na Alemanha, onde a coleta de resíduos orgânicos ocorre de forma seletiva, determinando uma massa descontaminada para o processamento, os líquidos gerados são qualificados como fertilizantes orgânicos e são doados aos agricultores da região, afastando assim os custos atrelados ao tratamento destes líquidos.

Segundo pesquisas anteriores estima-se que no Brasil, pela característica de nossa coleta mista, estes resíduos líquidos não poderão ser empregados como fertilizante líquido, mas serão classificados como chorume. De qualquer forma, torna-se essencial a realização de análises físico-químicas destes resíduos.

Na fermentação seca descontínua também há emissão de líquidos na ordem de 2 – 8 % da massa processada. Esta proporção decorre do sistema sucessivo de recirculação e devido à baixa quantidade sobressalente dispensa-se a implementação de um tanque extra de armazenamento, sendo que os líquidos são introduzidos integralmente no sistema.

A Figura 3-7 a seguir mostra a geração de emissões líquidas proporcionalmente a quantidade de resíduos encaminhados para tratamento.

**Figura 3-7 - Porcentagem de emissões líquidas com base na quantidade de material encaminhado para o tratamento**



**Fonte: Fricke, Heussner, Huttner, Turk e Biblingmaier, 2013a.**

As tecnologias de ordem biológicas são aplicadas em meios aeróbios e anaeróbios, voltadas para a recuperação energética e produção de composto e biomassa. A base de análise flutua entre as tecnologias anaeróbias de fermentação, úmida e seca (contínua e descontínua) e a aeróbia (compostagem para produção de adubo ou de biomassa). Estas tecnologias podem ser aplicadas isoladamente, apenas a fermentação ou a compostagem ou na forma de combo tecnológico, introduzindo a tecnologia de fermentação anteriormente ao processo aeróbio.

A Tabela 3-2 apresenta as principais características e divergências entre os processos de fermentação seca e fermentação úmida.

**Tabela 3-2 - Vantagens e desvantagens: Fermentação Seca x Fermentação Úmida**

Fermentação Seca	Fermentação Úmida
O abastecimento de frações orgânicas permanece de forma estacionária no processo, eliminando partes móveis e resultando em um sistema com baixo custo de manutenção e de reparos.	O sistema exige partes mecânicas para garantir a circulação da biomassa líquida no tanque, aumentando os custos de manutenção e reparos.
Processos por batelada e sistemas estacionários permitem controles precisos da recuperação de energia garantindo o máximo aproveitamento.	Mistura líquida provoca remoção prematura da energia sem que a fração orgânica tenha sido integralmente digerida, resultando em perda de energia.

<b>Fermentação Seca</b>	<b>Fermentação Úmida</b>
Balanço de líquidos equilibrado – não há necessidade de adição extra de líquidos para início do processo, em alguns casos é necessário tratamento das emissões líquidas geradas em caráter sobressalente.	Sistema exige adição extra de líquidos para garantir a fermentação, aumentando significativamente a emissão de águas residuais e os respectivos custos de tratamento.
Sendo as frações exclusivamente orgânicas não há necessidade de tratamento mecânico preliminarmente ao biológico, reduzindo assim custos de investimento e de operação.	Mesmo sendo as frações exclusivamente orgânicas há necessidade de tratamento mecânico preliminarmente ao biológico, para não avariar os maquinários através da agitação da massa, incrementando assim os custos de investimento e de operação.
Restrições limitadas dos resíduos para fermentação.	Restrições amplas quanto aos resíduos para fermentação, devendo ser encaminhados apenas as massas úmidas.
Baixo consumo de energia, podendo ser usada uma fração pequena da energia gerada, máximo 10 % de consumo próprio.	Sistemas típicos consomem de 10 – 30 % da energia gerada na planta e para o tratamento das emissões líquidas é necessária energia suplementar.
Baixo volume de fermentador.	Alto volume de fermentador (a partir de fator 3)
Entrada de frações orgânicas reduzidas de forma significativa e a geração emissões líquidas é limitada, reduzindo o risco de contaminação das águas subterrâneas.	Emissões líquidas elevadas podem alcançar até 70 % da massa processada, requerendo alta quantidade de energia para o tratamento e aumentando os riscos de contaminação das águas subterrâneas.

Fonte: Fricke, 2013.

A Tabela 3-3 apresenta as principais características e divergências entre os processos de fermentação seca contínua e descontínua (por batelada).

**Tabela 3-3 - Dados Comparativos: fermentação seca contínua x descontínua (por batelada)**

<b>Fermentação seca por batelada</b>	<b>Fermentação seca contínua</b>
Necessidade de tratamento mecânico para preparo do material antes da fermentação.	Necessidade de tratamento mecânico mais intenso para preparo do material antes da fermentação.
Não há necessidade de homogeneização mecânica no fermentador. Não há componentes mecânicos no fermentador.	Há necessidade de homogeneização mecânica no fermentador. Há componentes mecânicos no fermentador acarretando corrosão e abrasão nestes componentes.
Baixo risco de variação no fermentador pela interrupção da atividade biológica e quando de alguma complicação a atividade biológica inicia-se imediatamente.	Risco de variação na fermentação pela interrupção da atividade biológica e quando de alguma complicação a atividade biológica precisa de um período maior para ser reestabelecida.

<b>Fermentação seca por batelada</b>	<b>Fermentação seca contínua</b>
Nenhuma fase de prensagem ao término do processo, reduzindo a geração de emissões líquidas com alto teor de carga orgânica.	Necessidade de fase de prensagem ao término do processo, geração elevada de emissões líquidas com alto teor de carga orgânica.
Produção inferior de biogás – cerca de 90 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / t de resíduos orgânicos.	Produção superior de biogás – cerca de 120 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / t de resíduos orgânicos.
Baixo emprego de energia decorrente do tratamento mecânico simplificado, da ausência de componente mecânico no fermentador e da dispensa de sistema de prensagem da massa antes da compostagem.	Elevado emprego de energia decorrente do tratamento mecânico mais complexo, da presença de componente mecânico no fermentador e da necessidade de sistema de prensagem da massa antes da compostagem.
Volume de fermentação superior.	Volume de fermentação inferior.
Sistema robusto em consequência menor susceptibilidade.	Sistema mais frágil em consequência maiores riscos de complicações durante a fermentação e prensagem.

Fonte: Fricke, 2013.

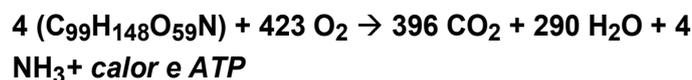
### 3.3 TECNOLOGIA DE COMPOSTAGEM – TRATAMENTO BIOLÓGICO AERÓBIO

Em “Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILBRECHT; SCHULZ, 2007), é exposto que:

Sob condições aeróbias, todos os componentes biológicos formados através dos micro-organismos são biodegradáveis. Este efeito é conhecido pela expressão “onipotência bioquímica”. O processo total de degradação microbiológica aeróbia pode ser resumido da seguinte forma:

Componentes orgânicos + oxigênio = dióxido de carbono + água + energia

Para modelagem da constituição da substância orgânica, aplica-se a seguinte equação química:



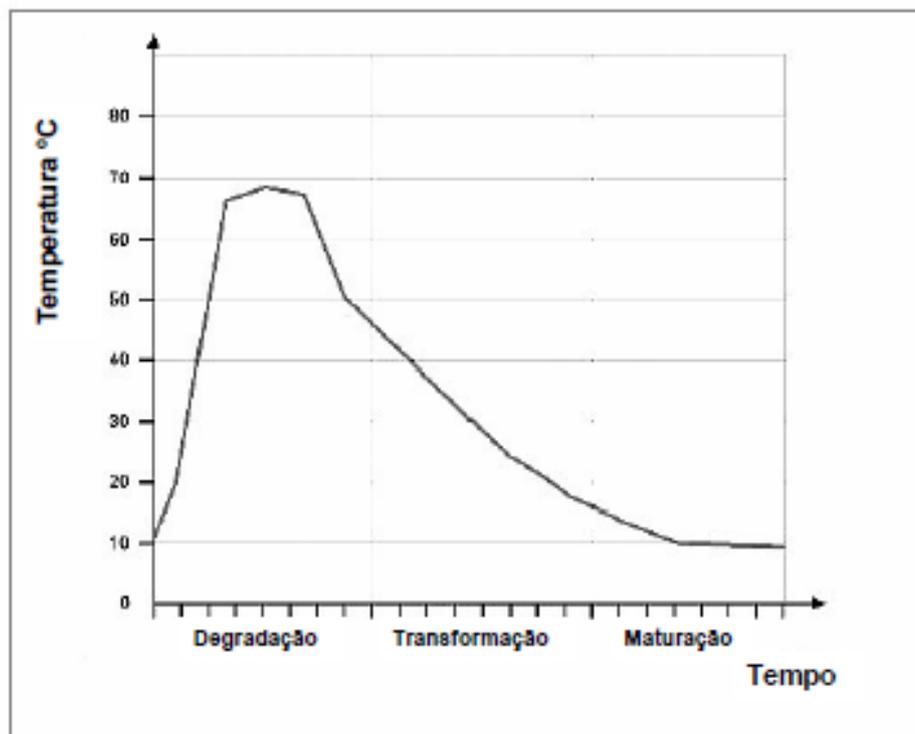
As condições ambientais favoráveis para os micro-organismos aeróbios devem ser garantidas visando possibilitar um processo de degradação ótimo. Através do processo de degradação apresentado acima, derivam-se os seguintes parâmetros para o processo aeróbio:

-  fornecimento suficiente de oxigênio;
-  nível de temperatura adequado;

- abastecimento adequado de água e de nutrientes. (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007, p. 24)

Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz (2007, p. 27) escreveram que a decomposição aeróbia de 1 kg de substâncias orgânicas geram 20,000 kJ. No processo metabólico, aproximadamente 12,000 kJ de energia exotérmica sob a forma de calor é liberada adicionalmente à energia exigida pelo “consumidor”. O calor microbiano é impedido de sair pela superfície da leira devido a baixa condutividade (0,25 a 0,4 W/mK – dependendo do balanço hídrico), desta forma a leira se autoaquece (autoaquece). As temperaturas variam entre mesofílicas (10-45 °C) e termofílicas (25-80 °C) (veja Figura 3-8).

**Figura 3-8 - Variação do nível de temperatura na leira durante o processo de compostagem**



Fonte: Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz, 2007.

Interpretando dados obtidos em “Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007, p. 25) temos que alguns parâmetros são definidos como reguladores das condições ambientais de decomposição aeróbia, quais sejam: teor de oxigênio, teor de umidade e temperatura.

Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz (2007, p. 26) definiu que a quantidade de oxigênio que garantisse uma completa oxidação dos resíduos orgânicos é de aproximadamente 2 g O<sub>2</sub>/g de substância orgânica biodegradável.



Segundo avaliações relatadas (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007, p. 25-31), pode-se afirmar que o transporte de energia e a regulação da temperatura depende dos seguintes fatores: escolha do perfil da leira, condições climáticas, ajuste da porosidade através da adição de materiais estruturantes como resíduos verdes triturados, aeração passiva ou ativa e frequência de revolvimento das leiras, estes critérios foram identificados em diversos projetos executados pela autora desta monografia.

### 3.3.1 TECNOLOGIAS DE COMPOSTAGEM

Segundo Schmidt (2005), o espectro de técnicas de compostagem varia desde técnicas bastante simples (processo extensivo), compostagem em leiras em pátios abertos até processos altamente sofisticados e controlados, sistema encapsulado (intensivo), tais como a compostagem em túnel.

Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz (2007), no relatório "*Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil*", define as diferenças entre os processos aeróbios da seguinte forma:

A principal diferença entre os processos de tratamento aeróbio de resíduos consiste nos diferentes sistemas de pré-decomposição e decomposição termófila intensiva. As áreas posteriormente conectadas de pós-decomposição termófila, produção e armazenamento normalmente não são partes específicas do processo. Na fase termófila de pré-decomposição, os materiais orgânicos de fácil degradação são decompostos por micro-organismos com intensidade de degradação relativamente elevada. A duração da fase termófila de pré-decomposição abrange um período de aproximadamente seis semanas. As exigências na administração desta fase, como por exemplo, o fornecimento de oxigênio, a regulação da temperatura e o limite de emissões, são bastante elevadas. Os processos de degradação e de transformação na fase termófila de pós-decomposição são nitidamente mais lentos que na fase termófila intensiva de decomposição. Nesta fase, a velocidade de decomposição pode ser em pequena escala influenciada por medidas técnicas.

As características relevantes de distinção entre os processos aeróbios atuais, são:

-  a formação da área de decomposição e a geometria das leiras;
-  o tipo de aeração;
-  o tipo do sistema de entrada, saída e de revolvimento. (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007, p. 37)

As tecnologias de compostagem intensivas com mecanismos de alta tecnologia tem viabilidade econômica a partir do processamento de 15.000 t/a de resíduos. Com esse tamanho, a fim de minimizar a emissão de odores, o processo deve ser encapsulado, caso esteja localizado próximo a áreas urbanas, tendo o ar emitido captado e tratado. Estas conclusões foram obtidas através de experiências profissionais colecionadas pela autora desta pesquisa.

Esses diversos arranjos tecnológicos que variam desde processos mais simples, em áreas abertas com poucos maquinários, até os mais complexos, em áreas fechadas, extremamente automatizada, permitem que o processo de compostagem seja aplicado em áreas com condições bastante diversificadas independente das condições climáticas ou gravimétricas dos resíduos, conforme retratado na “Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007). A Tabela 3-4 apresenta a sistematização das tecnologias aeróbias.

**Tabela 3-4 - Sistematização das tecnologias aeróbia**

	<b>Compostagem extensiva</b>	<b>Compostagem intensiva</b>
<b>Grau de automatização</b>	Baixo	Alto
<b>Proteção contra a emissão de ar</b>	Sob pátio coberto ou coberturas semipermeáveis	Completamente ou parcialmente em áreas fechadas
<b>Disponibilidade de área</b>	Alta	Baixa
<b>Controle de emissões</b>	Baixo	Alta
<b>Custos</b>	Investimento e custos de operação baixos	Investimento e custos de operação altos
<b>Capacidade de processamento (1)</b>	Baixo, até 10.000 ton/ano	Médio e elevado, a partir de 20.000 ton/ano

(1) A capacidade de processamento citada é apenas uma referência, visto que toma como base o mercado alemão, o qual tem restrições mais severas em relação a emissões atmosféricas.

**Fonte: Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz, 2007.**

### **3.3.2 SISTEMAS EXTENSIVOS**

De acordo com Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz (2007), a tecnologia mais antiga de compostagem é a denominada leira em triângulos. Esta tecnologia é a mais empregada na Europa e pode ser observada na Figura 3-9.

**Figura 3-9 - Leira de compostagem, sendo montada e revirada por pá-carregadeira**



**Fonte: Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz, 2007.**

Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz (2007) retratam que a compostagem aeróbia ocorre em leiras de diferentes dimensões e perfis, onde durante sua montagem e revolvimento as pás-carregadeiras são empregadas para a execução de leiras altas e os equipamentos de revolvimento para leiras baixas e amplas. As leiras alcançam alturas entre 1,50 a 3,50 m, dependendo do seu perfil. Os perfis mais comuns são os triangulares, trapezoidais e de perfis planos. Para a mitigação de emissões dos percolados são preparadas bases compostas por camadas de palha, casca, paletes de madeira, entre outros materiais que o mercado já emprega.

### **3.3.3 COMPOSTAGEM EM LEIRAS TRIANGULARES SEM AERAÇÃO FORÇADA**

Segundo apresentado em "*Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil*" (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007), a compostagem em leiras triangulares sem aeração forçada também é utilizada para o tratamento de resíduos. Pequenas leiras em formato triangular têm um volume de superfície elevado e caminhos curtos para a difusão restrita do oxigênio. A aeração forçada não é necessária. O fornecimento de oxigênio ocorre por convecção, difusão e revolvimento da leira.

A Figura 3-10 apresenta o maquinário utilizado em área de compostagem executando o revolvimento em uma leira triangular

**Figura 3-10 - Revolvimento de leira triangular**



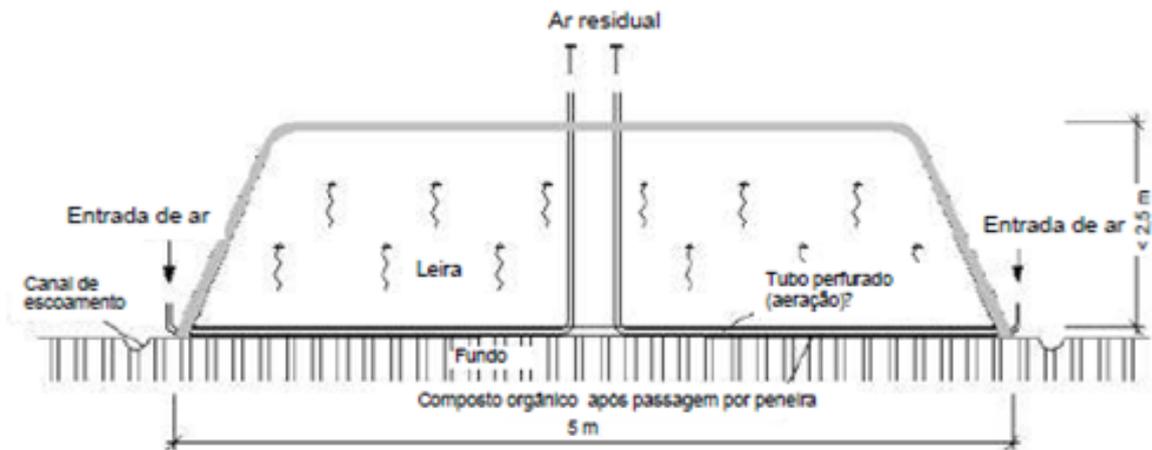
**Fonte: Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz, 2007.**

### **3.3.4 COMPOSTAGEM EM LEIRAS TRAPEZOIDAIS COM AERAÇÃO PASSIVA**

Em “*Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil*” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAH; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007) temos apresentadas que a compostagem em leiras trapezoidal ocorre de forma estática, onde não há revolvimento da leira, e o sistema de aeração decorre da convecção do ar impulsionado pela diferença de temperatura entre a leira e o meio ambiente fazendo com que o ar penetre, de forma passiva em uma tubulação perfurada distribuída em espaçamentos constantes, permitindo que toda a massa seja aerada. Sua base pode ser preparada com cavacos de madeira ou mesmo sobre paletes, funcionando não apenas como uma segunda ferramenta de aeração, mas também como uma superfície drenante que impede o percolado de permanecer sob a leira. A superfície da leira é coberta com cavacos de madeira em uma espessura de 20-30 cm que serve como um filtro biológico visando minimizar possíveis odores da decomposição.

Estas leiras sendo executadas em áreas onde o índice pluviométrico é elevado podem ter sua superfície coberta também por uma membrana semipermeável, a fim de inibir a penetração da chuva intensa e controlar o teor de umidade do material. Este método é denominado como da chaminé e é ilustrado Figura 3-11.

Figura 3-11 - Sistema de aeração passiva



Fonte: Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz, 2007.

A Figura 3-12 apresenta a construção de uma leira de compostagem com aeração passiva.

Figura 3-12 – Leira de compostagem com aeração passiva



Fonte: Faber Serviço Ltda, São Sebastião, 2000.

### 3.3.5 SISTEMAS INTENSIVOS

Em “Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007) temos a compostagem em sistemas encapsulados significando compostagem em um ambiente fechado, com troca térmica minimizada com a atmosfera, vários métodos de aeração e revolvimento mecânico para controle do processo. Estes sistemas são concebidos para minimizar os odores e tempo da decomposição em decorrência do controle do fluxo de



ar, temperatura e da concentração de oxigênio. Sistemas encapsulados tornam possível a coleta das emissões gasosas, dos odores e dos particulados. A aeração ativa, o umedecimento e a homogeneização permitem o controle e a otimização da fase de estabilização biológica, desta forma, acelerando consideravelmente a fase principal da biodegradação.

### **3.3.6 COMPOSTAGEM EM LEIRAS TRIANGULARES COM AERAÇÃO FORÇADA**

Sistemas de aeração forçada foram desenvolvidos com o objetivo de mitigar odores e acelerar a decomposição.

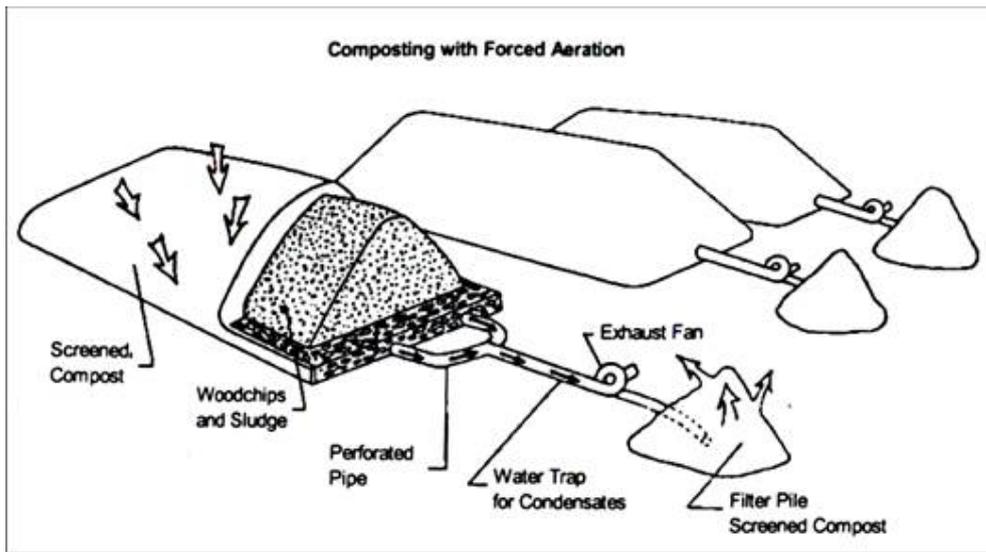
A compostagem em leiras é tipicamente empregada para quantidades maiores, requerendo largas áreas. Adicionalmente, podem ser identificados problemas de odor e de percolação excessiva durante a decomposição nas leiras. Para remediar estes problemas, em áreas onde as condições pluviométricas são intensas ou mesmo onde a população afetada encontra-se localizada na proximidade da planta de compostagem, devem ser desenvolvidos sistemas simples de cobertura como pátios cobertos ou membranas semipermeáveis, conforme “*Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil*” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007).

Segundo Fricke et al. (2007, p. 42):

Outro método empregado para uma redução sensível dos odores desagradáveis consiste na cobertura das leiras por material tipo membrana semipermeável (FRICKE et al., 1999). Trata-se de um material têxtil, formado por uma camada ativa de microporos e laminada com uma lona plástica altamente resistente visando garantir estabilidade física. A aplicação de membranas permeáveis conduz a uma redução significativa das emissões de odores desagradáveis nas leiras descobertas. (FRICKE et al., 2007, p. 42)

As Figura 3-13 e Figura 3-14 apresentam modelos simplificados de sistema de compostagem com aeração forçada.

Figura 3-13 - Modelo didático de sistema de compostagem com aeração forçada e cobertura



Fonte: Fricke e Pereira, 2013a.

Figura 3-14 - Sistema em leiras envelopadas com aeração forçada



Fonte: UTV AG.

O processo de compostagem em leiras, cobertas por lonas especiais e aeradas por aeração forçada, com suprimento controlado de oxigênio, corresponde ao estado da tecnologia moderna, do ponto de vista tecnológico bem como, ambiental. Este processo se destaca pelo manuseio simples e flexível, rapidez de operação e alta segurança de funcionamento.

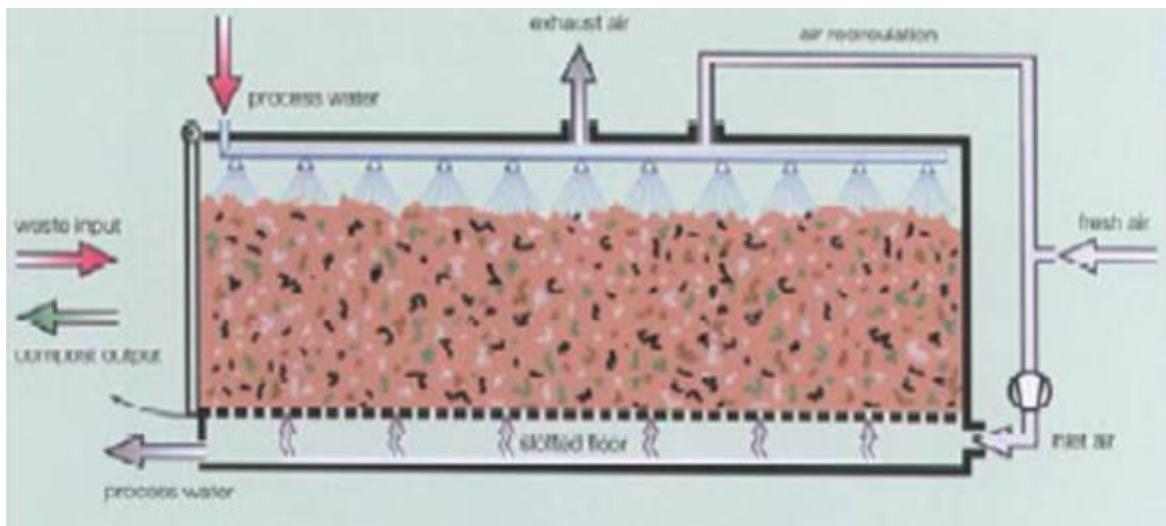
### 3.3.7 SISTEMA DE COMPOSTAGEM EM TÚNEL

A compostagem em túnel ocorre em áreas totalmente fechadas que são alimentadas e esvaziadas através da pá-carregadeira. Alguns sistemas empregam durante a atividade de esvaziamento pisos móveis. Os resíduos são aerados de forma intensiva e o ar exaurido pode ser coletado e tratado de forma eficiente.

Já em “*Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil*” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHN; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007) temos relatado que os túneis de compostagem intensiva são construídos em concreto sob área plana. Uma série de tubos de aeração, posicionados paralelamente, são instalados longitudinalmente no piso de concreto do túnel, por baixo da área que receberá os resíduos.

Os pequenos orifícios são perfurados para receber as conexões (pequenos bocais cônicos usados para distribuir o ar), que são coladas nos tubos. As conexões apresentam bicos cônicos para impedir os bloqueios. Durante o processo de compostagem, um ventilador sopra ar diretamente na câmara de compostagem e também nos tubos de aeração sob o piso do túnel. As conexões presentes no piso do túnel fornece uma aeração pressurizada, para assegurar que o ar penetre no material. Desta forma, o processo de compostagem pode ser adequadamente controlado. A Figura 3-15 mostra o perfil do túnel de compostagem.

**Figura 3-15 - Perfil do túnel de compostagem intensiva**



Fonte: Fricke e Pereira, 2013a.

A Figura 3-16 mostra os túneis de compostagem intensiva.

**Figura 3-16 - Túnel de compostagem intensiva**

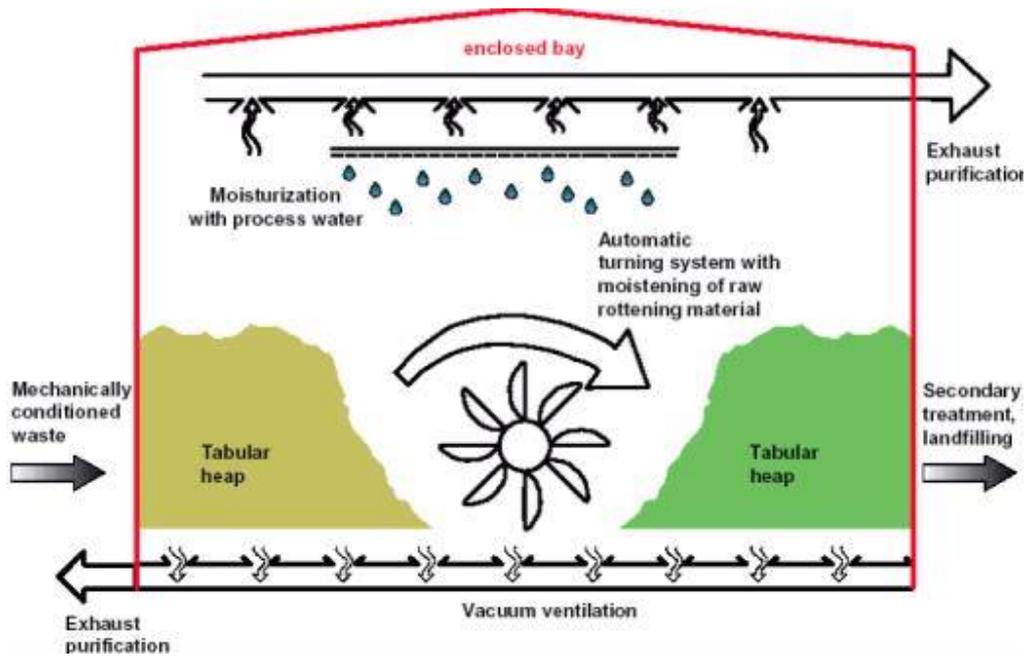


**Fonte: Fricke e Pereira, 2013a.**

### **3.3.8 COMPOSTAGEM EM LEIRA TABULAR**

Neste arranjo as vantagens de um sistema fechado são combinadas aos métodos de compostagem em leiras. Em compartimentos completamente automatizados, as frações orgânicas são amontoadas em leiras planas, aeradas de forma forçada, e revolvidas automaticamente por uma pá rotativa. O material é umedecido, quando necessário, através de sistemas pulverizadores localizados acima de leira ou durante o processo de revolvimento. Um piso perfurado permite que o ar seja lançado na leira, o ar exaurido é captado e direcionado para um biofiltro, a fim de evitar perturbações pelos odores. No decurso da decomposição, os resíduos são revolvidos na sua totalidade. Após este período, a massa é encaminhada para uma área de pós-maturação, segundo descrito em "*Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil*" (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007). A Figura 3-17 apresenta um esquema do perfil de uma leira de compostagem tabular.

Figura 3-17 - Perfil da leira de compostagem tabular



Fonte: Fricke e Pereira, 2013a.

A Figura 3-18 mostra o processo de compostagem em um sistema fechado e completamente automatizado em leira tabular.

Figura 3-18 - Compostagem em leira plana e revólvel



Fonte: Fricke, Dichtl, Santen, Münnich, Bahr, Hillebrecht e Schulz, 2007.



### 3.3.9 COMPOSTAGEM EM LEIRA TRAPEZOIDAL

Conforme apresentado em “Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ, 2007, p. 42), a compostagem em leiras trapezoidais é semelhante à compostagem em leira plana, diferindo quanto ao perfil da leira e ao grau de automação. Equipamentos como pá-carregadeiras e sistemas de revolvimento semiautomático são empregados para sua movimentação. A aeração ocorre também pelo piso aerado e o ar exaurido é capturado e tratado em biofiltro a fim de mitigar a emissão de odores. A leira em perfil trapezoidal tem uma base de 10 m e uma altura de 3 m requerendo aproximadamente uma área de  $0,45 \text{ m}^2/\text{m}^3$  de resíduo.

## 3.4 TECNOLOGIAS DE SECAGEM – TRATAMENTO BIOLÓGICO AERÓBIO

Segundo Dr. Hubert Baier: “A fim de cortar custos energéticos na produção de clínquer após a crise do petróleo no início da década de 1970, a Indústria de Cimentos Alemã iniciou a substituição de combustíveis primários por combustíveis alternativos tais como, óleos e pneus usados. Atualmente, estes combustíveis representam mais de 2 Euro/GJ do custo da energia.”

A partir normativa que entrou em vigor na Alemanha em 2005 proibindo a disposição final de resíduos in natura em aterros, houve uma aceleração no desenvolvimento de tecnologias de co-processamento nas indústrias de eletricidade e cimento.

Com o desenvolvimento da economia e o ônus oriundo do incremento dos preços da energia, sistemas alternativos passaram a ser buscados para substituir algumas fontes energéticas e com isto se iniciou o mercado de combustível derivado de resíduos em 2005, contando a Alemanha atualmente com 20 plantas. Estas novas plantas empregam a mesma tecnologia que se utiliza para fins de compostagem porém diferenciam-se na metodologia de operação.

A utilização de combustíveis alternativos reduz o consumo de combustíveis fósseis como o carvão, gás natural ou petróleo. Além de contribuir para a segurança de abastecimento energético também contribui para a economia de recursos valiosos.

De modo geral, todas as tecnologias de tratamento aeróbio utilizadas em plantas de TMB (processos de túnel, garagem, leiras) são apropriadas para a secagem e produção de CDR. Os resíduos devem conter uma proporção suficiente de compostos biologicamente degradáveis. A modificação do sistema de aeração possibilita a fácil secagem dos resíduos frescos ou daqueles que foram submetidos à biodigestão. O tratamento por estabilização mecânica-biológica (EMB) se constitui em um processo alternativo. O objetivo da EMB é a secagem biológica de todos os resíduos orgânicos e inorgânicos ou apenas da fração de alto poder calorífico (inorgânico) para fins de ge-



ração de CDR, e ainda prover uma expressiva redução de massa quando se refere as frações orgânicas, afastando estas massas dos aterros.

A primeira etapa do tratamento consiste no processamento biológico aerado dos resíduos que geralmente dura 10 – 15 dias e em seguida tem-se o preparo mecânico para separação de metais, minerais e corpos estranhos, produzindo diferentes frações de CDR, conforme poder calorífico e granulometria.

Segundo Dr. Hubert Baier o mercado alemão cimentício, tem em geral aplicado CDR “sob medida”, ou seja, frações < 80mm para calcinadores, e combustível sólido recuperado com qualidade monitorada para queimadores em geral < 25 mm, sendo que em plantas modernas com calcinadores, somente 40 % do consumo térmico é dado pelo queimador da zona de clinquerização, enquanto 60 % da demanda de calor é requerida por um ou mais pontos de queima do calcinador.

Esses diversos arranjos tecnológicos que variam desde processos mais simples, em áreas abertas com poucos maquinários, até os mais complexos, em áreas fechadas, extremamente automatizada, permitem que o processo de secagem biológica seja aplicado em áreas com condições bastante diversificadas independente das condições climáticas ou gravimétricas dos resíduos, conforme retratado na “Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil” (FRICKE; DICHTL; SANTEN; MÜNNICH; BAHR; HILLEBRECHT; SCHULZ,2007).

Como resultado da necessidade de prover mais eficiência energética aos sistemas temos o declínio das técnicas de incineração na forma mass burning em detrimento das plantas de força de CDR (combustível derivado de resíduos) principalmente para àqueles países com alta presença de carga orgânica em seus resíduos e alto valor de umidade.

Portanto o mercado alemão e europeu de CDR encontra-se consolidado, esta afirmação pode ser ratificada pela informação apresentada pelo Dr. Hubert Baier que consagra o CDR como fonte principal na matriz energética das cimenteiras, como segue: *“Em 2012 quando a demanda térmica da Alemanha estava por volta de 92mGJ, aproximadamente 62 % desta demanda foi substituída por combustíveis alternativos sólidos e líquidos o que corresponde a aproximadamente 2 milhões de toneladas de pneus, resíduos animais, óleos ou solventes e diferentes tipos de combustíveis sólidos, biomassa os quais foram tratados de maneira a atender os requerimentos mínimos de manuseio, alimentação, combustão, processo, controle de emissões e performance do produto.”*

Desta forma, a partir de experiência mercadológica de valorização superior a 30 anos pode-se concluir que o CDR representa uma fonte renovável de energia corroborando para que o co-processamento assuma função importante no âmbito, não apenas da gestão sustentável dos resíduos, mas também da gestão eficiente de

energia, contribuindo para a proteção climática através da redução de emissões de gases de efeito estufa e também preservando os recursos naturais.

Dentre o rol de equipamentos mecânicos aplicados para a produção de CDR temos: trituradores, peneiras, separadores ópticos NIR, balísticos, por ar, magnéticos e de corrente, entre outros.

### 3.5 TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS

Processos térmicos e termoquímicos alternativos são apresentados neste capítulo e avaliados em relação a sua empregabilidade. Serão analisados:

- ♻️ Processo de pirólise
- ♻️ Processo de gaseificação,
- ♻️ Processos de plasma,
- ♻️ Procedimentos de carbonização hidrotérmica (HTC),
- ♻️ Procedimentos de despolimerização catalítica com baixa pressão (KDV).

A avaliação será baseada nos seguintes critérios:

- ♻️ Estado da técnica,
- ♻️ Capacidade operacional,
- ♻️ Sustentabilidade,
- ♻️ Rentabilidade.

Além dos critérios acima devem-se ainda ser analisadas as condições legais para o emprego das tecnologias. A categorização das tecnologias toma como base parâmetros de processo tais como temperaturas, pressões e atmosferas (Tabela 3-5).

**Tabela 3-5 - Parâmetros para a categorização dos processos alternativos térmicos e termoquímicos**

Parâmetro	Pirólise	Gaseificação	Carbonização hidrotérmica (HTC)	Despolimerização catalítica com baixa pressão (KDV)	Incineração
Temperatura em °C	150 – 800	800 – 1.600	170 -250	máx 500	850 – 1.300
Pressão em bar	1	1 – 45	10 - 40	1	1
Atmosfera	Inerte/N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, Ar		Inerte/N <sub>2</sub>	Ar, O <sub>2</sub>
Estequiometria	0	<1		0	>1 Ar, O <sub>2</sub>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.

### 3.5.1 PIRÓLISE

#### 3.5.1.1 OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

O termo pirólise (também carbonização, desgaseificação, destilação seca) refere-se ao processo de decomposição das substâncias orgânicas, exclusivamente através do fornecimento de calor na ausência de oxigênio ou de outro agente de oxidação ou de produtos de reação.

O ajuste do nível de temperatura é dividido em:

-  Pirólise de baixa temperatura (NTP)  $T < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
-  Pirólise de média temperatura (MTP)  $T 500\text{ }^{\circ}\text{C} - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
-  Pirólise de alta temperatura (HTP)  $T > 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Mais recentemente, o chamado Torrefação é adicionalmente utilizado numa gama de temperaturas de 250 a 300 °C. Esta variante de baixa temperatura da pirólise é tradicionalmente usada para o refino de alimentos e atualmente testada e discutida tecnicamente como um método para a fabricação de combustíveis de biomassa, em especial para aumentar o valor calorífico e a otimização de alguns parâmetros físicos (moabilidade, hidrofobia).

Também no que diz respeito ao tempo de residência (gás), o processo de pirólise pode ser dividido. Através do aquecimento rápido do gás de síntese e tempo de residência extremamente curto, os produtos resultantes do processo são chamados de pirólise rápida. Aqui, particularmente, a partir de temperaturas baixas, podem ser obtidos rendimentos muito elevados de produtos líquidos produzidos. Através de temperaturas mais elevadas, a gama de produtos é dominada pelos componentes gasosos, em que a temperatura diminui o valor calorífico dos gases.

Tanto a torrefação quanto a pirólise rápida são usadas para o refino de biomassa. Para o tratamento de resíduos urbanos, estes métodos não se justificam e portanto não serão abordados.

Relevantes para o tratamento térmico de resíduos são os processos de pirólises médias e lentas que ocorrem a partir de uma faixa de temperatura média e alta.

Os produtos oriundos nestas condições são principalmente os gasosos formados com tempos de permanência suficientemente longos para gerar as reações de recuperação do gás por aromatização e polimerização a partir dos produtos de reação líquidos ou sólidos. O gás é composto principalmente de  $\text{CO}_2$ , CO, hidrogênio, metano, etano e eteno. A composição dos resíduos tem influência significativa sobre os produtos. Então, por exemplo, o domínio de certos tipos de plástico na pirólise pode levar a composições de gases significativamente diferentes.



De acordo com a proporção de oxigênio fornecido são também formadas água de reação e compostos orgânicos contendo oxigênio tais como metanol, acetaldeído, acetona, ácido fórmico ou ácido acético. Com o aumento da temperatura, as proporções de hidrogênio e monóxido de carbono no gás aumentam, enquanto diminui a concentração em dióxido de carbono, metano e alcanos superiores. Também a proporção de massa dos produtos condensáveis diminui com a temperatura.

Após a pirólise permanece um coque que consiste principalmente de carbono como também os rejeitos são compostos de frações inertes.

O valor calorífico dos gases de pirólise varia, dependendo da natureza da carga de alimentação, ao longo de um largo intervalo. Incluindo os componentes condensáveis ou vapores de pirólise, valores caloríficos muito elevados de 12.500 a 46.000 kJ / m<sup>3</sup> N podem ser alcançados. Os gases remanescentes condensáveis atingem valores caloríficos entre 12.000 e 16.000kJ / m<sup>3</sup>N (Warnecke, 1991; Thomé, 1985; Thomé, 1994).

### **3.5.1.2 AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA**

Um desafio fundamental e sistêmico no processo de pirólise está relacionado ao problema dos componentes condensáveis no gás que exigem um aquecimento das partes da planta que são tocadas pelo gás ou a separação intencional do condensado logo após o reator.

Outro desafio considerado também crítico por operadores experientes está relacionado com as características de controle, especialmente quando se utiliza fornos rotativos, na impermeabilização do equipamento, para evitar misturas explosivas no reator ou contaminação tóxica do ar ambiente.

### **3.5.1.3 PIRÓLISE COMO PARTE DE INCINERAÇÃO POR SISTEMA DE FUSÃO**

O princípio deste método é expulsão pirolítica dos componentes de resíduos voláteis num primeiro passo do processo e a subsequente combustão direta dos gases de pirólise, em conjunto com o coque remanescente. Com a combustão em dois estágios as temperaturas de oxidação serão mais elevadas, portanto, a vitrificação dos componentes de resíduos inorgânicos é geralmente realizada.

Vantajoso nestes processos de alta temperatura são as qualidades de escória recuperáveis. São conseguidos bons valores de lixiviação que permitem uma qualidade bastante alta para a escória que poderá ser empregada como produto.



Desvantagem é geralmente o alto esforço energético e operacional. A operação de tais processos sob regime europeu ou alemão, e também nas condições brasileiras, não é economicamente viável devido aos altos custos.

O emprego da tecnologia em outros países apenas se justifica se houver uma adequação legal conforme ocorreu no Japão. (Quicker et al. 2014). A gestão de resíduos no Japão foi influenciada significativamente por alguns fatores que levaram a um especial desenvolvimento do tratamento térmico de resíduos visando promover alta capacidade de tratamento na forma de processos térmicos alternativos. Orientações legais para a vitrificação da escória foram decisivas para este desenvolvimento no Japão. Como resultado de vários escândalos com dioxina na combustão de resíduos em leito fluidizado na década de 1990, foi adotada no Japão a regulamentação determinando que a escória de tratamento térmico de resíduos deve ser derretida conjuntamente. Esta disposição legal foi uma das principais razões para a criação de vários processos térmicos alternativos que integrem o derretimento da escória. Em 2008, houve uma flexibilização da norma, reduzindo significativamente a implementação de processos térmicos alternativos (Vaccani, 2014).

#### **3.5.1.4 PIRÓLISE STAND-ALONE**

Tais conceitos de processo caracterizam-se pelo fato de que geralmente ocorre uma recuperação de energia direta do gás produzido principalmente para cobrir o consumo de energia na pirólise, mas nenhum processo interno ou, diretamente, uso externo posterior do carbonizado gerado.

Nestes processos portanto se produz um rejeito sólido, que ainda tem um conteúdo significativo de energia e sua disposição final precisa ser licenciada. Desta forma, as complexidades operacionais identificadas neste tratamento não garantem nenhum benefício adicional, somente mais esforços técnicos, devendo ainda ser desenvolvida uma solução adequada para a eliminação adequada do coque.

Em geral, uma das poucas alternativas adequadas refere-se aos processos térmicos na incineração de resíduos na forma planta-única. As melhores tecnologias atualmente disponíveis na zona de pirólise ou gaseificação, serão apresentadas como "incineração de resíduos", os quais

- a) "são operadas numa fase posterior de combustão com recuperação de energia e tratamento de gases de combustão" e / ou
- b) "recuperar ou reciclar as substâncias [...] que não são queimadas".

O aterramento das frações carbonizadas em processos de pirólise de resíduos não corresponde assim ao estado da técnica, como o encontrado na incineração BREF de resíduos (BREF 2005) e, provavelmente, também definido na versão revista do



BREF e, portanto, pelo menos na Europa, enfrentam problemas significativos de aprovação legal (Quicker et al. 2014).

### **3.5.1.5 PIRÓLISE COMO PROCESSO PRÉVIO**

A aplicação de pirólise como processo prévio significa que tanto a fase gasosa e a fração de coque gerada serão utilizados num processo diretamente ligado (por exemplo, em fornos de cimento e de cal ou centrais elétricas). Como resultado, a parte orgânica dos resíduos pode ser plenamente utilizada e com um designadequado as substâncias metálicas recicláveis conceituais recuperadas com boa qualidade. O esforço para o complexo de limpeza de pirólise é evitado pelo uso direto no processo de combustão industrial ligado.

A "homogeneização" pela conversão em coque e gás, geralmente permite uma utilização mais focada e eficaz no processo de acompanhamento, quando empregado em resíduos. Em determinadas circunstâncias é possível empregar o pré-tratamento termoquímico e assim substituir os combustíveis fósseis. Então, tais abordagens - mesmo que o método Contherm, tenha sido convertido como último conceito e tenha fracassado na Alemanha – este pode ser considerado como uma opção interessante para canalizar o potencial energético dos resíduos para a indústria. Esta abordagem tem potencial para emprego (Quicker et al. 2014).

Este desenvolvimento deve ser aguardado, desta forma a técnica apresentada ainda não representa uma solução para o mercado brasileiro.

## **3.5.2 GASEIFICAÇÃO**

### **3.5.2.1 OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS**

O objetivo do processo de gaseificação é a conversão de um sólido e também substâncias líquidas ou pastosas em um possível gás combustível ou de síntese, que tem uma elevada aplicabilidade a partir do estado físico das frações geradas. Para este fim, o sólido entrará em contato com um reativo de gaseificação. Como agente de gaseificação é introduzido oxigênio (com a utilização de hidrogênio e também vapor de água) no processo. Possíveis agentes de gaseificação são ar, oxigênio, vapor de água e dióxido de carbono.

O processo é conhecido como gaseificação Autotermal (oxidação parcial) quando o agente de gaseificação executa uma oxidação parcial do combustível. Isto ocorre quando se emprega oxigênio e ar. Então, o necessário calor da reação, oriundo das reações de gaseificação estas principalmente a endotérmica, é produzido a partir do combustível. Reduz-se o conteúdo energético do gás segundo a presença de sólidos. Na gaseificação tem que garantir que o fornecimento de oxigênio seja limi-



tado a fim de evitar perdas desnecessárias de energia ou até mesmo a completa oxidação do material.

Se o vapor de água é utilizado como agente de gaseificação, não ocorre a libertação de calor por oxidação parcial do combustível. Acontece exatamente o contrário, será necessário ainda mais energia térmica, uma vez que as moléculas de água são clivadas e, assim, o oxigênio e o hidrogênio são produzidos. Este modo de operação é designado como gaseificação alotérmica, uma vez que a energia necessária em face de outras fontes, deve ser fornecida a partir do exterior por outras fontes. O aquecimento do reator através da parede exterior não é suficiente como via de regra para manter o processo de gaseificação. Portanto, diferentes opções são utilizadas para o aquecimento. Por exemplo, areia quente (leito fluidizado), bolas de cerâmica quentes ou construções aquecidas desde o interior, devem ser utilizadas.

A gaseificação termoquímica de combustíveis sólidos pode ser aplicada em várias fases: secagem, desvolatilização (pirólise), bem como as reações homogêneas e heterogêneas de gaseificação. Já abaixo de 200 °C pequenas quantidades de óxidos de carbono e ácidos carboxílicos são desgaseificadas. Com o aquecimento, a intensidade da desgaseificação de substâncias voláteis aumenta. Só quando a desgaseificação é completada, pode o agente de gaseificação ou os gases que se formam no processo, tais como hidrogênio ou monóxido de carbono, serem transportados por convecção e difusão para a superfície do agora largamente desgaseificado sólido, que consiste principalmente em constituintes inertes de carbono fixos. Os componentes gasosos expulsos reagem uns com os outros e com o agente de gaseificação utilizado.

A composição do produto da gaseificação depende da temperatura e da pressão. Com o aumento da temperatura há um aumento da formação de CO e de hidrogênio, diminui simultaneamente o conteúdo em metano do produto gasoso. O aumento da pressão favorece a formação de metano e dióxido de carbono.

O poder calorífico dos gases gerados são inferiores aos gases de pirólise e são fortemente determinados pelo agente de gaseificação usado. Na vaporização alotérmica o poder calorífico de gaseificação alcança 12000 kJ/m<sup>3</sup> (Thomé 1994). Quando se utiliza o oxigênio como agente de gaseificação os valores caloríficos situam-se entre 10 e 18 000 kJ/m<sup>3</sup> N. Os menores valores caloríficos, na ordem de 5 000 kJ/m<sup>3</sup>, são observados na gaseificação auto-térmica de ar, já que o alto teor de nitrogênio inerte até 60 % dilui o gás.

### 3.5.2.2 AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA

#### **Gaseificação como parte de processo graduado de combustão**

Neste item os processos estão resumidos considerando que gaseificação será a primeira etapa do tratamento térmico, anteriormente à incineração. A gaseificação é, nestes casos, entendida como parte integrante de uma combustão estequiométrica em degraus e não um processo real de gaseificação.

Esta rotulagem é uma pura medida de marketing. Em alguns países pode-se captar linhas de financiamento para o estabelecimento de instalações alternativas de tratamento térmico. Desta forma, a classificação na forma de métodos "alternativos" encontra uma maior aceitação no desenvolvimento das políticas públicas.

Além destas vantagens, entram em pauta algumas outras vantagens técnicas tais como: custos mais baixos de investimento quando comparado a um processo tradicional de incineração, menor complexidade tecnológica, capacidade de redução de óxido nítrico por seqüência de combustão graduada e menores perdas de calor através da exaustão devido aos menores fluxos de volume de gas de exaustão.

No entanto, devido a simplicidade tecnológica, inevitavelmente, as limitações quanto flexibilidade e gestão onerarão o processo.

As plantas que comportam a etapa de gaseificação conforme descrito, integram a primeira fase da incineração, são geralmente classificadas como método de incineração. Portanto, deve-se tomar em consideração questões de qualidade, operação e disponibilidade inerentes à incineração de resíduos.

#### **Gaseificação como parte de incineração por sistema de fusão**

Este tipo de processo é caracterizado pelo fato de que em primeiro lugar uma gaseificação dos resíduos ocorre em uma zona de combustão de alta temperatura, ou no mesmo reator ou em reator posterior, dependendo o se a tecnologia é aplicada para os resíduos totais onde encontramos a presença de inorgânicos ou aplicada somente para os particulados a serem fundidos e vitrificados.

Em princípio, valem as mesmas observações para o caso dos processos por fusão, empregada como primeira etapa de tratamento térmico na forma de pirólise antes da incineração de alta temperatura. Como vantagem temos as condições de qualidade das escória. Uma desvantagem do processo é o alto consumo de energia e as complexidades técnicas.

Também para os processos de fusão que empregam o processo de gaseificação como etapa inicial de tratamento termoquímico, vale sua aplicação apenas sob condições legais diferenciadas devido ao alto custo de operação. Não há previsão legal no Brasil ou na Europa que fomente sua aplicação.



## **Gaseificação para geração de gás**

Procedimentos com este princípio estavam e sempre estarão no foco de interesse de pesquisadores: o objetivo é produzir um gás combustível de alta qualidade a partir de resíduos, otimizando a recuperação energética em motores, turbinas, na produção de combustível ou até mesmo na célula de combustível.

Devido a complexidade e heterogeneidade da matéria-prima na forma de resíduos tais procedimentos só podem ser operados em plantas de alta complexidade técnica, e portanto onerosa. A busca por gerar combustível na forma de gases com alto poder calorífico, freqüentemente leva ao uso de vapor de água ou oxigênio como agente de gaseificação, invés de ar, aumentando os custos tecnológicos, onde o maior desafio é a purificação do gás. Poeiras e alcatrões devem ser separados quantitativamente para garantir alta qualidade ao gás antes da recuperação energética. Isto apenas é possível através de vários estágios de processos de purificação de gás que por sua vez podem gerar chorume e resíduos. Também a utilização em motores do gás causa problemas, devido as emissões elevadas de componentes estáveis de gás (CO, CH<sub>4</sub>, benzeno) que não são totalmente oxidados no motor e também através da nova formação de poluentes tais como formaldeído (HC = OH) (Bauer 2009).

A experiência acumulada no Japão ou em SVZ Schwarze na Alemanha, demonstra que a produção, condicionamento e a manutenção do padrão de qualidade para uso dos gases oriundos da gaseificação de resíduos, apesar de seu alto custo, em princípio é tecnicamente viável e pode ser operada de forma estável por um longo período.

No entanto, a garantia das condições descritas remontam a custos elevados de investimento, operação e manutenção preventiva e corretiva de tais procedimentos. Portanto, estes conceitos tecnológicos não se adequam ao mercado da Alemanha e do Brasil (Quicker et al. 2014).

## **Gaseificação como processo intermediário**

Métodos de gaseificação podem ser usados para transferir o conteúdo de energia de resíduos pela conversão termoquímica na forma de gás do produto ou coque, servindo como substituição dos combustíveis fósseis nos processos industriais, sendo uma fonte de energia de melhor aplicação do que os resíduos sólidos heterogêneos.

Através da combinação de gaseificação de processo e acompanhamento industrial posterior podem ser implementados processos muito mais simples e, portanto, mais robustos do que seria possível na produção de gases de produto de alta qualidade. Em particular, freqüentemente pode ser dispensada uma complexa purificação do gás.

Como no caso da pirólise com processo intermediário, este conceito complementar também se aplica aqui, fazendo com que a tecnologia de gaseificação se

torne mais interessante. Em particular, no que se refere a exploração de frações especiais, como por exemplo, àquelas com baixo valor calórico ou alto nível de cloro e conteúdo de cinzas. Isto parece uma opção promissora para estes processos.

Considerando a necessidade de uma intervenção complexa durante o preparo dos resíduos sólidos urbanos para fins de garantia de um substrato de qualidade, esta tecnologia não se apresenta como uma opção alternativa para o processamento destes materiais (Quicker et al. 2014).

Assim a tecnologia não representa uma opção para o mercado brasileiro.

### **3.5.3 PLASMA**

#### **3.5.3.1 OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS**

Os tratamentos de plasma foram desenvolvidos inicialmente para fins militares, bem como para as viagens espaciais, tendo sido aplicados em metalurgia, bem como, desde meados da década de 1970, para o tratamento de resíduos.

Os procedimentos para o tratamento térmico dos resíduos regula a temperatura geralmente pela oxidação parcial do combustível (direta) ou a partir de um reator da parede e/ou a distribuição de calor médio (indireta). A produção de plasma representa uma outra possibilidade de fornecimento de calor direto. Para isso a alta quantidade de energia é fornecida a um gás de trabalho (oxidante ou inertes), pelo qual esta se ioniza. A energia pode ser fornecida tanto térmica e por meio de uma corrente elétrica e/ou por meio de um campo eletromagnético. O nível de energia presente no plasma é denominado de quarto estado de agregação (Helsen 2010).

A produção de plasma ocorre em um queimador de plasmas em decorrência de uma tensão elétrica formada pelo arco elétrico entre dois eletrodos. O queimador de plasma pode ser executado em duas variantes diferentes, como uma arco de luz transferidos e não transferido.

Os tratamentos térmicos dos resíduos geram os plasmas em um lapso de temperatura entre 1700-20000 °C.

Como vantagem do plasma temos um controle relativamente simples da temperatura durante o processo através da regulagem do rendimento elétrico. No caso da gaseificação do plasma este controle ocorre pela liberação de calor dos possíveis agentes oxidantes. Ainda, os processos de plasma são caracterizados por um grande calor de transição para o material que pode ser tratado, alta taxa de aquecimento na fase de arranque, bem como por pequenas demandas de áreas construídas. O tratamento com plasma resulta na decomposição de composto com elevada massa molecular (alcatrões etc.), que se desenvolvem nos processos alternativos térmicos. Devido às altas temperaturas de processo, dependendo da realização do procedi-



mento, é possível a fusão, até mesmo daqueles resíduos resistentes à temperatura de fusão (Helsen s.o.).

Caso a energia necessária ao processo seja oriunda exclusivamente do plasma, a planta terá um elevado custo de energia. Para mitigar este evento, temos que, na prática, os processos de plasma devem ocorrer em integração com outros processos combinados. Estes processos consistem em clássicas pirólises ou gaseificação em temperaturas moderadas, dos quais o produto da fase plasmática está a jusante da preparação do gás e/ou para a vitrificação dos resíduos. Dependendo do fornecedor temos diversas versões da planta de plasma, sendo que estes processos se diferenciam conforme o arranjo de baixa temperatura na etapa de conversão e a conversão do plasma.

Tal como acontece com o método alternativo clássico para o tratamento térmico de resíduos também o processo de plasma se diferencia em pirólise e gaseificação.

### **3.5.3.2 PIRÓLISE DE PLASMA**

O processo de pirólise de plasma combina a atmosfera inerte do processo a uma decomposição pirólítica com a entrada de energia pelo plasma. Deste modo, os resíduos empregados são convertidos, em condições de altas temperaturas a partir de 1700 °C, em moléculas individuais. Dependendo principalmente se a massa foi convertida indiretamente pela irradiação a partir do calor do plasma ou pelo contato direto com o plasma, a decomposição dos resíduos é realizada de duas maneiras: no primeiro caso, a radiação de calor dispara, análoga à pirólise convencional, um craqueamento térmico das macromoléculas. No contato direto entre resíduos e plasma, as moléculas de plasma, íons e elétrons do plasma – são agitadas em nível molecular e entram em contato direto com o material de alimentado.

Há uma série de estudos sobre o tratamento de diversos resíduos por pirólise de plasma em laboratório e em escala piloto. Estes resíduos foram em sua maioria classificados antes (plásticos, pneus usados) ou têm um alto risco ou potencial poluidor (resíduos hospitalares, cinzas de incineração) (Helsen s.o.). Os produtos da conversão de resíduos são geralmente um gás de alto poder calorífico e uma escória vitrificada. Apesar do aumento da atividade de pesquisa na área da pirólise de plasma, este ainda não tem seu desempenho atestado quando se trata de resíduos sólidos heterogêneos (Helsen s.o.).

Em contraste com o tratamento de resíduos sólidos, a pirólise de plasma é industrialmente aplicável para a conversão de líquidos e resíduos perigosos. A seguir, listamos dois exemplos de fornecedores:

-  Plascon, Fa. DoloMatrix, Austrália (Heberlein 2008), (Helsen s.o.), 10 plantas, média de produção de aprox. 100 kg/h



- 🌱 ShinMaywa Auto Engineering (Heberlein s.o.), 5 plantas, média de produção de aprox. 10 kg/h

O presente estudo tem como objetivo a conversão térmica de resíduos sólidos em combustíveis alternativos, desta forma métodos como a pirólise de plasma não serão tomados em consideração.

Assim a tecnologia ainda não representa uma opção para o mercado brasileiro.

### 3.5.3.3 GASEIFICAÇÃO DE PLASMA

Durante a gaseificação termoquímica é possível através da adição de um agente oxidante, utilizar uma parte da energia contida na matéria-prima como fonte de calor. No método da gaseificação de plasma a geração de plasma é usada como uma fonte adicional de energia. De acordo com as instruções do fabricante, esta abordagem também permite que sejam gaseificados resíduos de baixo poder calorífico. Na gaseificação do plasma, por motivações econômicas, geralmente é usado o ar como um agente de gaseificação. Para impedir a entrada de nitrogênio no gás de produto (aumento da taxa de fluxo de gás) são usados em alguns casos oxigênio puro ou vapor de água como agentes de gaseificação. Na gaseificação de plasma para o tratamento térmico de resíduos, o arco elétrico não transferido é a forma mais comum de geração de plasma. Estando em primeiro plano a aplicação do processo de vitrificação para as escórias, podem ser aplicados os arcos elétricos que introduz um alto fluxo de calor nas escórias.

A gaseificação de plasma é implementada em duas configurações diferentes:

- 🌱 Para o processo de estágio único, os resíduos serão gaseificados diretamente com o plasma e fundidos (Alter NRG, Europlasma). A energia adicional agregada pelo processo de plasma dependerá do valor calorífico dos resíduos. Em alguns métodos de tratamento, o poder calorífico dos resíduos serve para reduzir os custos de energia, podendo ser aumentado através da adição de uma fonte de energia adicional (carvão, coque). Devido ao custo ainda relativamente elevado de energia temos que a tendência para a aplicação dessas tecnologias é voltada para pequenos fluxos de resíduos com alto potencial contaminantes (amianto, cinzas, resíduos hospitalares) (Helsen s.o.).
- 🌱 Com o objetivo de ser capaz de tratar através do processo de plasma os resíduos urbanos de forma economicamente viável, alguns fabricantes oferecem processo de dois estágios (Energia Plasco, Planta de Força de Plasma Avançado, Europlasma). Na primeira fase, acontece a gaseificação dos resíduos em um reator "convencional". Os gases processuais serão tratados na segunda etapa por meio de plasma. Tendo em vista a conste-



lação de processos, as variantes de gaseificação de plasma devem ser realmente classificadas como fases de processamento do gás, desta forma o gás resultante é encaminhado para processo posterior visando sua melhor utilização (gás para motor). De acordo com as indicações dos fabricantes a execução em duas etapas da gaseificação de plasma em comparação ao processo de um estágio consegue uma economia significativa no consumo de energia (Helsen s.o.)

#### **3.5.3.4 AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA**

Os processos de plasma aplicados em resíduos foram desenvolvidos para a vitrificação de frações de resíduos particularmente contaminantes (p. ex. amianto). Atualmente, várias empresas tentam estabelecer processos de plasma para o tratamento de resíduos urbanos. Para tanto existem procedimentos visando o tratamento através do plasma para os resíduos em geral, bem como, aqueles que tratam apenas as frações contaminantes dos resíduos, tais como as cinzas voláteis e as poeiras de filtros, ou tratam de forma térmica o produto de gás gerado ("Lustrando").

Os processos são caracterizados pelos altos custos de investimento, operação e manutenção. A técnica é relativamente frágil. Os eletrodos têm vida curta, os componentes eletrônicos para a geração de plasma é sensível.

Atualmente, nenhum método de plasma pode atestar a maturidade da tecnologia em operação industrial de longa duração. Caso o processo continue em desenvolvimento até atingir sua consagração, poderá ser empregado para resíduos contaminantes, se tornando interessante, segundo as circunstâncias, na gestão de resíduos. No entanto, isto apenas será possível quando da existência de medidas legais que motivem sua aplicação, caso contrário, os altos custos impedirão o surgimento de um mercado para esta tecnologia.

De qualquer forma, o emprego da tecnologia de plasma para plantas de tratamento de resíduos em larga escala de resíduos é improvável devido a elevada demanda por energia, a susceptibilidade do processo e o elevado custo deste método (Quicker et al. 2014).

Assim a tecnologia ainda não representa uma opção para o mercado brasileiro.

#### **3.5.4 CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA (HTC)**

##### **3.5.4.1 OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS BÁSICAS**

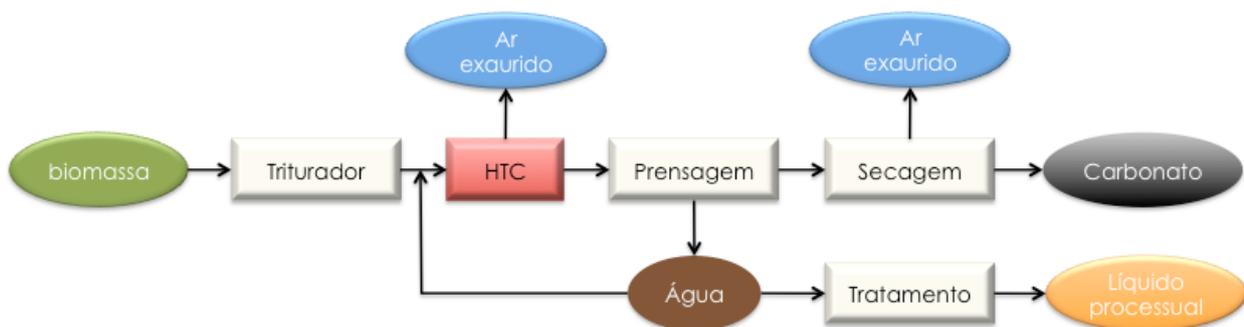
A carbonização hidrotérmica foi descoberta no início do século passado por Bergius. O uso do método de tratamento de resíduos apenas se tornou relevante nos

Últimos anos com base nos trabalhos do Prof. Antonietti do Instituto Max-Planck em Potsdam na Alemanha. Com base nestes estudos surgiu um verdadeiro boom de interessados em torno do tema onde muitas instituições de pesquisa e também uma série de empresas tem desenvolvido trabalhos nesta área.

Métodos HTC são adequados apenas para os resíduos orgânicos, como lodo de esgoto ou resíduos biológicos.

Através da carbonização hidrotérmica os materiais biogênicos tais como resíduos de jardins, orgânicos de cozinha ou lodo de esgoto, são transformados em carbono e materiais carbonizados de alto poder calorífico (Char). O tratamento da biomassa acontece em uma fase líquida, com períodos de retenção de 2-16 horas, em temperaturas entre 170 - 250 °C e uma pressão suficientemente elevada (10-40 bar), a fim de manter o estado líquido.

**Figura 3-19 - Esquema geral da carbonização hidrotérmica básica**



**Fonte: Elaborado pelo autor na base de Clemens, 2011.**

Além da subproduto o carbonizado são produzidos ainda gases permanentes (5 - 10 %) e águas residuais (5 -15 %). O ar de exaustão, dependendo da matéria-prima, geralmente contém quantidades significativas de sulfeto de hidrogênio. Também estão presentes monóxido de carbono, metano e outros hidrocarbonetos voláteis, tornando-se essencial uma purificação dos gases exauridos através de filtros de carvão ativado (Serfass 2014).

O efluente líquido contém teor alto de carga orgânica. Os valores típicos de DQO estão entre 30.000 a 100.000 mg/l. A relação DQO/DBO5 situa-se entre 2 e 2,5, quer dizer é refratária, ou seja, presença de DQO não-biodegradável, gerando dificuldades durante o tratamento das águas processuais. Também a carga de nitrogênio atinge valores de até 5.000 mg/l durante o tratamento de águas de processo (Serfass s.o.).



### 3.5.4.2 AVALIAÇÃO DE TÉCNICA

Atualmente, nenhum processo HTC encontra-se em operação industrial de longo prazo. Há toda uma gama de plantas-piloto semi-industriais, mas estas são usadas apenas em modo de campanha para examinar, por exemplo, substratos especiais para potenciais clientes ou para o desenvolvimento da tecnologia. Via de regra, apenas o processo-chave, ou seja, a unidade de carbonização geralmente associada à etapa de desidratação é implementado. A cadeia completa de processo para o tratamento de todos os fluxos secundários (águas residuais, ar de exaustão) geralmente não são implementadas. (Quicker et al. 2014).

Assim a tecnologia ainda não representa uma opção para o mercado brasileiro.

## 3.5.5 DESPOLIMERIZAÇÃO CATALÍTICA EM BAIXA PRESSÃO (KDV)

### 3.5.5.1 OBJETIVO E CARACTERÍSTICAS

O procedimento KDV tem duas aplicações de tratamento diversas:

- 🌱 Tratamento 1: Conversão de resíduos e substâncias residuais ricas em carbono, como plásticos, têxteis, papel, etc., em frações de alta energia de petróleo, gás e carvão (Char).

Temos como substratos apropriados para esta tecnologia as diversas formas de biomassa com potencial para geração de energia renovável. Além das matérias-primas como a biomassa tradicional temos ainda atestada o emprego da tecnologia para as algas. Também lodos municipais e industriais (fábricas de curtumes, indústria de papel, etc.) são geralmente processáveis pelo método REIND.

O objetivo principal é a maior reutilização dos produtos existentes de petróleo, carvão e gás, em comparação com o material de origem.

- 🌱 Tratamento 2: Processamento de materiais compostos-plásticos-metals por transferência da matriz plástica integrada com metais e minerais em uma forma mais simplesmente separável pelo uso do processo de olidificação. Por exemplo, os resíduos eletrônicos que contêm altas quantidades de metais preciosos e minerais integrados aos plásticos, e também resíduos de fios elétricos, sucata automotiva e similares são adequados como matéria-prima.

O objetivo principal é empregar a olidificação para otimizar a reciclagem dos metais e minerais inclusive as terras raras e metais estratégicos. A produção de derivados de petróleo, carvão e gás pode ser entendido como um objetivo secundário.

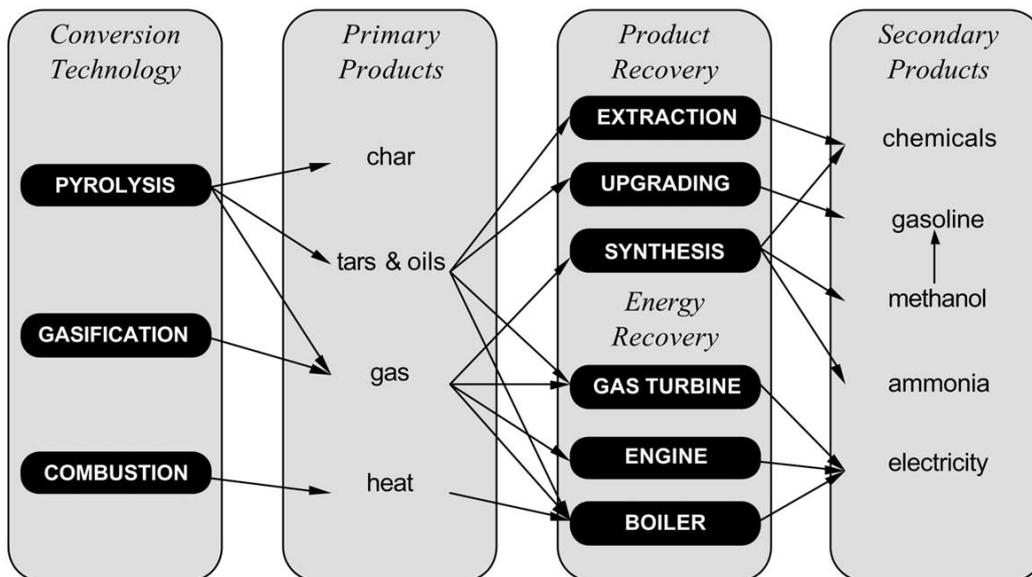
A despolimerização catalítica em baixa pressão tem que ser enquadrada como um processo de pirólise. Estabelecendo um comparativo entre a pirólise e os processos de gaseificação e incineração, temos que a pirólise é a que mais se identifica quanto as suas características de temperatura e de pressão.

No método KDV, em contraste com a clássica pirólise, se trabalha através da utilização de catalisadores, a temperaturas mais baixas, até 500 °C e sob pressão normal, resultando em baixo consumo de energia e menor formação de dioxinas e furanos (Figura 3-20).

A partir do processo se produzem quatro produtos:

- 🔄 Óleo,
- 🔄 Carbono (Char), que consiste em carbono e substâncias minerais a partir da matéria-prima,
- 🔄 Gás rico em energia,
- 🔄 Água através do processo de secagem.

**Figura 3-20 - Produtos oriundos da conversão pela pirólise, gaseificação e combustão**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.

As macromoléculas orgânicas (polímeros) presentes nas frações plásticas para serem convertidas em baixo peso molecular, base líquida devem ser divididas em cadeias de polímeros. Esta divisão ocorre por uma reação endotérmica, onde para sua implementação é necessária adição de energia na forma de calor. A Tabela 3-6 contém informações sobre as temperaturas de decomposição de diversos materiais plásticos.

**Tabela 3-6 - Comportamento de vários polímeros artificiais em diferentes temperaturas**

Plásticos	Temperatura de deformação	Temperatura de decomposição	Temperatura de chama	Temperatura de ignição	Poder calorífico	Densidade
	°C	°C	°C	°C	MJ/kg	g/cm <sup>3</sup>
PE	60-70	340-440	340	350	46,5	0,92-0,96
PP	85-90	330-410	350-370	390-410	46,0	0,91
PS	88	300-400	340-350	490	42,0	1,05
PVC	70-80	200-300	390	455	20,0	1,40
PU	180	220	310	415	n.b.	1,2
PA 6	200	300-350	420	450	32,0	1,13
PA 66	250	320-400	490	530	32,0	1,14
PC	150-155	350-400	520	não	31,0	1,2
PTFE	110	500-550	560	580	4,5	2,20
POM	170	220	350-400	ca. 400	17,0	1,42
ABS	90-121	-	390	480	36,0	1,02-1,07
PETP	80	285-305	440	480	21,5	1,34
PMMA	84-108	170-300	300	450	26,0	1,18
PAN	78-81	250-300	480	560	n.b.	1,15-1,17

Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.

Atividades para a produção de óleo a partir de resíduos plásticos existem desde o início de 1970 na Alemanha e no Japão.

Novas iniciativas foram lançadas na Alemanha na década de 90, quando grandes quantidades de resíduos de plásticos estavam disponíveis como resultado do regulamento das embalagens e da criação da coleta DSD GmbH. As empresas químicas, como a BASF e Veba Oil analisaram várias opções de utilização de resíduos plásticos da coleta DSD. Também no Japão as atividades de reciclagem de matéria-prima de resíduos plásticos na segunda metade da década de 90 receberam um novo impulso após a previsão de que, em 2000, seria aplicado um regulamento das embalagens. As plantas de liquefação na Alemanha e no Japão operaram sob altos custos em decorrência dos processos de triagem e pré-tratamento dos resíduos plásticos e também devido ao fato de que resultavam dos processos pequenas quantidades de óleos e resíduos de baixa qualidade.

A partir de 2004 surge a terceira geração de pirólise. A terceira geração deste método tem como objetivo a simplificação dos sistemas de engenharia de produção de combustível e garantia de viabilidade econômica mesmo que seja em pequena capacidade de produção, renunciando aos processos de alta complexidade técnica comparáveis as tecnologias de refino, tais como o craqueamento de óleos pesados em altas temperaturas e pressões para a produção de combustível. Os catalisadores devem acelerar o processo, reduzir as temperaturas de fusão à pressão normal e melhorar a qualidade do produto.

Estes procedimentos podem ser agrupados sob o nome de conversão catalítica em baixa pressão (KDV). Vários sistemas com diferentes níveis de desenvolvimento estão em operação em todo o mundo. Na prática, estão disponíveis dois tipos de processos:

- 🌱 Processo descontínuo (batelada);
- 🌱 Processo contínuo.

Processos descontínuos ou por batelada consistem em unidades principais de processo formadas por um reator e condensador. Os materiais a serem olidificados serão introduzidos no reator, aquecidos, a água será extraída e, em seguida, os compostos de C são conduzidos para a fase de vapor. Na segunda fase do processo, ocorre a condensação em uma ou mais etapas. Os procedimentos por batelada não demandam exigências complexas para o material de entrada, podendo ser processadas frações de até 50 cm.

Processos contínuos são muito exigentes em relação ao preparo do material de entrada. É necessária uma trituração intensiva do material de entrada. O material de entrada triturado é conduzido continuamente, por uma rosca extrusora, durante a alimentação do reator. Neste reator, o material será seco, liquefeito e evaporado sob aplicação de calor. Então é transferido para a unidade de condensação.

Como material de saída são produzidos, nos dois tipos de processos, subprodutos na forma de óleo bruto, gás combustível e carvão como subproduto sólido.

Depois de avaliar a literatura e a partir de experiência própria de pesquisa e operação de planta podemos descrever como insumos adequados para o processamento KDV de acordo com a tecnologia Reind:

- 🌱 Plásticos: Poliolefinas particularmente adequadas, entre outras, PE, PP, PMP,
- 🌱 Combustível derivado de resíduos (CDR)
- 🌱 Papel/papelão/cartão,
- 🌱 Têxteis,
- 🌱 Frações com alto poder calorífico captadas em mineração de aterros sanitários,
- 🌱 Borracha e pneus,
- 🌱 Compostos-metal-plástico como as frações leves de sucata automobilística,
- 🌱 Resíduos eletrônicos, fios elétricos, etc.
- 🌱 Especificações para a olidificação de matéria-prima estão listadas abaixo:



- ♻️ limitar o tamanho do grão
- ♻️ limitar a proporção de PVC e PET para < 5 %,
- ♻️ baixo teor mineral e teor de água,
- ♻️ baixo teor de contaminantes.

Os fluxos de massa dependerão dos parâmetros operacionais. No entanto, também têm importância decisiva a qualidade do material de entrada. Dependendo das substâncias de entrada e dos sistemas de processamento, teremos diferentes variações do fluxo de massa no balanço operacional, quais sejam:

- ♻️ Óleo 34-82 %,
- ♻️ Gás 5-57 %,
- ♻️ Carvão 4-47 %,
- ♻️ Água 1-39 %.

A partir dos resíduos plásticos maiores quantidades de óleo podem ser geradas com valores que alcançam até 89 % da quantidade de matéria-prima. Em paralelo, o gás, o carvão e os níveis de água são muito baixos. As quantidades de óleo geradas a partir do CDR alcançam valores de 52-65 % da quantidade de matéria-prima, devido a sua menor densidade de energia quando comparado aos plásticos puros. Deve-se considerar que os sólidos remanescentes são compostos em grande parte de resíduos minerais e, assim, tem um teor relativamente baixo de energia e aumentam a incorporação de carbono nas frações sólidas. A umidade é bem abaixo de 10 % no processamento de misturas plásticas e CDR de alta qualidade. Os resultados referentes às quantidades de óleo produzidos em resíduos urbanos ou rejeitos são bem mais desfavoráveis.

Para os rejeitos coletados na Alemanha os teores de umidade variam entre 30 a 40 %. Em países onde a coleta seletiva de orgânicos não esteja instituída, o teor de umidade será bem acima do 50 %. Na maioria dos países emergentes e em desenvolvimento, assim como no Brasil, é registrada a umidade variando entre 55 a 65 %. Os valores de poder calorífico identificados nos resíduos domiciliares estão na ordem de apenas 5.500 a 8.000 kJ/kg. Isto resulta em um potencial pequeno de geração de óleo abaixo de 30 %. Os altos teores de umidade demandam altos custos de energia para a secagem dos materiais antes do procedimento de olidificação.

O método KDV produz grandes quantidades de óleo de relativamente boa qualidade através do preparo das frações plásticas do grupo de poliolefinas. Também outros plásticos mistos e frações de alto poder calorífico dos rejeitos (CDR) são adequados, quando os requisitos de qualidade anteriormente apresentados são levados em conta. Métodos KDV não são, portanto, adequados para o tratamento de resíduos domiciliares in natura.



O carvão é adequado como fonte alternativa de energia em fábricas de cimento e plantas de força. Entende-se que não ocorrerão custos extras de destinação devido ao alto teor de energia e a boa consistência do produto para o sistema de dosagem, e ainda pode-se esperar uma receita extraordinária. Coque de petróleo, um produto similar com um valor calorífico um pouco maior, em torno de 37.000 kJ/kg, está sendo negociado atualmente por \$ 140/t. Para que se possa alcançar um bom valor de mercado temos como requisito para este carvão um alto poder calorífico acima de 20.000 kJ/kg. Isto significa que apenas poderão ser processados, os materiais que têm baixo conteúdo mineral. O gás produzido tem um conteúdo elevado de energia e pode ser utilizado para recuperação de energia, por exemplo em cogeração em CHP.

### **3.5.5.2 AVALIAÇÃO DA TÉCNICA**

Segundo especialistas, as técnicas de conversão catalítica de acordo com o método KDV demonstraram a funcionalidade do conceito. Esta colocação só encontra amparo nas plantas de baixa capacidade de processamento. As tecnologias conhecidas, contínuas ou descontínuas, têm capacidade de processamento de até 250 kg por hora. Maior capacidade de processamento deve ser alcançado através de concatenação de vários módulos.

Poucas plantas em operação têm informações detalhadas sobre as qualidades dos produtos gerados. Em poucas plantas pesquisadas sistematicamente, óleo utilizável, produtos de gás e carvão utilizáveis poderiam ser produzidos. Supõe-se que sejam processados plásticos de alta qualidade, misturas de plástico ou CDR. A conversão dos RSU é possível, em princípio, porém as qualidades dos produtos serão inferiores.

Balanços energéticos estão disponíveis apenas em alguns sistemas. Os resultados mostram que apenas no processamento de plásticos de alta qualidade, misturas de plástico ou CDR elevadas quantidades de óleo são produzidas e assim, resultam em um balanço energético positivo. Na conversão de RSU o balanço energético, de acordo com cálculos próprios, é claramente negativo. Isto se deve à pequena quantidade de óleo produzida e aos elevados custos de secagem.

Neste momento, os sistemas KDV são empregados de forma descentralizada para o processamento de quantidades relativamente pequenas de resíduos. Para plantas de larga escala ainda é necessário atestar sua viabilidade operacional e condições de manutenção. Mesmo com estas incertezas, o método estudado tem um elevado potencial de desenvolvimento futuro.

Assim a tecnologia ainda não representa uma opção para o mercado brasileiro.

## 4 Referências de Plantas de Tratamento

### 4.1 NA EUROPA

O mercado de plantas de tratamento mecânico-biológico (TMB plantas) continua a crescer. A quantidade de TMB plantas na Europa aumentou por aproximadamente 60 % entre 2005 e 2011, remontando em 330 plantas em operação e mais 126 plantas em fase de planejamento. Nesse mesmo período, as capacidades de tratamentos aumentaram cerca de 70 % processando 33 milhões toneladas anuais. Desse modo, o crescimento continuará nos próximos cinco anos onde espera-se que o número de plantas alcançará quase 450 com capacidade instalada para processar 46 milhões toneladas anuais.

A Diretiva de Aterro da UE particularmente limita o aterramento de resíduos biodegradáveis e estipula o pré-tratamento de RSU. Para atendimento destes requisitos temos que o TMB é a única alternativa tecnológica à incineração, sendo que esta última enfrenta diversos desafios políticos. Ao mesmo tempo, as plantas TMB oportunizam a geração de combustíveis alternativos de alta qualidade para serem empregados em fábricas de cimento, plantas de força tanto para CDR quanto para carvão.

### 4.2 NA ALEMANHA

Segundo Michael Balhar em GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS:

“Na Alemanha, atualmente 44 plantas com tecnologia TMB estão operando no tratamento de resíduos sólidos urbanos e rejeitos. A tecnologia TMB na Alemanha se encontra em um estado de desenvolvimento alto, mas também há forte demanda na Europa e no mundo.

A maior parte das plantas em funcionamento na Alemanha foi construída nos anos de 2001 a 2005, devido à proibição da disposição de resíduos não tratados em aterros, a partir de 1º de junho 2005 (data firmada na “TA-Si”).

A capacidade total de tratamento das 44 plantas é de, aproximadamente, 5,5 milhões Mg/a. Além disso, 2-3 milhões de resíduos são tratados apenas por processos mecânicos para a produção de combustíveis alternativos, em mais 20 plantas. A fração fina resultado deste tratamento é submetida a um tratamento biológico em uma planta TMB, para estabilização e disposição em aterro, ou seca por processos biológicos para o aproveitamento energético.

Os conceitos e a operação das plantas existentes hoje na Alemanha, foram, e ainda são, marcadas pelas exigências legais de operação, estipuladas na diretiva sobre a disposição de resíduos (hoje: diretiva de aterros) e na trigésima diretiva para a



execução da lei federal relativa à proteção de emissões (30. BImSchV; diretiva para plantas de tratamento biológico de resíduos). As plantas demonstram grande variedade em relação à capacidade, equipamento técnico e orientação conceitual. Todas as plantas têm em comum a separação dos resíduos em diferentes fluxos os quais são submetidos aos demais tratamentos, ou dentro da própria planta, ou externamente. O combustível alternativo é produzido a partir da separação da fração de elevado poder calorífico, ou após secagem biológica ou térmica, de todos os resíduos.

Em todas as plantas, o objetivo é a separação e o beneficiamento dos resíduos apropriados para a reciclagem ou para o aproveitamento. A operação das plantas é sujeita a constantes mudanças das condições legais, conforme a legislação sobre resíduos, e econômicas, exigindo altos padrões de qualidade, economicidade e flexibilidade em sua gestão.

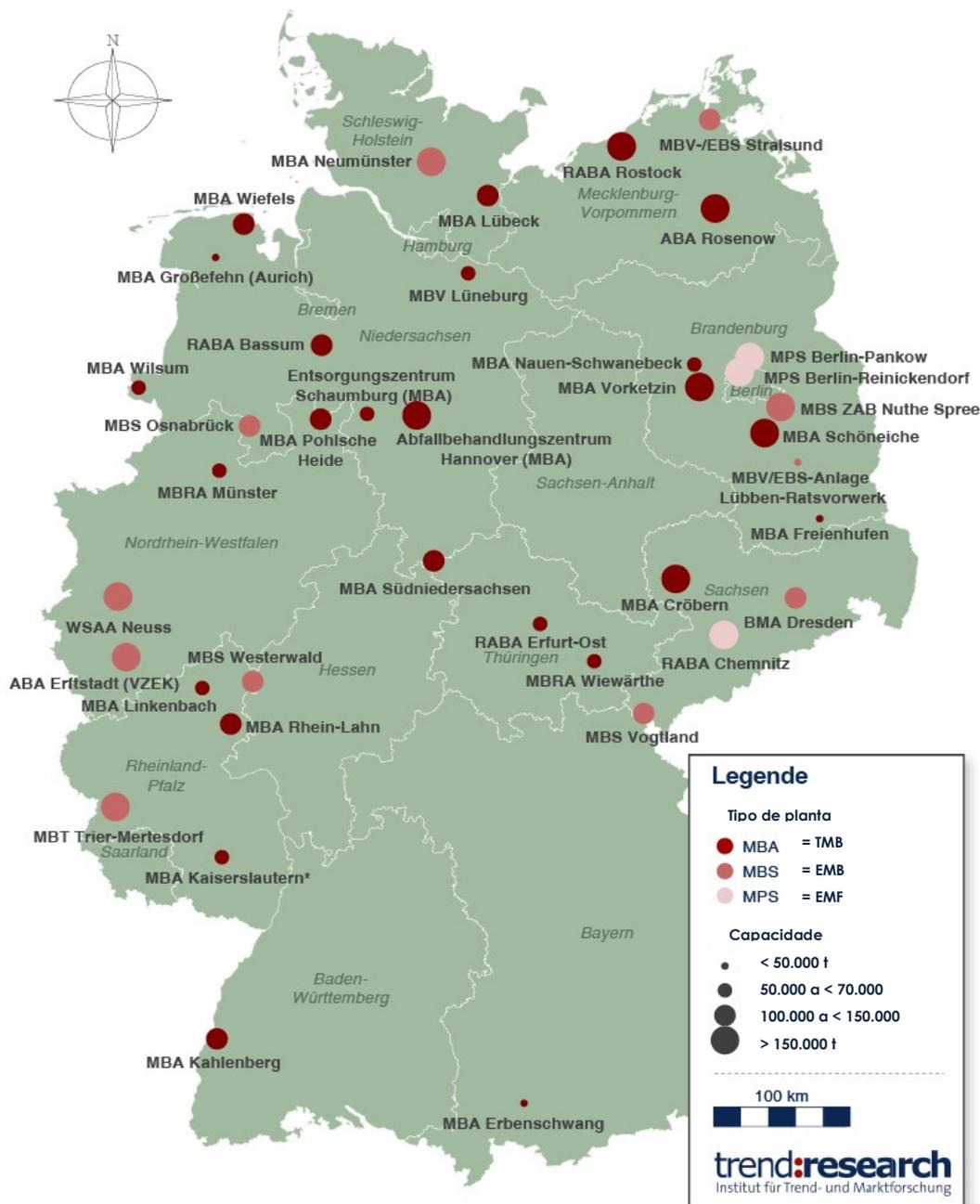
A Figura 4-1 representa a localização das plantas construídas na Alemanha, com tecnologia TMB, EMB e EMF. Informações detalhadas sobre cada planta se encontram no "relatório de TMB" (MBA-Steckbriefe), publicado pela ASA.

O processo mais aplicado para o tratamento de materiais específicos é o **tratamento mecânico-biológico (TMB)**, instalado em 29 plantas. A primeira etapa deste tratamento consiste na separação de materiais apropriados para a reciclagem ou para o aproveitamento energético. Em seguida, o material restante, de granulometria menor, é submetido a um tratamento biológico.

O tratamento biológico pode consistir em uma etapa de compostagem (túnel, leiras, trapezoidais), ou em uma etapa de biodigestão anaeróbia (a seco ou a úmido). O produto final do tratamento biológico é um material apropriado para a disposição. Um desenvolvimento recente, praticado em algumas plantas, consiste na secagem do material de granulometria menor para o aproveitamento energético.

O tratamento por **estabilização mecânica-biológica (EMB)**, aplicado em 12 plantas, se constitui em um processo alternativo. O objetivo da EMB é a secagem biológica de todos os resíduos, ou, segundo conceito da planta, apenas da fração de alto poder separada para produção de combustíveis alternativos, e a redução expressiva da quantidade de resíduos destinados à disposição. A primeira etapa do tratamento consiste no acondicionamento dos resíduos para a secagem a jusante. Os resíduos são conduzidos para a etapa da secagem biológica, principalmente para redução da umidade, sem maior degradação dos compostos orgânicos. O calor liberado pelo autoaquecimento dos compostos orgânicos dos resíduos é utilizado para a evaporação da umidade dos resíduos. Em seguida, os resíduos secos são submetidos a um tratamento mecânico para a separação de metais, minerais e corpos estranhos, para a produção de uma ou várias frações de alto poder calorífico, de qualidades diferenciadas.

Figura 4-1 – Plantas de TMB, EMB e EMF na Alemanha



Fonte: Briese e Gatena, 2015.

A **estabilização mecânica-física (EMF)**, aplicada em 3 plantas, se constitui em mais uma alternativa de tratamento de resíduos. Os componentes de alto poder calorífico contidos nos resíduos sólidos urbanos são separados por processos mecânicos e físicos e processados em várias etapas, para produção de um combustível alternativo. O processo compreende a separação dos componentes de baixo poder calorífico e dos metais (ferrosos e não ferrosos), e várias etapas de trituração. Se necessário, a fração rica em contaminantes pode ser separada e a fração de alto poder calorífico pode ser submetida a secagem em secador rotativo, por exemplo.



Além dos materiais destinados à reciclagem ou ao aproveitamento material, o tratamento de resíduos fornece combustíveis alternativos na ordem de até 3 milhões de Mg/a. O poder calorífico deste material pode ser comparado ao da lenha ou da lignite. Geralmente, este tipo de combustível alternativo tem em sua composição mais de 50 % de componentes biogênicos, desta forma neutros em CO<sub>2</sub>. Os gestores das plantas de TMB, portanto, contribuem para atingir os objetivos relacionados à proteção do clima.

Em uma parte das plantas associadas na ASA, a fração biogênica dos resíduos é submetida a um tratamento anaeróbio (biodigestão). O biogás produzido por estes processos é transformado em eletricidade e calor, em sistemas de cogeração.

Os materiais residuais produzidos pelos tratamentos mecânico-biológicos são dispostos em aterros de tal maneira que não constituam perigo para as futuras gerações, possibilitando a utilização da infraestrutura existente por um tempo prolongado, devido à redução de massa e a otimização de sua densidade.

No que se refere às plantas de recuperação energética através da biodigestão, temos que na Alemanha, segundo artigo técnico publicado na edição de dezembro da revista técnica Müll und Abfall (FRICKE; HEUSSNER; HUTTNER; TURK; PEREIRA; BAUER; BIDLINGMAIER, 2013b), atualmente, são operadas 63 plantas de digestão anaeróbia para o tratamento de resíduos orgânicos e verdes (capacidade de 1,36 milhões de t/a), assim como 12 plantas TMB para o tratamento de resíduos sólidos urbanos (capacidade de 680.000 t/a), resultados esses que podem ser observados na Tabela 4-1.

É possível afirmar que os conceitos tecnológicos das plantas de tratamento, tanto para o processamento dos resíduos orgânicos biológicos quanto para os domiciliares, geralmente aplicam as mesmas tecnologias. Desta forma, processos de tratamento contemplam etapas que vão desde o preparo e beneficiamento do material descarregado até a seleção de contaminantes, para garantir não apenas a qualidade dos produtos gerados, mas também reduzir a possibilidade de distúrbios mecânicos no fluxo do processo.

**Tabela 4-1 - Status quo relativo às instalações de tratamento para resíduos orgânicos e verdes (Base 2012) assim como as instalações de tratamento mecânico-biológico de resíduos domiciliares (Base 2011), todas as instalações situadas na Alemanha**

<b>Valorização de resíduos orgânicos e verdes</b>	
Capacidade de tratamento instalada	12,0 milhões t/a
Número de plantas de compostagem	990
Quantidades processadas	9,6 milhões t/a
Número de plantas de fermentação	63
Capacidade de processamento da fase de fermentação	1,36 milhões t/a

Valorização de resíduos orgânicos e verdes	
Tratamento de resíduos domiciliares (TMB)	
Capacidade de tratamento instalada	5,5 milhões t/a
Quantidades de plantas	44
Número de plantas de fermentação	12
Capacidade de processamento da fase de fermentação	0,68 milhões t/a

Fonte: Fricke, 2013.

#### 4.2.1 EXEMPLOS DE PLANTAS DE TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO

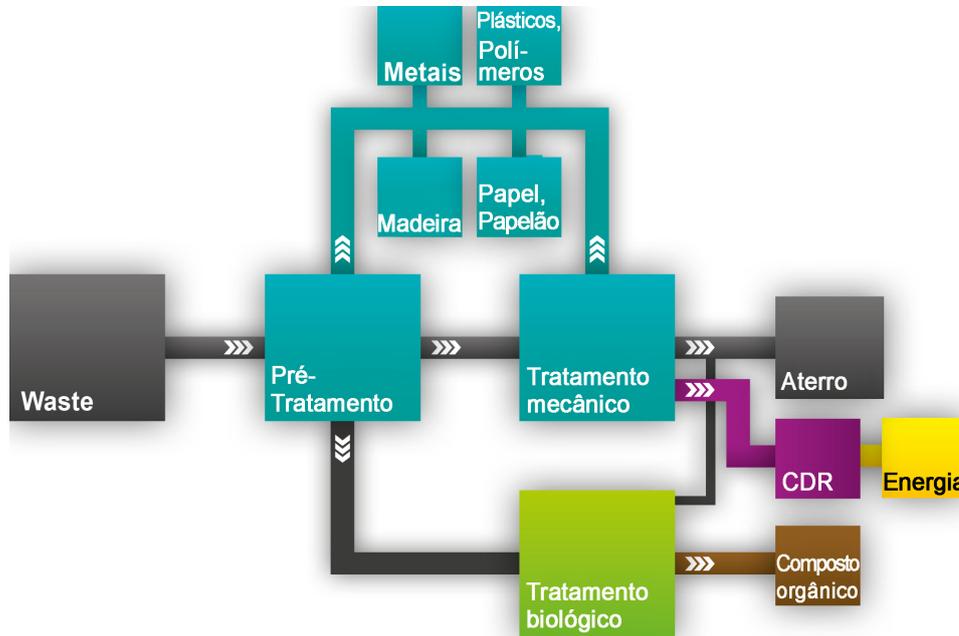
A busca por alternativas para minimizar os impactos gerados pela gestão tradicional dos resíduos pode ser percebida em âmbito global. Diversos países desde os mais industrializados até os subdesenvolvidos têm já alguma ação implementada, seja em pequena escala e envolvendo poucos recursos seja em larga escala em plantas automatizadas. Avaliando o cenário global podemos concluir que há demanda por tecnologias simples, por exemplo os revolvedores de leiras com maior demanda de área, emissão de odor mas de baixo investimento e baixa complexidade operacional, estes classificados como sistemas extensivos, para tecnologias medianas como a apresentada neste relatório com sistema intensivo de aeração e leiras envelopadas que mitiguem o odor e permitem que a estabilização ocorra em um período mais curto a partir de uma decomposição integralmente controlada e remontam a baixa complexidade operacional, até tecnologias de alta complexidade técnica e operacional, como por exemplo os túneis e galpões aerados que apesar de menor demanda de área e maior controle de emissões, resultam em custos mais elevados de construção civil e equipamentos.

Conforme comentado por EGGERSMANN em Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos (FRICKE et al., 2015), as exigências e condições específicas definem as soluções, portanto cada projeto deverá ser planejado individualmente. Devido a possibilidade de prover uma construção modular quando se trata do tratamento mecânico-biológico, um grande número de diferentes configurações estará disponível, podendo ser agrupadas da seguinte maneira:

-  Básico;
-  Intermediário;
-  Complexo; e,
-  Complexo Híbrido.

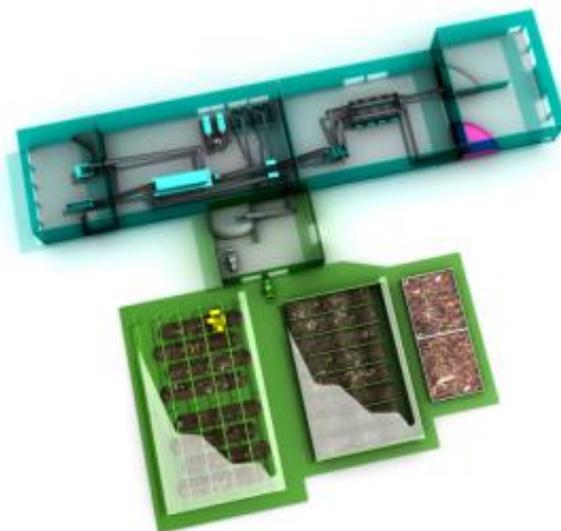
Como exemplo, a seguir são descritas uma configuração dos grupos “Intermediário” e “Complexo”.

**Figura 4-2 - Fluxograma do tratamento mecânico-biológico com compostagem**



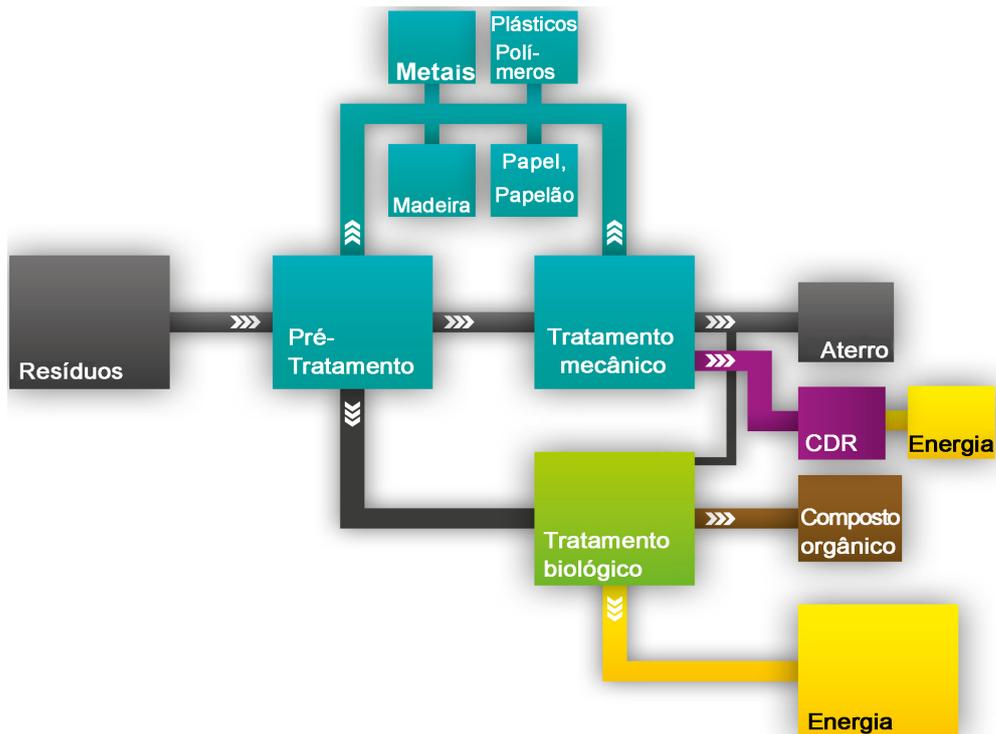
Fonte: Arquivo Eggersmann.

**Figura 4-3 - Layout do tratamento mecânico-biológico com compostagem**



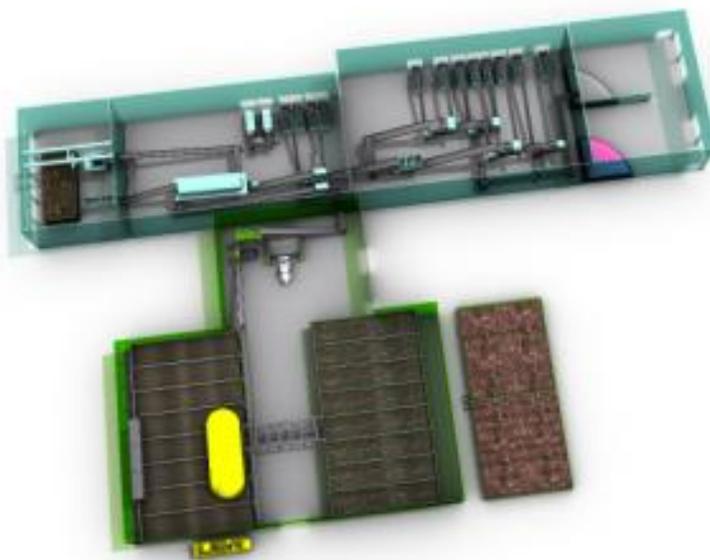
Fonte: Arquivo Eggersmann.

Figura 4-4 - Fluxograma do tratamento mecânico-biológico com biodigestão anaeróbia e compostagem



Fonte: Arquivo Eggersmann.

Figura 4-5 - Layout do tratamento mecânico-biológico com biodigestão anaeróbia e compostagem



Fonte: Arquivo Eggersmann.

### 4.3 NO BRASIL

Avaliando o comportamento do mercado após a edição da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010 temos um importante movimento no sentido de contratar e planejar plantas de tratamento por parte do poder público (Tabela 4-2 e Tabela 4-3). Tal fato se deve principalmente a necessidade de atendimento das prerrogativas legais mas também não deixa de estar ancorado no entendimento de que resíduos são àquelas frações passíveis de valorização e desta forma apenas os rejeitos, frações que não encontram mais assistência tecnológica no mercado para sua transformação, é que deverão ser aterrados.

Plantas em planejamento previstas nos PGIRS municipal:

**Tabela 4-2 – Plantas em planejamento**

Município		Tipo de tratamento
2010-2015		
GUARULHOS-SP	1.312.197	TMB com fermentação
CARAPICUIBA-SP	390.073	TMB com fermentação
VOTUPORANGA-SP	90.508	TMB
RIO BRANCO-AC	363.928	TMB com fermentação
CUIABA-MT	542.861	TMB
MARINGÁ-PR	391.698	TMB com fermentação
LONDRINA-PR	543.003	TMB
RIO DE JANEIRO-RJ	6.453.682	Tratamento mecânico
SÃO PAULO - SP	11.895.893	TMB com fermentação
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP	681.036	TMB com fermentação
CONSÓRCIO CISBRA - SP (12 Cidades)	302.116	TMB com fermentação
CONSÓRCIO AMMVI - SC (14 Cidades)	718.440	TMB com fermentação
CONSÓRCIO AMAVI - SC (28 Cidades)	273.479	TMB com fermentação

Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.


**Tabela 4-3 – Plantas contratadas entre 2010 e 2014**

Município		Tipo de tratamento
2010-2014		
EMBU-SP	259.053	TMB com fermentação
COTIA-SP	225.306	TMB com fermentação
ITU-SP	165.511	TMB com fermentação
JACAREI-SP	224.826	TMB com fermentação
PIRACICABA-SP	388.412	TMB com fermentação
SÃO BERNARDO DO CAMPO-SP	811.489	TMB com incineração
BARUERI-SP	259.555	Incineração
SÃO PAULO-SP	11.895.893	Tratamento mecânico
PAULÍNIA-SP	95.221	Tratamento mecânico
COROADOS-SP	5.685	TMB
SÃO LUIS-MA	1.064.197	TMB
PAULISTA-PE	319.769	Tratamento mecânico
CAMPO GRANDE-MS	843.120	Tratamento mecânico
REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE-MG	2.491.109	TMB

Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.

Segundo a CETESB, em Junho de 2015, 5 plantas de compostagem de RSU estavam licenciadas e uma série de projetos de valorização de resíduos que contemplavam as mais diversificadas formas de plantas de tratamento estavam em análise, como seguem:

**Tabela 4-4 - A Alternativas tecnológicas para tratamento de RSU- licenciadas e em licenciamento no Estado de São Paulo**

Município	Empresa	Tecnologia	Status
Piracicaba	Piracicaba Ambiental S.A.	Tratamento Mecânico Biológico – TMB e Central	LO expedida
Jacareí	Concessão Ambiental Jacareí Ltda	Tratamento Mecânico Biológico – TMB e Central	LP em análise
Embú das Artes	Embú Ecológica Ambiental S/A	Tratamento Mecânico Biológico – TMB	LP em análise
Cotia	Cotia Ambiental S/A	Tratamento Mecânico Bio-	LP em análise



Município	Empresa	Tecnologia	Status
		lógico – TMB	
<b>Igaratá</b>	COMG Sustentabilidade Ltda	Tratamento Mecânico Biológico – TMB	LP em análise
<b>Paulínia</b>	ESTRE Ambiental S.A.	Produção de combustível derivado de resíduos-CDR	Licenciado com LOR
<b>Palmital</b>	PCD Ambiental	Produção de combustível derivado de resíduos-CDR	LO em análise
<b>Barueri</b>	FOXX URE Ambiental Empreendimentos Ltda	Usina de Recuperação de Energie-URE	LI em análise
<b>São Bernardo do Campo</b>	SBC Valorização de Resíduos S.A.	Sistema de processamento e aproveitamento de resíduos (inclui TMB) e URE	EIA/RIMA em análise

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

## 5 Matriz de Impacto Tecnológico

Para formar uma matriz de impacto tecnológico foi necessário abordar aspectos de ordem econômica, ambiental e operacional. Estas abordagens permitem comparar as tecnologias, suas vantagens e fragilidades. Estes aspectos foram adaptados dentro de uma matriz formulada em “Relatório Ambiental Preliminar – RAP” (PEREIRA; BENVENUTO; LINDNER, 2006) onde os impactos ambientais e sua importância para o meio ambiente e as principais medidas mitigadoras foram contempladas pelo projeto do Parque de Valorização de Resíduos Urbanos, no município de São Sebastião, no estado de São Paulo.

Segundo definido no RAP:

A matriz de impacto tecnológico visa traçar linhas multidisciplinares de avaliação desde caracterização técnica, capacidade de adaptação da tecnologia, riscos envolvidos na rotatividade da equipe, disponibilidade de peças de reposição, risco de importação, capacitação técnica, linhas de financiamento, licenciamento ambiental, educação ambiental e inclusão social.

Na matriz, o campo “Impactos Ambientais” serve para descrever os impactos ambientais associados aos aspectos ambientais. São estes impactos que foram avaliados individualmente no campo “Avaliação” [...]. O número de pontos visto entre parênteses, serve para caracterização do grau de cada impacto, conforme será explicado a seguir.

O campo “Avaliação” foi subdividido nos seguintes itens:

- 🌱 Abrangência (A) – o impacto ambiental deve ser avaliado conforme abaixo:
- 🌱 Local (1 ponto) – aquele cujos efeitos do aspecto ambiental se fazem sentir apenas no próprio sítio onde se deu a ação e suas imediações;
- 🌱 Regional (2 pontos) – aquele cujos efeitos do aspecto ambiental se propagam por uma área além das imediações do sítio onde se dá a ação;
- 🌱 Global (3 pontos) – aquele cujos efeitos do aspecto ambiental atingem um componente ambiental de importância coletiva, nacional ou até mesmo internacional.
- 🌱 Probabilidade (Pr) – os impactos ambientais potenciais associados à situações de risco devem ser avaliados segundo sua probabilidade de ocorrência, conforme os critérios a seguir:
  - **Alta** (3 pontos) – aquele cuja possibilidade de ocorrência seja muito grande ou existam evidências de muitas ocorrências no passado (no mínimo um caso em um ou dois anos, por exemplo).
  - **Média** (2 pontos) – aquele cuja possibilidade de ocorrência seja razoável ou existam evidências de algumas ocorrências no passado (no mínimo um caso em três ou quatro anos, por exemplo).
  - **Baixa** (1 ponto) – aquele cuja possibilidade de ocorrência seja nula ou muito remota (no mínimo um

- caso em cinco anos ou mais, por exemplo) ou não existam evidências de ocorrência no passado.
- ♻️ Severidade (Sr) – os impactos ambientais devem ser avaliados segundo sua criticidade em relação ao meio ambiente, em três tipos de categorias:
    - **Severo** (3 pontos) – aquele cujo impacto ambiental adverso cause danos irreversíveis, críticos ou de difícil reversão e/ou ponha perigo a vida de seres humanos externos ao sítio.
    - **Leve** (2 pontos) – aquele cujo impacto adverso cause danos reversíveis ou contornáveis e/ou ameace a saúde de seres humanos externos ao sítio.
    - **Sem dano** (1 ponto) – aquele cujo impacto ambiental cause danos mínimos ou imperceptíveis.
  - ♻️ Detecção (De) – os impactos ambientais potenciais e reais devem ser avaliados segundo o seu grau de detecção, conforme critérios a seguir:
    - **Difícil** (3 pontos) – é improvável que o impacto ambiental real ou que o aspecto ambiental potencial, neste último caso quando o mesmo vier a se manifestar, seja detectado através dos meios de monitoramento disponíveis.
    - **Moderado** (2 pontos) – é provável que o aspecto ambiental real ou que o aspecto ambiental potencial, neste último caso quando o mesmo vier a se manifestar, seja detectado através dos meios de monitoramento disponíveis e dentro de um período razoável de tempo.
    - **Fácil** (1 ponto) – é praticamente certo que o impacto ambiental real ou que o impacto ambiental potencial, neste último caso quando o mesmo vier a se manifestar, seja detectado rapidamente através dos meios de monitoramento disponíveis.

A matriz montada foi preenchida considerando-se condições normais de operação, com produtos e/ou serviços realizados no presente. Também não foram levados em consideração os impactos considerados como benéficos.

Outro campo existente é o referente à “Magnitude”, que é um dos atributos principais de um impacto ambiental. É a grandeza de um impacto em termos absolutos, podendo ser definida como as medidas de alteração nos valores de um fator ou parâmetro ambiental, ao longo do tempo, em termos quantitativos ou qualitativos.

Apresentam-se algumas definições para Magnitude encontradas na literatura: “grau ou extensão da escala de um impacto” (Fisher & Davies, 1973) e “provável grandeza de cada impacto potencial” (Environmental Protection Service, 1978).

Na matriz montada, o campo Magnitude é composto pelos parâmetros abaixo:

- ♻️ Resultado (Re) – é determinado pela multiplicação dos fatores (Probabilidade X Severidade X Abrangência X Detecção). (PEREIRA; BENVENUTO; LINDNER, 2006, p. 192-193)

O grau de magnitude é classificado conforme a Tabela 5-1 e a atribuição de pontos da avaliação na Tabela 5-2.

**Tabela 5-1 – Classificação do grau de magnitude para a matriz de impacto tecnológico**

Pontuação Obtida	Grau de Magnitude
$Re < 06$	Desprezível
$06 \leq Re < 18$	Significante
$Re \geq 18$	Importante

Fonte: Pereira, Benvenuto e Lindner, 2006.

**Tabela 5-2 – Classificação da Avaliação para a matriz de impacto tecnológico**

Avaliação	Pontos		
	1	2	3
<b>Abrangência</b>	Local	Regional	Global
<b>Probabilidade</b>	Baixa	Média	Alta
<b>Severidade</b>	Sem dano	Leve	Severo
<b>Detecção</b>	Fácil	Moderado	Difícil

Fonte: Pereira, Benvenuto e Lindner, 2006.

Considerando a experiência profissional acumulada pelos autores foi possível adaptar a matriz de impacto desenvolvida em “Relatório Ambiental Preliminar – Parque de Valorização de Resíduos – Prefeitura Municipal de São Sebastião, São Paulo” (PEREIRA; BENVENUTO; LINDNER, 2006) para uma realidade de análise de rota tecnológica que abarque desde os componentes ambientais, econômicos até os operacionais, definindo e quantificando tanto o grau de impacto quanto o desmembramento atrelado a cada componente estudado (veja Tabela 5-3 a Tabela 5-7).

Tabela 5-3 - Formação da matriz de impactos tecnológicos – Fermentação úmida

MATRIZ DE IMPACTOS TECNOLÓGICOS - FERMENTAÇÃO ÚMIDA						
Componentes Ambientais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Emissões líquidas	2	3	3	1	18	
Emissões gases	2	2	3	1	12	
Emissões de odores	1	3	3	1	9	
Emissões de particulados	1	2	2	1	4	
Emissões de ruídos	1	2	2	1	4	
Proliferação de vetores	1	2	2	2	8	
Componentes Econômicos	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Custos de investimento	1	3	3	1	9	
Custos de Operação	1	3	3	1	9	
Não geração de receita com comercialização de biogás	1	1	2	1	2	
Não geração de receita com comercialização de composto	1	3	2	1	6	
Custos de destinação de líquidos	1	3	2	1	6	
Consumo de energia	1	3	2	1	6	
Componentes Operacionais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Complexidade do tratamento mecânico	1	3	3	1	9	
Potencialidade do não processamento das frações orgânicas	1	3	3	1	9	
Não comercialização de biogás	1	1	2	1	2	
Não comercialização de composto	1	3	2	1	6	
Nível de capacitação da equipe	1	3	3	1	9	
Frequência de manutenção corretiva	1	3	3	1	9	
Geração de rejeitos	1	3	3	1	9	
Área necessária	1	1	2	1	2	
Não implementação internacionais nos últimos 5 anos	1	3	2	1	6	
Indisponibilidade de fornecedores	1	1	2	1	2	

Fonte: Adaptada pelo autor, 2013 na base de Pereira, Benvenuto e Lindner, 2006.

Tabela 5-4 – Formação da matriz de impactos tecnológicos – Fermentação seca contínua

MATRIZ DE IMPACTOS TECNOLÓGICOS - FERMENTAÇÃO SECA CONTÍNUA						
Componentes Ambientais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Emissões líquidas	2	3	3	1	18	
Emissões gases	2	2	3	1	12	
Emissões de odores	1	3	3	1	9	
Emissões de particulados	1	2	2	1	4	
Emissões de ruídos	1	2	2	1	4	
Proliferação de vetores	1	2	2	2	8	
Componentes Econômicos	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Custos de investimento	1	3	3	1	9	
Custos de Operação	1	2	3	1	6	
Não geração de receita com comercialização de biogás	1	1	2	1	2	
Não geração de receita com comercialização de composto	1	3	2	1	6	
Custos de destinação de líquidos	1	2	2	1	4	
Consumo de energia	1	2	2	1	4	
Componentes Operacionais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Complexidade do tratamento mecânico	1	3	3	1	9	
Potencialidade do não processamento das frações orgânicas	1	2	3	1	6	
Não comercialização de biogás	1	1	2	1	2	
Não comercialização de composto	1	1	2	1	2	
Nível de capacitação da equipe	1	3	3	1	9	
Frequência de manutenção corretiva	1	2	3	1	6	
Geração de rejeitos	1	2	3	1	6	
Área necessária	1	1	2	1	2	
Não implementação internacionais nos últimos 5 anos	1	2	2	1	4	
Indisponibilidade de fornecedores	1	2	2	1	4	

Fonte: Adaptada pelo autor, 2013 na base de Pereira, Benvenuto e Lindner, 2006.



Tabela 5-5 – Formação da matriz de impactos tecnológicos – Fermentação seca descontínua

MATRIZ DE IMPACTOS TECNOLÓGICOS - FERMENTAÇÃO SECA DESCONTÍNUA						
Componentes Ambientais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Emissões líquidas	2	1	3	1	6	
Emissões gases	2	2	3	1	12	
Emissões de odores	1	2	3	1	6	
Emissões de particulados	1	2	2	1	4	
Emissões de ruídos	1	2	2	1	4	
Proliferação de vetores	1	2	2	2	8	
Componentes Econômicos	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Custos de investimento	1	2	3	1	6	
Custos de Operação	1	2	3	1	6	
Não geração de receita com comercialização de biogás	1	2	2	1	4	
Não geração de receita com comercialização de composto	1	3	2	1	6	
Custos de destinação de líquidos	1	1	2	1	2	
Consumo de energia	1	2	2	1	4	
Componentes Operacionais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Complexidade do tratamento mecânico	1	2	3	1	6	
Potencialidade do não processamento das frações orgânicas	1	1	3	1	3	
Não comercialização de biogás	1	1	2	1	2	
Não comercialização de composto	1	3	2	1	6	
Nível de capacitação da equipe	1	2	3	1	6	
Frequência de manutenção corretiva	1	2	3	1	6	
Geração de rejeitos	1	1	3	1	3	
Área necessária	1	2	2	1	4	
Não implementação internacionais nos últimos 5 anos	1	1	2	1	2	
Indisponibilidade de fornecedores	1	2	2	1	4	

Fonte: Adaptada pelo autor, 2013 na base de Pereira, Benvenuto e Lindner, 2006.



Tabela 5-6 - Formação da matriz de impactos tecnológicos – Compostagem

MATRIZ DE IMPACTOS TECNOLÓGICOS - COMPOSTAGEM						
Componentes Ambientais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Emissões líquidas	2	2	3	1	12	
Emissões gases	2	2	3	1	12	
Emissões de odores	1	3	3	1	9	
Emissões de particulados	1	3	3	1	9	
Emissões de ruídos	1	2	2	1	4	
Proliferação de vetores	1	3	2	2	12	
Componentes Econômicos	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Custos de investimento	1	1	3	1	3	
Custos de Operação	1	1	3	1	3	
Não geração de receita com comercialização de biogás	1	3	2	1	6	
Não geração de receita com comercialização de composto	1	1	2	1	2	
Custos de destinação de líquidos	1	1	2	1	2	
Consumo de energia	1	1	2	1	2	
Componentes Operacionais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Complexidade do tratamento mecânico	1	1	3	1	3	
Potencialidade do não processamento das frações orgânicas	1	1	3	1	3	
Não comercialização de biogás	1	3	2	1	6	
Não comercialização de composto	1	1	2	1	2	
Nível de capacitação da equipe	1	1	3	1	3	
Frequência de manutenção corretiva	1	1	3	1	3	
Geração de rejeitos	1	1	3	1	3	
Área necessária	1	3	2	1	6	
Não implementação internacionais nos últimos 5 anos	1	1	2	1	2	
Indisponibilidade de fornecedores	1	1	2	1	2	

Fonte: Adaptada pelo autor 2013, na base de Pereira, Benvenuto e Lindner, 2006.

Tabela 5-7 - Formação da matriz de impactos tecnológicos – Reciclagem

MATRIZ DE IMPACTOS TECNOLÓGICOS - RECICLAGEM						
Componentes Ambientais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Emissões líquidas	1	1	2	1	2	
Emissões gases	1	1	2	1	2	
Emissões de odores	1	3	3	1	9	
Emissões de particulados	1	1	2	1	2	
Emissões de ruídos	1	2	2	1	4	
Proliferação de vetores	1	3	3	2	18	
Componentes Econômicos	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Custos de investimento	1	1	2	1	2	
Custos de Operação	1	1	2	1	2	
Não geração de receita com comercialização de recicláveis	1	1	1	1	1	
Custos de destinação de líquidos	1	1	1	1	1	
Consumo de energia	1	1	2	1	2	
Componentes Operacionais	Avaliação				Magnitude	
	Abrangência	Probabilidade	Severidade	Detecção	Re	Grandeza do Impacto
Complexidade do tratamento mecânico	1	1	2	1	2	
Potencialidade do não processamento das frações orgânicas	1	3	3	1	9	
Não comercialização de recicláveis	1	1	1	1	1	
Não comercialização de composto	1	3	3	1	9	
Nível de capacitação da equipe	1	1	2	1	2	
Frequência de manutenção corretiva	1	1	2	1	2	
Geração de rejeitos	1	3	3	1	9	
Área necessária	1	2	2	1	4	
Não implementação internacionais nos últimos 5 anos	1	1	1	1	1	
Indisponibilidade de fornecedores	1	1	1	1	1	

Fonte: Adaptada pelo autor 2013, na base de Pereira, Benvenuto e Lindner, 2006.

## 5.1 AVALIAÇÃO DE ROTA TECNOLÓGICA PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES

Compilando os resultados obtidos a partir das matrizes elaboradas temos que a fermentação seca descontínua e a compostagem apesar de promoverem um impacto significativo, ainda são as tecnologias de menor grandeza de impacto quando comparadas as demais tecnologias, mesmo assim ainda demandam medidas mitigadoras quando da sua aplicação, na forma de controle de odores e vetores, controle das emissões líquidas e gasosas, entre outras formas de controle que promovam a segurança na área afetada pela operação da planta.

**Tabela 5-8 – Formatação da matriz de impactos tecnológicos compilação de resultados**

MATRIZ DE IMPACTOS TECNOLÓGICOS					
Tecnologias	Avaliação			Magnitude	
	ambiental	operacional	econômica	Re	Grandeza do Impacto
Fermentação úmida	55	63	38	156	
Fermentação seca contínua	55	50	31	136	
Fermentação seca descontínua	40	42	28	110	
Reciclagem	18	40	8	66	
Compostagem	58	33	18	109	

Re: Resultado da adição dos fatores (Ambiental+Operacional+Economico)

Desprezível (Re<100):	
Significante (100=<Re<150):	
Importante (Re>=150):	

**Fonte: Matriz desenvolvida pela autora com os dados das matrizes anteriores (2013).**

Os resultados obtidos a partir da matriz tecnológica corroboram com as informações apresentadas no âmbito deste relatório onde recomenda-se um sistema de reciclagem de materiais e recuperação energética na forma de biodigestão seca em túneis atrelado a um sistema aeróbio para estabilização da fração orgânica reduzindo significativamente a massa podendo inclusive vir a gerar composto e/ou condicionadores de solos.

Comparado aos sistemas de biodigestão convencionais na forma contínua ou úmida, os processos por batelada mostram as seguintes vantagens, as quais são especialmente significativas para uma planta no Brasil:

- 🌱 Não há necessidade de uma preparação onerosa das frações para a biodigestão.
- 🌱 Não há necessidade de uma mistura mecânica durante a fermentação.
- 🌱 No fermentador não se encontram componentes mecânicos.
- 🌱 Não há risco de redução no desempenho da fermentação quando da desconstituição dos microorganismos biológicos devido há existência de microorganismos biocinéticos que garantem a base do processamento.
- 🌱 Não há necessidade de um processo oneroso de prensagem ao término da biodigestão seca descontínua (por batelada), onde se descartam grandes quantidade de líquidos com alta carga orgânica, estes podendo



representar até 30 % quando da aplicação de fermentação seca contínua ou fermentação úmida.

Esta tendência de emprego das tecnologias de fermentação seca foi reforçada em artigo técnico publicado em revista especializada do setor Müll und Abfall de janeiro de 2014:

*In Germany 63 plants are in operation, 46 with dry and 17 with wet Technologies. The 46 dry plants are divided into 23 continuously and 23 discontinuously (batchwise) procedures. The dominance of the dry processes is reflected necessarily in one and two-step procedures because two-step processes are limited to wet processes... The highest net electricity yield is generated by dry continuous processes. Despite the lower own energy requirement dry discontinuous method does not achieve these benefits. The thermophilic process results in all methods to significantly higher methane yields<sup>2</sup>. (FRICKE; HEUSSNER; HUTTNER; TURK; PEREIRA; BAUER; BIDLINGMAIER, 2014, p. 21)*

Assim entendemos que a rota tecnológica escolhida como tratamento mecânico e biológico onde as intervenções biológicas se darão em uma primeira fase de forma mais simples como reciclagem e compostagem e em uma segunda fase na forma fermentação seca descontínua, potencializam o resgate e a transformação das frações valorizáveis presentes nos resíduos, gerando subprodutos que podem ser introduzidos na cadeia econômica na forma de energia, composto, recicláveis e biomassa, possuem vantagens evidentes frente às outras formas de tecnologia.

---

<sup>2</sup> Tradução livre da autora: "Na Alemanha, 63 plantas estão em operação, sendo 46 com tecnologia seca e 17 úmida. As 46 plantas com tecnologia seca estão divididas em 23 de sistema contínuo e 23 descontínuo (batelada). O domínio dos processos secos remetem a procedimentos com uma ou duas fases, pois os procedimentos úmidos estão relacionados aos processos úmidos. O maior rendimento líquido de eletricidade é gerado pelos processos secos contínuos, apesar dos processos secos descontínuos resultarem em um menor consumo de energia. Em todos os sistemas, os processos termofílicos geram uma maior quantidade de metano."



## 6 Conclusão

A Política Nacional de Resíduos Sólidos desloca o tema resíduo sólido para outro patamar, extrapolando discussões voltadas exclusivamente para formas de disposição final em aterros, funcionando como um catalisador inicial para a cadeia de resíduos no momento em que incorpora novas práticas de valorização de resíduos. Ao estabelecer metas e prazos, bem como a execução de penalidades em caso de não cumprimento, obrigou o setor a sair de sua zona de conforto, que tinha como marco a presença do aterrista, adotando uma postura mais profissionalizada para fins de diversificação de seu portfólio de serviços prestados.

No momento, a demanda segue concentrada na busca por infraestrutura, tecnologias e sistemas eficazes de gestão, incluindo tanto os aspectos técnico-operacionais, quanto a consolidação de tecnologias adequadas para a implementação e monitoramento das futuras centrais de tratamento. Entretanto, a carência de especialização no mercado, tanto para o desenvolvimento de conceito tecnológico quanto para a gestão de tecnologias, resulta não apenas um entrave técnico na busca por melhores soluções, mas também uma insegurança para a tomada de decisão por parte dos agentes envolvidos seja oriundo do setor privado seja do setor público.

Atualmente no Brasil há pouca presença tecnológica para a promoção da valorização dos resíduos e as práticas existentes são aplicadas em baixa escala, desta forma estamos ainda suscetíveis à importação de tecnologias, porém, deve-se atentar ao fato de que estas tecnologias não podem ser transferidas integralmente, precisando ser adaptadas e absorvidas, com base em nossas características gravimétricas e climáticas, e ainda em nossa capacidade econômica. Portanto, sua simples aquisição e aplicação aos resíduos nacionais – movimento que já vem sendo observado –, apresenta riscos relevantes, na medida em que pode ocasionar projetos pouco eficientes, inadequados às exigências ambientais ou ainda com viabilidade econômica comprometida, podendo inclusive gerar a descontinuidade do projeto implementado.

Estamos vivenciando um momento divisor de águas, reconhecimento do mercado, político e da sociedade, tecnologias estrangeiras amadurecidas, demanda nacional por tecnologias de valorização, políticas de proteção e preservação ambiental, inclusão social, todos fatores positivos para o amparo da introdução da gestão sustentável de resíduos sólidos.

Temáticas como a inclusão de catadores, promoção da coleta seletiva e de sistemas de reaproveitamento, a valorização da educação e da comunicação ambiental tornaram-se necessárias na elaboração de planejamentos e políticas públicas das cidades. Nesse sentido, a demonstração da viabilidade da aplicação de soluções voltadas para a proteção dos recursos naturais contribui não somente para a adequação e modernização do sistema de saneamento local, mas, sobretudo, auxilia tecnicamente na busca por um modelo sustentável de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.



O tomador de decisão deverá avaliar a operacionalidade do sistema, montante de investimento e operação bem como critérios ambientais como odor, vetores, emissões líquidas, entre outros.

O entrelaçamento das demandas de mercado por energia em decorrência da grave crise energética que estamos vivenciando originada da queda bruta do valor do petróleo no mercado internacional combinada aos baixíssimos níveis de reservatório nos estados do Sudeste, sem maiores expectativas de recomposição a curto prazo, faz com que o foco seja direcionado para a busca por fontes alternativas de energia.

Independentemente dos aspectos especulativos do preço do petróleo, as mudanças climáticas transformaram em vilã esta fonte de energia entrando em ênfase a busca por soluções inteligentes que afastem o desperdício, empregando melhor os recursos secundários de forma a preservar os recursos naturais e oferecer alternativas para substituição das fontes tradicionais de energia.

Nossa proposta é oferecer uma rota tecnológica maleável que se adeque a qualquer substrato e as demandas de mercado por subprodutos, podendo ser implantada rapidamente, indo de encontro às premissas legais e ao senso comum de que o aterro não é tratamento e as frações dispostas in natura se decompõe de forma descontrolada resultando na contaminação dos solos e das águas, emissões de gases de efeito estufa, recalques e fundamentalmente desperdiçando recursos.

No caso em pauta, poderemos contribuir para melhorar nosso planeta através da utilização de tecnologias biológicas que garantam uma gestão adequada das frações mistas e orgânicas, potencializando o aproveitamento dos recicláveis, podendo ainda transformar as frações orgânicas em composto, ou mesmo em biogás e encaminhando para os aterros os rejeitos estabilizados através da decomposição aeróbia.

A abordagem estratégica da legislação brasileira e o uso sustentável dos recursos naturais deve levar a uma melhor eficiência dos recursos e a diminuição dos impactos ambientais gerados pela utilização dos recursos naturais. Para prover eficiência a utilização dos recursos podem ser empregadas a reciclagem dos materiais e a recuperação energética. Através da rota tecnológica desenvolvida para a cidade de Ubatuba que combinará métodos de reciclagem de materiais e energéticos, serão alcançados altos índices de preservação dos recursos naturais e eficiência de recursos em decorrência de sua imediata utilização e geração de receitas extraordinárias.



## Referências bibliográficas

Bauer, M., G. Wachtmeister (2009): Entstehung von Formaldehyd in Mager-Gasmotoren, MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 7/2009, Volume 70, Issue 7-8, pp 580-587.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010a. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 23 dez. 2010. p. 1. Seção 1. Edição extra. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm)>. Acesso em: 05 fev. 2014.

BRASIL. Lei nº 11.107, de 06 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 07 abr. 2005, p. 1. Seção 1. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/l11107.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11107.htm)>. Acesso em: 05 fev. 2014.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 08 jan. 2007, p. 3, Seção 1. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)>. Acesso em: 05 fev. 2014.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010b. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010, p. 3, Seção 1. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 05 fev. 2014.

BRASIL, Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT): Segunda comunicação nacional inicial do Brasil à Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre mudanças do clima; Brasília, 2010.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Departamento de Desenvolvimento Energético, Coordenação-Geral de Fontes Alternativas: "PROGRAMA DE INCENTIVO ÀS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA – PROINFA", Apresentação em PowerPoint, Janeiro/2009.

BREF (2005): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung, Europäische Kommission, Brüssel (B).

BRIESE, D., J. GATENA. Die Zukunft der MBA in Deutschland, 2015. Disponível em: <<http://www.ingenieur.de/UmweltMagazin/2015/Ausgabe-07-08/Abfall-Recycling/Die-Zukunft-der-MBA-in-Deutschland>>. Acesso em: 23.10.2015.

CASTILHOS JR., A. B.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA, I. N.; LUPATINI, G.; SILVA, J. D. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JR., A. B. (Org.). Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. 4. ed. Rio de Janeiro: Rima ABES, 2006.



CASTRO FILHO, B. M.; CAMPOS, E.J.D.; MASCARENHAS JR., A.S.; IKEDA, Y.; LORENZETTI, J.A.; GARCIA, C.A.E.; MOLLER JR., O.O. Diagnóstico ambiental oceânico e costeiro das regiões Sul e Sudeste do Brasil. São Paulo: FUNDESPA, v.3, p. 04-214, 1994.

DE BAERE, L., MATTHEEUWS, B. Anaerobic digestion in Europe: State of the art. In: 7th International Conference on Organic Resource in the Carbon Economy ORBIT 2010; June 29 July 3; Heraklion, Crete, 2010.

FRICKE, K.; DICHTL, N.; SANTEN, H.; MÜNNICH, K.; BAHR, T.; HILLEBRECHT, K.; SCHULZ, O. Aplicação do tratamento mecânico-biológico de resíduos no Brasil. Guia para uma gestão integrada de resíduos sólidos com a aplicação da técnica de TMB compreendendo disposição em aterros, tratamento de chorume e recuperação de aterros desativados. Finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Göttingen, Germany: Hubertus & Co, 2007.

FRICKE, K.; KOLSCH, F.; PFAFF-SIMONEID, W. Verbessertes Klimaschutz bei der Abfallentsorgung in Schwellen- und Entwicklungsländern durch Anpassung des Emissionshandels. Müll und Abfall, Berlin, 3, 2009, p. 104-105. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MUA.03.2009.104>>. Acesso em: 05 fev. 2014.

FRICKE, K. Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe. Bundesministerium, für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Braunschweig, Germany: Technische Universität Braunschweig, 2013. Endbericht zu Förderprojekt 03 KB 022 (BMU).

FRICKE, K.; PEREIRA, C. Apresentação técnica para módulo gestão de resíduos aplicado no curso de mestrado Engenharia Urbana e Ambiental na PUC-Rio. Universidade Técnica de Braunschweig, 2013.

FRICKE, K.; PEREIRA, C.; LEITE, A.; BAGNATI, M. (Coords.). Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.

FRICKE, K.; HEUSSNER, C.; HUTTNER, A.; TURK, T.; BIBLINGMAIER, W. Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biosanlagen. [S.l.]: Energetische Biomassenutzung, 2013. (Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms, band 11).

FRICKE, K.; HEUSSNER, C.; HUTTNER, A.; TURK, T.; PEREIRA, C.; BAUER, W.; BIDLINGMAIER, W. Vergärung von bio-und grünabfällen. Teil 1: Ausbaupotenzial bei der Vergärung von bio-und grünabfällen. Müll und Abfall, Berlin, 12, 2013, p. 628-635. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MA.12.2013.636>>. Acesso em: 05 fev. 2014.

FRICKE, K.; HEUSSNER, C.; HUTTNER, A.; TURK, T.; PEREIRA, C.; BAUER, W.; BIDLINGMAIER, W. Vergärung von bio-und grünabfällen. Teil 2: Status quo der Bio- und Grünabfallvergärung. Müll und Abfall, Berlin, 1, 2014, p. 21-27. Disponível em: <<http://www.MUELLundABFALL.de/MA.01.2014.021>>. Acesso em: 05 fev. 2014.

Heberlein, J., A. Murphy (2008): Thermal Plasma Waste Treatment. Topical review. Journal of Physics: Applied Physics. 053001. Jg., 2008, Nr. 41.

Helsen, L., A. Bosmans (2010): Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process 1st Int. Symposium on Enhanced Landfill Mining, Houthalen-Helchteren.

PEREIRA, C.; BENVENUTO, C.; LINDNER, R. (Coords.). Relatório Ambiental Preliminar: Parque de Valorização de Resíduos, Prefeitura Municipal de São Sebastião, São Paulo. 2006. Volume I. Memorial Descritivo.



PEREIRA, Christiane Dias. Rota tecnológica para a gestão sustentável de resíduos sólidos domiciliares. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Curso de Pós-Graduação em Direito Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Quicker, P., F. Neuerburg, Y. Noël, A. Huras (2014): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (GER), Sachverständigengutachten für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin, GER.

SCHMIDT, T. Planos de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: avaliação da arte no Brasil, comparação com a situação na Alemanha e proposições para uma metodologia apropriada. Recife: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

SCHMIDT, T. Organic Waste to Energy: Estudo sobre o Aproveitamento Energético da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Tecnologias, Estado da Arte e Perspectivas. Bonn; Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2011. Programa Energia e Meio Ambiente.

Serfass, K., (2014): Emissionsdaten von HTC – Anlagen: Vortrag beim Arbeitsgruppentreffen zur Richtlinie VDI 3933, Berlin, 13. Februar 2014.

Thomé –Kozmiensky, K. (Hrsg.) (1985): Pyrolyse von Abfällen, EF-Verlag, Berlin.

Thomé –Kozmiensky, K. (Hrsg.) (1994): Thermische Abfallbehandlung EF-Verlag, Berlin.

Vaccani, A.C. (2014): Internationale Märkte für alternative Verfahren und Strategien der wichtigsten Marktteilnehmer, Vortrag Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, 28. Januar 2014.

Warnecke, R., M. Erz (1991): Pyrolyseatlas – Überblick über Verfahren zur pyrolytischen Abfallbehandlung, Universität Duisburg, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Thermodynamik, Duisburg.

ZEHNDER, A. J. B., SVENSSON, B. H. Life without oxygen: what can and what cannot? *Experientia*, v. 42, n. 11-12, p. 1197-1205, dez. 1986. DOI: 10.1007/BF01946391.