

# **Projeto Conceitual de um Modelo de Reator Anaeróbico para a Biometanização da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais**

Belo Horizonte,  
Abril de 2009

<b>Equipe Técnica responsável pela elaboração do projeto</b>	
Luis Felipe Dornfeld Braga Colturato	Coordenador
Engenheiro Ambiental	CREA/MG 114629D
Equipe Técnica	
Thiago Dornfeld Braga Colturato	Técnico
Engenheiro Ambiental	CREA/MG 109525LP
Bernardo Oliveira Carbonari Santana	Técnico
Engenheiro Ambiental	CREA/MG 92042D

## Sumário

<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>2 – CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>3 – PARÂMETROS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE METANIZAÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>4 – TECNOLOGIAS COMERCIAIS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA SECA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....</b>	<b>19</b>
4.1 - Sistema Linde-BRV: .....	19
4.2 - Sistema Kompogas:.....	20
4.3 - Sistema Dranco: .....	21
4.4 - Sistema Valorga: .....	22
<b>5 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TECNOLOGIAS DE METANIZAÇÃO SECA...23</b>	
<b>6 – DEFINIÇÃO DA ESCALA .....</b>	<b>26</b>
<b>7 - LINHA DE PRÉ-TRATAMENTO.....</b>	<b>30</b>
7.1 – Descrição da linha de pré-tratamento “Resíduo $\emptyset$ ” .....	34
7.1.1 - <i>Recebimento do material</i> .....	34
7.2 – Tremonha de Alimentação.....	35
7.3 - Cabine de Triagem de Grandes Volumes.....	35
7.4 - Tromel.....	35
7.5 - Cabine de Triagem de Recicláveis.....	36
7.6 - Prensa de Recicláveis .....	37
7.7 - Separador Férrico .....	37
7.8 - Triturador da FORM .....	37
7.9 - Correias transportadoras .....	38
7.9.1 - <i>Correia de alimentação</i> .....	38
7.9.2 - <i>Correia cabine de triagem de grandes volumes - entrada tromel</i> .....	39
7.9.3 – <i>Conjunto correias passante tromel – cabine triagem de recicláveis</i> .....	39
7.9.4 – <i>Conjunto correias caída do tromel - cabine triagem de recicláveis</i> .....	39
7.9.5 – <i>Correia do separador férrico</i> .....	40
7.9.6 – <i>Correia reversível triturador - pátio de armazenamento de FORM</i> .....	40
7.10 – Pátio de armazenamento temporário do material > 50mm. ....	41
7.11 – Pátio de armazenamento temporário do material < 50mm. ....	41

<b>8 – UNIDADE DE METANIZAÇÃO.....</b>	<b>43</b>
8.1 – Digestor Principal .....	43
8.1.1 – Sistema de Alimentação .....	43
8.1.2 – Digestor principal .....	44
8.1.3 – Sistema de Extração .....	47
8.2 – Digestor Secundário da unidade piloto.....	48
<b>9 – GASÔMETRO .....</b>	<b>50</b>
<b>10 - PLANTA BAIXA .....</b>	<b>52</b>
<b>11 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO .....</b>	<b>53</b>
<b>12 – TESTES OPERACIONAIS DA UNIDADE PILOTO .....</b>	<b>55</b>
12.1 - Testes Laboratoriais .....	55
12.1.1 – Determinação do teor de Sólidos Totais (ST) .....	55
12.1.2 – Determinação do teor de Sólidos Voláteis(SV) e Sólidos Fixos(SF) .....	56
12.1.3 – Determinação das alcalinidades .....	56
12.2 – Posta em marcha dos digestores .....	58
12.2.1 - Testes preliminares .....	58
12.2.2. – Posta em marcha do digestor principal .....	58
12.2.3 - Posta em marcha do digestor secundário .....	60
12.3 – Testes operacionais dos digestores .....	61
12.3.1 - Operação do digestor principal em temperatura mesofílica.....	61
12.3.2 - Operação do digestor principal em temperatura termofílicos .....	62
12.3.3 - Testes de eliminação de inertes do digestor principal.....	62
12.3.4 – Operação do digestor secundário .....	63
<b>13 – BALANÇO DE MASSA .....</b>	<b>64</b>
<b>14 – BALANÇO DE ENERGIA.....</b>	<b>66</b>
<b>15 – CUSTOS DO PROJETO BÁSICO, IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DA UNIDADE PILOTO .....</b>	<b>72</b>
<b>16 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>17 – CRONOGRAMA.....</b>	<b>79</b>
<b>18 – BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>80</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA EUROPÉIA DE METANIZAÇÃO DA FORM (FONTE: DE BAERE L. E MATTHEEUWS B., 2008) .....	10
FIGURA 2 – CAPACIDADE INSTALADA DE METANIZAÇÃO DA FORM EM PAÍSES EUROPEUS (FONTE: DE BAERE, 2008).....	11
FIGURA 3 – CAPACIDADE INSTALADA VIA SECA X CAPACIDADE INSTALADA VIA ÚMIDA.....	13
FIGURA 4 – CAPACIDADE INSTALADA FAIXA MESOFÍLICA X CAPACIDADE INSTALADA FAIXA TERMOFÍLICA (FONTE: DE BAERE L. E MATTHEEUWS B., 2008) .....	14
FIGURA 5 – MODELO ESQUEMÁTICO DO REATOR LINDE-BRV .....	19
FIGURA 6 – MODELO ESQUEMÁTICO DO REATOR KOMPOGAS.....	20
FIGURA 7 – MODELO ESQUEMÁTICO DO REATOR DRANCO.....	21
FIGURA 8 – MODELO ESQUEMÁTICO DO REATOR VALORGA .....	22
FIGURA 9 - DIAGRAMA DA LINHA DE PRÉ-TRATAMENTO DA UNIDADE INDUSTRIAL.	33
FIGURA 10 - DIAGRAMA DA LINHA DE METANIZAÇÃO DA UNIDADE PILOTO .....	54
FIGURA 11 - BALANÇO DE MASSA DO SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO .....	64
FIGURA 12 - BALANÇO DE MASSA DO SISTEMA DE METANIZAÇÃO .....	64
FIGURA 13 - APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS.....	67
FIGURA 14 – CONSUMO ENERGÉTICO DA UNIDADE PILOTO, CONSIDERANDO OS DIGESTORES OPERANDO EM FAIXA MESOFÍLICA E ISOLADOS TERMICAMENTE – (ENERGIA ELÉTRICA EM KWH/ANO E EM CALOR EM KCAL.10 <sup>3</sup> /ANO) .....	70
FIGURA 15 – CONSUMO ENERGÉTICO DA UNIDADE PILOTO, CONSIDERANDO OS DIGESTORES OPERANDO EM FAIXA TERMOFÍLICA E ISOLADOS TERMICAMENTE – (ENERGIA ELÉTRICA EM KWH/ANO E EM CALOR EM KCAL.10 <sup>3</sup> /ANO) .....	71

## Lista de Tabelas

TABELA 1 – RESÍDUOS INDUSTRIAIS COM POTENCIAL PARA CO-DIGESTÃO.....	8
TABELA 2 – <i>SCALE-UP</i> VALORGA.....	26
TABELA 3 – <i>SCALE-UP</i> DRANCO.....	26
TABELA 4 – <i>SCALE-UP</i> KOMPOGAS .....	27
TABELA 5 – <i>SCALE-UP</i> LINDE-BRV .....	27
TABELA 6 – <i>SCALE-UP</i> DAS TECNOLOGIAS .....	28
TABELA 7 –DISTRIBUIÇÃO DAS SEDES MUNICIPAIS, SEGUNDO TAMANHO DA POPULAÇÃO URBANA DE MINAS GERAIS, REFERENTE AO ANO DE 2000 (FONTE: FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2003).....	29
TABELA 8 – PARÂMETROS DE PROJETO PARA DIMENSIONAMENTO DO REATOR .....	44
TABELA 9 – QUADRO MÍNIMO DE FUNCIONÁRIOS DA UNIDADE PILOTO .....	53
TABELA 10 – TAXA DE ALIMENTAÇÃO NO PROCESSO DE POSTA EM MARCHA.....	59
TABELA 11 – PERIODICIDADE DE ANÁLISES .....	60
TABELA 12 – PERIODICIDADE DE ANÁLISES .....	63
TABELA 13 – PARÂMETROS PARA CÁLCULO DE BALANÇOS DE MASSA.....	64
TABELA 14 – CONSUMO ENERGÉTICO DA UNIDADE PILOTO DE METANIZAÇÃO .....	66
TABELA 15 – CONSUMO ENERGÉTICO DA PLANTA INDUSTRIAL DE PRÉ-TRATAMENTO .....	67
TABELA 16 – CUSTO DE PESSOAL PARA A ELABORAÇÃO DO PROJETO BÁSICO DA UNIDADE PILOTO .....	72
TABELA 17 – CUSTOS OPERACIONAIS DA OPERAÇÃO DA UNIDADE PILOTO .....	72
TABELA 18 – CUSTO ANUAL DO CONSUMO ENERGÉTICO DA UNIDADE PILOTO.....	73
TABELA 19 – CUSTO ANUAL DO CONSUMO ENERGÉTICO DA UNIDADE INDUSTRIAL DE PRÉ-TRATAMENTO.....	74
TABELA 20 – CUSTO DE CONSTRUÇÃO DA UNIDADE PILOTO DE METANIZAÇÃO .....	75
TABELA 21 – CUSTO DE CONSTRUÇÃO DA PLANTA DE PRÉ-TRATAMENTO DA UNIDADE INDUSTRIAL.....	76

## Lista de Equações

EQUAÇÃO 1 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS.....	55
EQUAÇÃO 2 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS FIXOS .....	56
EQUAÇÃO 3 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS.....	56
EQUAÇÃO 4 – DETERMINAÇÃO DA ALCALINIDADE.....	57
EQUAÇÃO 5 – DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO AI/AP .....	57
EQUAÇÃO 6 – DETERMINAÇÃO DO CALOR REQUERIDO (WANG, 2007).....	68
EQUAÇÃO 7 – DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CALOR (WANG, 2007) .....	68

## 1 - INTRODUÇÃO

Este projeto apresenta um novo conceito para uma unidade de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Divide-se em uma linha para remoção dos impróprios e recicláveis presentes no RSU (sistema de pré-tratamento) e uma unidade de metanização da matéria orgânica triada.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2000) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a geração *per-capita* de RSU para municípios com população entre 10.000 e 19.999 habitantes é de 0,58 kg/hab.d.

De acordo com dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2007, publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração *média per capita* de RSU dos municípios amostrados da região sudeste com população inferior a 20.000 habitantes é de 0,60 kg/hab.d.

O Perfil Demográfico do Estado de Minas Gerais de 2000 (FGV, 2003) aponta que 87,5% dos municípios mineiros possuem uma população inferior a 20 mil habitantes.

Considerando uma geração per capita de RSU na ordem de 0,6 kg/hab.d, a unidade de pré-tratamento foi concebida para processar 20t/d ou aproximadamente 33.300 habitantes equivalentes.

Considerando um percentual de matéria orgânica no RSU de 60% e uma recuperação de 80% deste material na linha de pré-tratamento, a contribuição *per capita* média de matéria orgânica passível de tratamento é da ordem de 0,29 kg/hab.d.

O sistema de metanização da planta piloto terá uma capacidade de tratamento de 389,33 t/ano de FORM com uma população equivalente 3.704 habitantes.

A linha de pré-tratamento, denominada "Resíduo Ø", foi concebida para recuperar entre 70 a 80% do material entrante. Este modelo maximiza a utilização de mão-de-obra no processo de triagem e possui um sistema que propicia a recirculação do material não triado. A utilização de mão de obra visa a inserção social, minimização na utilização de maquinário e uma maximização do material triado. O sistema de *bypass* dos resíduos visa otimizar a quantidade de material triado, proporcionando uma recirculação de material não previamente triado.

Para o tratamento da matéria orgânica foi concebido um modelo de digestor anaeróbio com tecnologia de metanização seca e configuração retangular do reator. Possuirá um sistema para remoção de inertes sedimentáveis em diferentes pontos do digestor. O sistema de agitação será realizado via injeção de biogás comprimido, sem elementos mecânicos internos no reator. Os sistemas de alimentação e extração



foram concebidos de forma a minimizar os custos de implantação e manutenção, consistindo-se em sistemas robustos com elevada simplicidade operacional.

Para otimizar a produção de biogás bem como reduzir a carga orgânica do efluente líquido gerado, foi concebido um reator secundário onde ocorrerá a pós-digestão do lixiviado proveniente do processo de desidratação do lodo digerido. Espera-se um incremento da ordem de 10% na produção de biogás.

Este incremento pode ser ampliado realizando-se processos de co-digestão da FORM com resíduos orgânicos industriais ou agrosilvipastoris. Este processo consiste na introdução controlada de resíduos industriais com elevada carga orgânica e/ou potencial metanogênico no intuito de incrementar a produção de biogás e otimização da infra-estrutura instalada. Deverá ser verificada na região a disponibilidade de resíduos para este processo.

Cabe salientar que as características físico-químicas dos resíduos devem ser estudadas para avaliação da viabilidade e a proporção que poderá ser aplicada. A tabela a seguir apresenta um resumo de alguns resíduos com potencial para co-digestão com FORM.

<b>Indústria</b>	<b>Tipo de resíduo</b>
Abate de animais	Linhas verde e vermelha de abatedouro de bovinos, suínos, caprinos, etc...
Alimentícia	Processamento de tomate, café, grãos, suco, enlatados, carne, etc...
Laticínios	Soro e gorduras
Papel e celulose	Licor negro
Sucroalcoleira	Vinhaça
Bebidas	Efluentes líquidos em geral

**Tabela 1 – Resíduos industriais com potencial para co-digestão**

A alternativa de pós-digestão do lixiviado gerado associado a um resíduo de outra fonte visa otimizar a utilização da infra-estrutura projetada, a capacidade e diversidade de tratamento bem como propiciar uma maior produtividade de biogás.

Para a instalação da unidade deverá ser priorizado locais que possuam rede coletora de esgoto sanitário ou unidade de tratamento de efluentes líquidos para facilitar o gerenciamento dos efluentes líquidos gerados no processo.

O conceito apresentado foi concebido de forma a utilizar equipamentos robustos e de fácil manutenção, minimizar a utilização de maquinário, priorizar a utilização de mão de obra objetivando a disseminação deste tipo de tecnologia em pequenas comunidades de países em desenvolvimento.

O projeto executivo da planta de tratamento de RSU só deve ser realizado após uma caracterização específica dos resíduos a serem trabalhados.

Este é um projeto de uma nova concepção de uma linha pré-tratamento e de um novo modelo de digestor anaeróbio. As soluções técnicas apresentadas traçam diretrizes para o desenvolvimento de uma nova tecnologia para o tratamento de RSU linhas de pré-tratamento e metanização seca.

## 2 – CONTEXTUALIZAÇÃO

As Plantas TMB com tecnologia de metanização começaram a ser disseminadas na Europa na segunda metade da década de 90.

Entre 1995 a 2008, a capacidade instalada de Digestão Anaeróbia (DA) na Europa sofreu um acréscimo de aproximadamente 2.300%, passando de cerca de 194.000t/ano para aproximadamente 4.600.000 t/ano. Segundo projeções, a capacidade instalada em 2010 será de 5.240.000 t/ano em um total de 171 plantas na Europa (De Baere L. e Mattheeuws B., 2008).

Segundo o mesmo estudo, em 2010 a Alemanha possuirá 69 plantas com uma capacidade instalada de 1.531.555 t/ano, enquanto que a Espanha com apenas 24 unidades será capaz de tratar 1.319.000 t/ano, o que representa uma capacidade média de 22.196 t/ano e 67.900 t/ano por planta, respectivamente (De Baere L. e Mattheeuws B., 2008).

As Figuras 1 e 2 detalham a evolução capacidade instalada de metanização da Fração Orgânica dos Resíduos Municipais (FORM) na Europa ao longo dos anos e a capacidade instalada em países europeus.

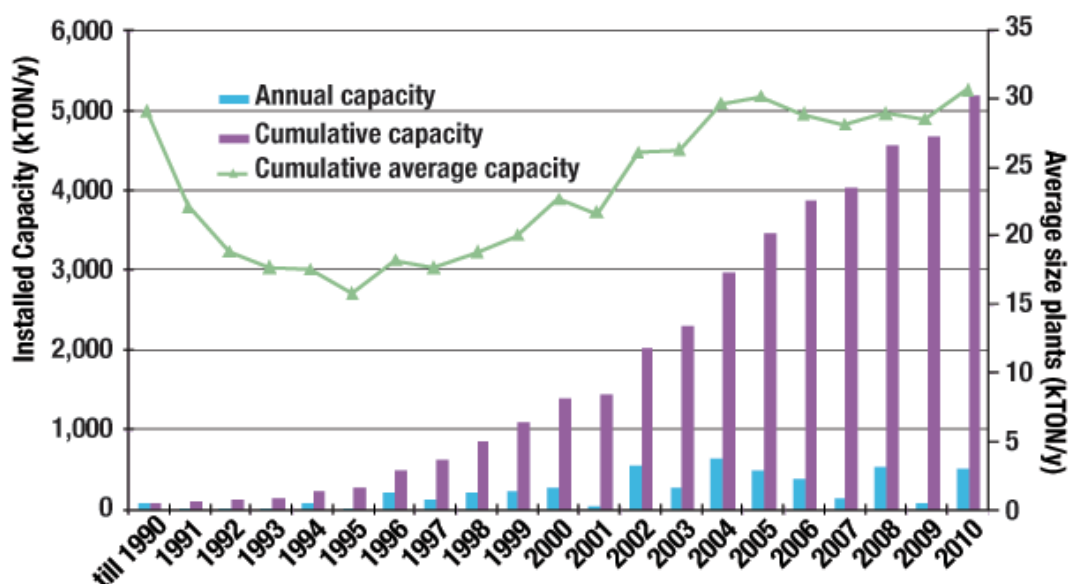


Figura 1 – Evolução da capacidade instalada europeia de metanização da FORM (Fonte: De Baere L. e Mattheeuws B., 2008)

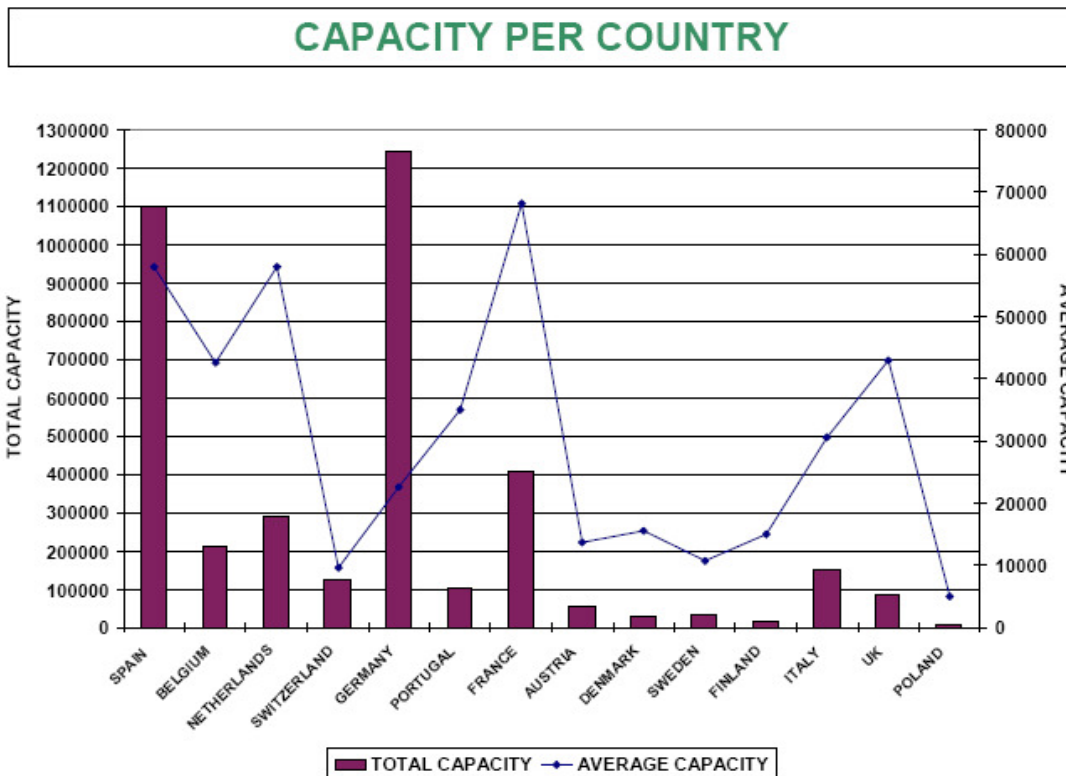


Figura 2 – Capacidade instalada de metanização da FORM em países europeus (Fonte: De Baere, 2008)

O processo de metanização da FORM requer uma unidade pré-tratamento que seja capaz de triar os resíduos recebidos segregando-os em três frações distintas: FORM, recicláveis e resíduos, de forma que o reator seja alimentado com um material o mais livre de impróprios possível.

Estas unidades foram inicialmente concebidas para operarem em países onde a utilização de mão-de-obra representa um elevado custo operacional, priorizando-se assim a mecanização do sistema. Dada a similaridade na densidade e dimensões dos diversos tipos de resíduos, muitas vezes um equipamento projetado para remover um determinado material acaba segregando conjuntamente impróprios ao sistema, acarretando assim em uma diminuição na quantidade de matéria orgânica disponível para introdução no reator e/ou uma contaminação do material triado. Como exemplo destaca-se as mesas densimétricas, que objetivam a remoção de materiais pesados. Muitas destas mesas foram inutilizadas em plantas industriais pelo fato remover inadequadamente grandes quantidades de FORM junto ao material a ser selecionado nestes equipamentos devido a similaridade entre o peso, granulometria e forma da matéria orgânica e dos materiais a serem removidos.

É consenso entre especialistas do setor que a triagem manual em plantas de pré-tratamento é o processo de separação que apresenta a maior eficiência na segregação dos materiais presentes nos RSU.

Atualmente o percentual de geração de resíduos de plantas em unidades TMB é sempre superior a 50% do material entrante. Este resíduo é proveniente da caída do tromel<sup>1</sup> (material com dimensões superiores à malha do tromel) que, após passar por uma cabine de triagem e alguns equipamentos mecânicos (mesa densimétrica, separador magnético, separador focault, etc) é destinado a um aterro sanitário ou a uma incineradora. Por possuir um alto índice de materiais potencialmente recicláveis, entende-se que a recirculação deste material (resíduos de planta) no sistema de pré-tratamento propiciará um incremento na recuperação de materiais recicláveis reduzindo assim o custo de disposição final dos resíduos.

De acordo com a literatura, o processo de metanização da FORM ocorre em via seca (> 15% de sólidos totais (ST)) ou em via úmida (< 15% ST). (De Baere, 2003).

Os sistemas de via úmida foram concebidos baseando-se nas tecnologias desenvolvidas para a digestão anaeróbia de líquidos (resíduos da suinocultura, esgotos domésticos, efluentes orgânicos industriais, chorume, etc). Esta adaptação propiciou uma rápida disseminação da tecnologia, sendo que atualmente várias empresas comercializam este sistema de tratamento. Estas tecnologias trabalham com baixo teor de ST de entrada. Como exemplo, citam-se os reatores de tecnologia Linde e Ros-Roca que operam com uma concentração de ST variando entre 3 – 8 %.

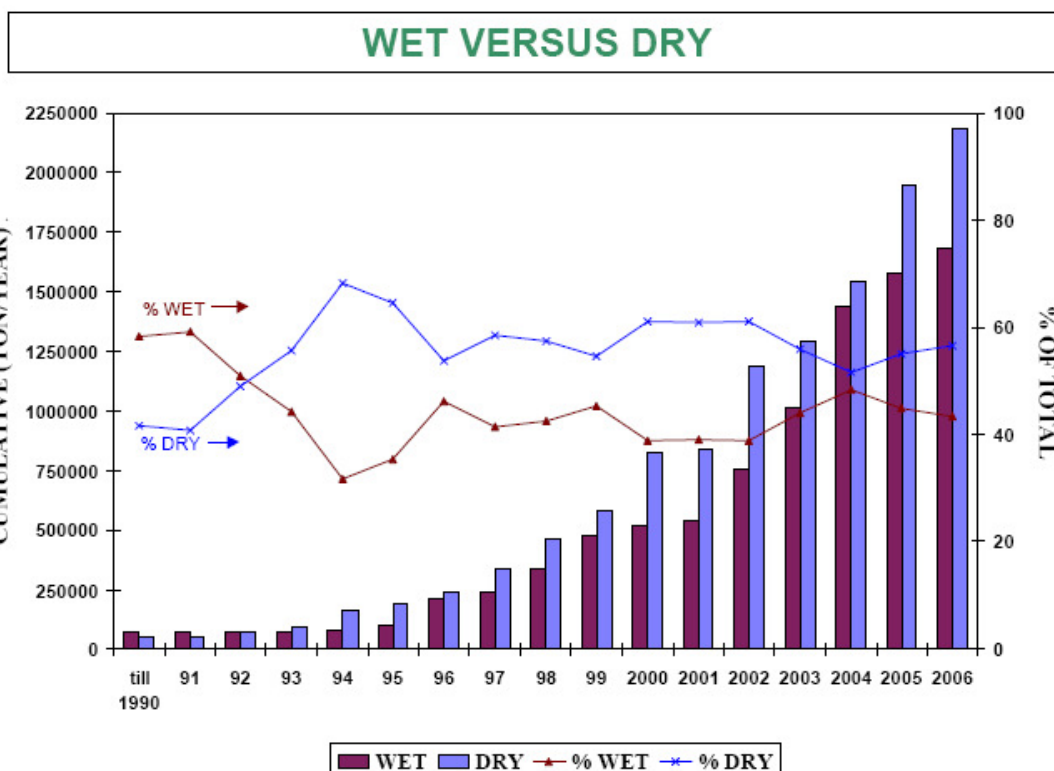
Uma vez que a FORM possui um teor de umidade da ordem de 60-65% faz-se necessária a adição de água para que digestores via úmida operem na faixa de matéria seca projetada. Este fato acarreta na necessidade de construção de sistemas de pré-tratamento e desidratação mais complexos que os sistemas via seca, onerando os custos de implantação, manutenção e operação, além de operarem com uma carga orgânica reduzida.

Dadas estas implicações, iniciou-se a pesquisa e o desenvolvimento para a construção de reatores onde não houvesse a necessidade de diluição da FORM, processo este denominado via seca. Em 1993, a capacidade instalada de metanização via seca da FORM superou o processo via úmida, representando 54% do total (De Baere, 2003).

A Figura 3 apresenta um comparativo ao longo dos anos das capacidades instaladas de metanização via seca e via úmida de tratamento de RSU no mundo.

---

<sup>1</sup> Tromel: Peneira rotativa para segregação dos RSU em duas frações com dimensões de partículas distintas.



**Figura 3 – Capacidade instalada via seca X Capacidade instalada via úmida  
(Fonte: De Baere, 2008)**

Devido a um maior conhecimento técnico-científico, os digestores secos concebidos operavam majoritariamente na faixa de temperatura mesofílica (37 °C).

Entretanto, devido às características da FORM (maior capacidade tampão do meio em função do elevado teor de sólidos em digestão) o processo biológico é mais estável quando comparado ao de digestores para tratamento de efluentes líquidos. Este fato propiciou o desenvolvimento de tecnologias que operam de forma estável na faixa termofílica.

Conforme pode ser observado no gráfico a seguir, atualmente, 30% da capacidade instalada de digestão anaeróbia da FORM é representada por plantas que operam na faixa termofílica, sendo que 96% da operação na faixa termofílica ocorre em unidades de metanização via seca. (De Baere L. e Mattheeuws B., 2008)

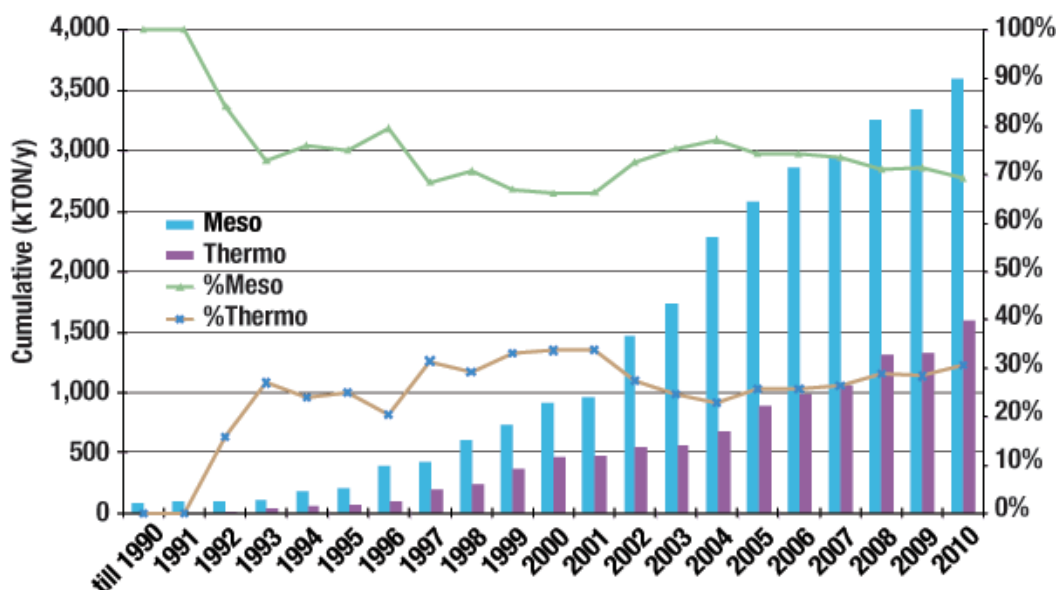


Figura 4 – Capacidade instalada faixa mesofílica X Capacidade instalada faixa termofílica (Fonte: De Baere L. e Mattheeuws B., 2008)

Observa-se que a metanização de RSU é uma tecnologia recente, em processo amadurecimento, com elevado potencial de disseminação em função da pequena quantidade de plantas atualmente em operação a nível mundial.

Um fator chave para se considerar que uma tecnologia atingiu a efetividade desejada é que a unidade opere de forma adequada de acordo com o estipulado em projeto.

Segundo a Associação Catalã de Empresas de Valorização Energética de RSU (2008), das plantas de metanização até a presente data construídas, 12 tiveram suas atividades encerradas, 20 enfrentam problemas operacionais e 60 estão com problemas econômicos.

Verifica-se atualmente que grande parte das plantas em operação necessitaram de modificações para que o seu sistema se adequasse à realidade dos resíduos alimentados. Como destaque cita-se as seguintes plantas:

- Ecoparc 1 – Barcelona, ES. Construída com a tecnologia Linde-KCA, necessitou de uma completa reformulação nos sistemas de alimentação, agitação e extração, tendo suas atividades interrompidas por um período de aproximadamente dois anos;
- Ecoparc 2 – Barcelona, ES. Construída com a tecnologia Valorga, interrompeu as atividades dos três digestores por um ano cada devido a problemas de sedimentação de inertes. Para solução fez-se

necessário uma reformulação no sistema de agitação e de acesso ao interior dos reatores;

- Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos de A Coruña - La Coruña, ES. Construída com a tecnologia Valorga, formou-se uma camada de material sobrenadante que obstruiu os sensores de pressão, não acusando um aumento da pressão interna o que levou a explosão de um dos reatores;

Por fim, cabe salientar que o maior problema operacional observado nas plantas atualmente em operação é a grande quantidade de inertes entrantes no sistema de metanização. As linhas de pré-tratamento, por mais sofisticadas que sejam, não conseguem gerar um material com as características exigidas pelas tecnologias de metanização.



### 3 – PARÂMETROS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE METANIZAÇÃO

O monitoramento do processo de metanização deve ser realizado avaliando-se: resíduo de entrada, lodo em digestão, biogás, sólidos e líquidos do processo de desidratação.

As principais análises a serem realizadas em cada um destes materiais são:

- **Resíduos de entrada:**
  - Teor de ST;
  - Teor de SV;
  - Composição gravimétrica;
  - Temperatura;
  - Vazão.

Uma vez que o resíduo de entrada é a matéria-prima do processo de DA, o conhecimento de suas características físico-químicas é de suma importância para a correta operação do processo de digestão. Sabendo-se o teor de ST, SV e vazão do material de entrada é possível determinar e avaliar parâmetros como a carga orgânica aplicada, taxa de degradação da matéria orgânica, rendimento da produção de biogás por FORM alimentada.

A composição gravimétrica é realizada com a finalidade de avaliar a eficiência do sistema de pré-tratamento, bem como determinar a quantidade de impróprios sedimentáveis entrantes no sistema de digestão.

A medição de temperatura é utilizada para o controle na manutenção da faixa de operação - mesofílica ou termofílica.

- **Lodo em digestão:**
  - pH;
  - Teor de SV;
  - Teor de matéria seca;
  - Concentração de Ácidos Graxos Voláteis (AGV);
  - Capacidade tampão do meio;
  - Percentual de inertes;
  - Temperatura;

O pH do meio, bem como a concentração de AGV e capacidade tampão são fundamentais para avaliar a estabilidade do processo biológico. A concentração de

AGV e capacidade tampão representam um retrato em tempo real do meio biótico presente no material em digestão. De posse destes resultados é possível estabelecer um balanço quantitativo entre a capacidade de produção e de consumo dos ácidos orgânicos realizada pelos microrganismos presentes no meio.

A análise quantitativa dos inertes é necessária para avaliar a taxa de acumulação destes no interior do reator.

A quantidade de SV presentes no lodo permite determinar o rendimento do reator (Kg de SV/m<sup>3</sup> digestor.d), taxa de degradação da matéria orgânica (%SV eliminados), rendimento da produção de biogás (Nm<sup>3</sup> biogás / kg de SV degradado).

A determinação do teor de ST permite definir o tempo de residência de forma a manter o teor de ST dentro da faixa estipulada em projeto.

A medição de temperatura é utilizada para o controle na manutenção da faixa de operação mesofílica ou termofílica.

- **Biogás:**
  - Teor de CH<sub>4</sub>;
  - Teor de H<sub>2</sub>S;
  - Vazão;
  - Pressão.

A quantificação do teor de CH<sub>4</sub>, bem como sua vazão permitem avaliar a estabilidade do processo biológico e a concentração de CO<sub>2</sub> no biogás.

A determinação do H<sub>2</sub>S se faz necessária para o monitoramento do processo de desulfuração.

O monitoramento contínuo da pressão de saída do biogás possibilita ajustar a mesma aos valores de trabalho requeridos no sistema de aproveitamento do biogás.

- **Sólidos do processo de desidratação:**
  - Teor de Sólidos Totais (ST);
  - Teor de SV;

O teor de ST permite avaliar a eficiência do processo de desidratação. O teor de SV possibilita a determinação da necessidade de degradação destes sólidos no processo de pós-tratamento (compostagem ou secagem).

- **Líquidos do processo de desidratação:**

- Teor de ST;
- Teor de SV
- Teor de Sólidos Fixos (SF);
- DQO;
- Amônia;
- Vazão.

Avaliando os teores de SV, ST e DQO é possível determinar e avaliar os principais parâmetros de operação do digestor secundário, como por exemplo: carga orgânica aplicada ( $\text{kg de SV} / \text{m}^3 \text{ reator.d}$ ) rendimento do reator ( $\text{m}^3 \text{ biogás} / \text{kg de SV degradado}$ ), taxa de degradação da matéria orgânica (ST, SV), rendimento da produção de biogás ( $\text{Nm}^3 \text{ biogás} / \text{kg de SV introduzido}$ ).

A análise do teor de SF permitirá determinar a quantidade de impróprios sedimentáveis no material de alimentação do reator secundário.

A concentração de amônia juntamente com a DQO permitem a definição da vazão de entrada do líquido no digestor secundário.

## 4 – TECNOLOGIAS COMERCIAIS DE DIGESTÃO ANAEROBIA SECA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A seguir apresenta-se um resumo das tecnologias quatro tecnologias de metanização via seca disponíveis no mercado: Linde-BRV; Kompogás; Dranco e Valorga.

### 4.1 - Sistema Linde-BRV:

Este processo é de propriedade da empresa alemã Linde-KCA-Dresden GmbH.

Sua tecnologia de digestão seca pode operar tanto na faixa de temperatura mesofílica ou termofílica. O reator é construído em concreto armado em formato retangular e de fluxo contínuo. O processo de agitação é realizado com o auxílio de pás rotatórias perpendiculares à parede lateral do reator. Um mecanismo de piso móvel auxilia no transporte e retirada da massa digerida. A introdução da FORM é realizada via rosca-helicoidal-sem-fim que direciona o material à parte superior do reator. Para a extração do material digerido é utilizado um sistema de vácuo que succiona o material digerido do interior do reator a um tanque de armazenamento.

Estes reatores operam com um teor de ST da ordem de 15 a 45%, uma taxa de produção de biogás de 100 m<sup>3</sup> por tonelada de FORM e consomem cerca de 30% da energia produzida. (International, 2005)

A Figura 5 apresenta um modelo esquemático desta tecnologia.

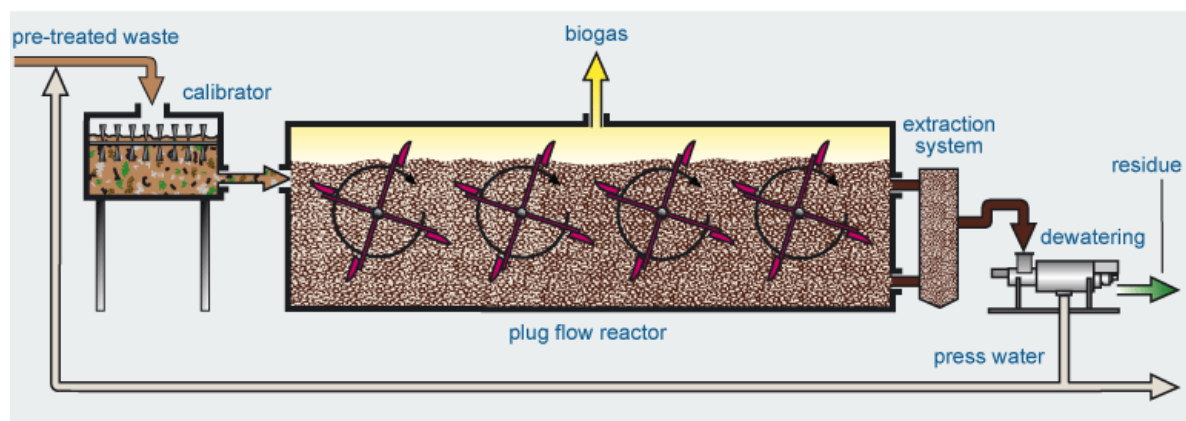


Figura 5 – Modelo esquemático do reator Linde-BRV

#### 4.2 - Sistema Kompogas:

De propriedade da companhia suíça Kompogas, este sistema teve sua primeira planta instalada em Rümlang, Suíça, no ano de 1991, com incentivo dos governos da Suíça e de Zurique.

Opera majoritariamente na faixa de operação termofílica. O reator é construído em concreto armado ou em aço, em formato retangular, de fluxo contínuo. O sistema de alimentação se dá pela introdução do material via bombas similares às utilizadas para bombeamento de concreto. Neste processo ocorre ainda a mescla da FORM com o lodo digerido bem como o aquecimento do material via injeção de vapor d'água. A extração do material digerido foi projetada de forma a ocorrer sem o auxílio de bombas, utilizando-se apenas da sobre-pressão no interior do reator. A agitação do material em digestão é realizada pela rotação de pás fixadas em um único eixo transversal.

Estes reatores operam com um teor de ST da ordem de 28%, o tempo de retenção hidráulico variando entre 15 e 20 dias é uma taxa de produção de biogás da ordem de 100m<sup>3</sup> por tonelada de FORM alimentada e consomem cerca de 25% da energia produzida. (International, 2005)

A Figura 6 apresenta um modelo esquemático desta tecnologia.

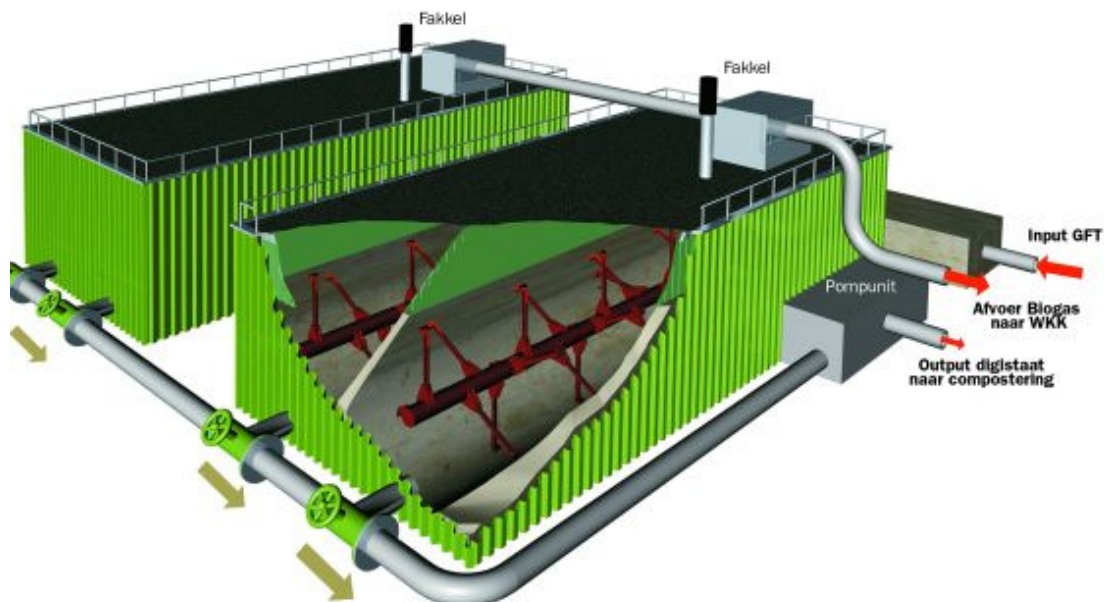


Figura 6 – Modelo esquemático do reator Kompogas

#### 4.3 - Sistema Dranco:

O sistema Dranco é de propriedade da empresa belga Organic Waste Systems (OWS), fundada em 1988.

Possui um digestor em formato de silo. O sistema de alimentação se dá pela introdução do material via bombas similares às utilizadas para o bombeamento de concreto. Os sistemas de recirculação e extração são realizados através da abertura de válvulas em diferentes regiões da parte inferior do reator. A agitação é realizada pela re-circulação do material, sendo este extraído pela parte inferior do reator e bombeado para a região superior do mesmo. A manutenção da temperatura de trabalho é realizada pela injeção de vapor no material entrante.

Estes reatores são construídos em concreto armado ou aço inox, operam na sua maioria em faixa termofílica, com um teor de ST da ordem de 15 a 40%, o tempo de retenção hidráulico variando entre 20 e 30 dias é uma taxa de produção de biogás de variando entre 110m<sup>3</sup> por tonelada de FORM alimentada e consomem cerca de 20% da energia produzida. (International, 2005)

A Figura 7 apresenta um modelo esquemático desta tecnologia.

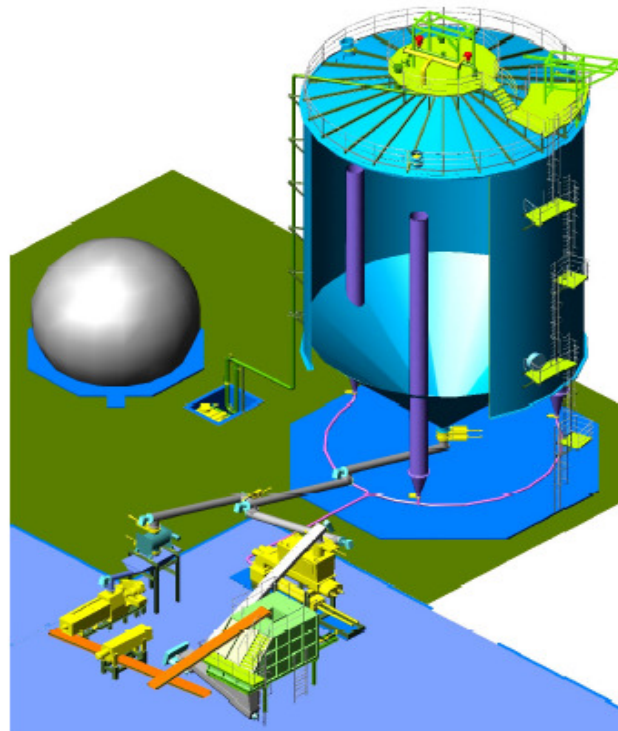


Figura 7 – Modelo esquemático do reator Dranco

#### 4.4 - Sistema Valorga:

O Sistema Valorga, desenvolvido na França, foi adquirida recentemente pelo grupo Urbaser. Esta tecnologia foi desenvolvida para tratar somente resíduo orgânico, sendo posteriormente adaptada para tratamento de RSU segregados na fonte.

O reator Valorga é um cilindro vertical construído em concreto armado. No interior do digestor existe uma parede com um comprimento de aproximadamente 2/3 do diâmetro do reator, separando a região de introdução do material da região de extração do lodo. Isto proporciona que o material seja digerido em um sistema de fluxo pistão.

O sistema de alimentação se dá pela introdução do material via bombas similares às utilizadas para bombeamento de concreto. A extração do lodo se dá por um processo abertura e fechamento de válvulas que, em função da coluna de lodo, exerce uma pressão que propicia a extração do material sem a necessidade da utilização de bombas. Como sistema auxiliar, uma bomba de pistão pode ser utilizada neste processo.

A mistura do material em digestão é realizada pela injeção de biogás comprimido (6-8 bar) através de orifícios localizados na base do digestor, não existindo elementos mecânicos no interior do reator.

Esta tecnologia permite a operação nas faixas mesofílica ou termofílica.

Estes reatores operam com um teor de ST da ordem de 37 a 55%, o tempo de retenção hidráulico variando entre 18 e 25 dias é uma taxa de produção de biogás de variando entre 82 e 106m<sup>3</sup> por tonelada de FORM alimentada e consomem cerca de 25 da energia produzida. (International, 2005)

A Figura 8 apresenta um modelo esquemático desta tecnologia.



**Figura 8 – Modelo esquemático do reator Valorga**

## 5 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TECNOLOGIAS DE METANIZAÇÃO SECA

Analisando as tecnologias de metanização seca disponíveis no mercado, verificam-se potencialidades e vulnerabilidades em cada uma delas. Como potencialidades, citam-se:

- O sistema alimentação Linde-BRV utiliza-se de uma tremonha de mescla seguida por um mecanismo de rosca helicoidal-sem-fim que introduz o resíduo no reator sem a necessidade de bombas. Isto acarreta em um baixo custo de implantação e manutenção bem como uma simplicidade na operação do sistema;
- A tecnologia Linde-BRV utiliza-se de um sistema de extração composto por uma bomba de vácuo que succiona o lodo do interior do digester dirigindo-o a um tanque de armazenamento. Devido à coluna de lodo exercer uma pressão positiva na tubulação de extração, não se mostra necessário a utilização desta bomba em extrações de rotina. Porém, em casos de obstruções na linha de extração é possível a sucção do material e desobstrução da linha;
- Apesar da necessidade de limpezas periódicas dos bocais de injeção de biogás comprimido, o sistema de agitação da tecnologia Valorga mostra-se bastante prático e eficiente. A grande vantagem deste sistema de agitação é a ausência de elementos mecânicos internos no reator;
- Ao contrário da tecnologia Linde-BRV, que possui um sistema de aquecimento via serpentinas nas paredes do reator, as tecnologias Valorga, Dranco e Kompogas possuem um sistema de aquecimento via injeção de vapor no material entrante do reator;
- Quanto aos sistemas de captação de gases, verifica-se que todas as tecnologias possuem mecanismos similares e que os mesmos são eficientes e com baixo custo de manutenção (tubos inoxidáveis com válvulas do tipo borboleta, discos de ruptura, medidores de pressão, válvulas de segurança de sobre e sub pressões, medidores de vazão). Cabe destacar que a tecnologia Kompogas não se utiliza de gasômetro para a manutenção da pressão de trabalho requerida nos motores de co-geração não apresentando problemas de operação na ausência deste equipamento;
- O modelo de fluxo de pistão das tecnologias Linde-BRV e Kompogas utilizam-se de reatores retangulares, modelo “caixa-de-sapato”, de baixa altura (7,5m)



o que facilita e reduz os custos de construção bem como requerem uma menor necessidade energética para a movimentação do material em digestão.

Como desvantagens operacionais e de projeto observadas nas tecnologias de metanização seca, destacam-se:

- Utilizando-se apenas da força da gravidade como sistema de extração, os reatores Kompogas não possuem nenhum mecanismo complementar que possibilite a desobstrução de eventuais entupimentos no sistema, sendo necessária uma intervenção manual para a desobstrução dos dutos de extração;
- Os sistemas de alimentação dos reatores das tecnologias Dranco e Valorga utilizam-se de um mecanismo de bombas de elevada potência com altos custos de implantação, operação e manutenção (bombas similares as utilizadas para bombeamento de concreto). Isto porque, no caso do Dranco, faz-se necessário a elevação do resíduo à parte superior do digestor, e no caso Valorga (alimentação pela parte inferior), requer-se uma elevada pressão devido à necessidade do rompimento da coluna de resíduos. Cabe salientar que estas duas tecnologias possuem reatores verticais em formato cilíndrico, acarretando em digestores com altura geralmente superiores a 20m;
- O sistema de agitação da tecnologia Valorga consiste na injeção de biogás comprimido pela parte inferior do reator. Devido ao tempo decorrido entre as agitações e bem como o peso da coluna de resíduos, é rotina a necessidade de desobstruções diárias dos bocais de injeção de biogás;
- Os sistemas de agitação das tecnologias Linde-BRV e Kompogas utilizam-se de elementos mecânicos móveis no interior do reator. Caso seja necessário algum procedimento de reparo ou manutenção nestes componentes, faz-se necessária a abertura do biodigestor o que pode acarretar a desestabilização do processo biológico e necessidade de nova posta em marcha do mesmo;
- Dado a praticidade de implantação, a maioria das unidades de metanização de resíduos em operação no mundo utilizam o biogás para a geração de energia elétrica em motores de co-geração. Porém, além destes motores possuírem um elevado custo de implantação, verifica-se a necessidade de contratação de um plano de manutenção periódica diretamente com o fornecedor do equipamento, o que representa um custo de manutenção anual da ordem de 10% sobre o valor investido. Outro ponto negativo na utilização de motores de co-geração é quanto a baixa eficiência energética na conversão da energia química em elétrica, aproximadamente 30% da energia potencial presente no biogás;

- Buscando minimizar a sedimentação de material no interior do reator, a tecnologia Dranco introduz terras diatomáceas com o objetivo de aumentar o teor de matéria seca dos resíduos em digestão. Isto faz com que seja necessário um plano de gestão para a obtenção constante deste material, muitas vezes acarretando em um alto custo de transporte bem com a dependência de terceiros;
- Os sistema de desidratação do lodo digerido de todas as tecnologias necessitam de um pós-tratamento dos lixiviados gerados.

É comum nas atuais tecnologias a necessidade de paradas periódicas do processo de digestão para abertura e limpeza dos reatores devido a problemas como a perda de capacidade de tratamento pela acumulação de inertes no interior do reator, entupimentos nos mecanismos de alimentação e/ou extração bem como manutenção dos sistemas de agitação das tecnologias Kompogas e Linde-BRV.

Desta forma, de acordo com os aspectos de projeto, conceitos do mecanismo de fluxo e a variabilidade no comportamento do material entrante, as tecnologias atualmente em operação requerem melhorias imprescindíveis para o correto funcionamento do processo.

Com base nesses fatos, buscou-se o desenvolvimento de um digestor capaz de solucionar os principais problemas operacionais enfrentados atualmente nas plantas de tratamento.

A seguir apresenta-se um descritivo do projeto conceitual da planta de tratamento mecânico biológico de RSU para pequenas comunidades, que busca solucionar os problemas acima elencados.

## 6 – DEFINIÇÃO DA ESCALA

Para a determinação do volume do digestor a ser construído foi elaborado um histórico do ganho de escala das quatro tecnologias de digestão anaeróbia seca de RSU disponíveis no mercado. As tabelas abaixo apresentam um resumo da evolução de cada tecnologia.

Localização	Substrato	Volume do digestor (m <sup>3</sup> )	Capacidade da planta (T/ano)	Nº de reatores	Ano de Construção	Escala
Montpellier, França	RSU, Dejetos de animais	5	49*	1	1982	Laboratório
La Buisse, França	RSU	500	8.000	1	1984	Piloto
Vannes, França	FORM, Dejetos de animais, Lodo ETE	50	487*	1	1986	Piloto
Liège, Bélgica	Resíduos agrícolas, Dejetos animais	250	2.433*	1	1988	Piloto
Amiens, França	RSU	3 x 2.400 1 x 3.500	85.000	4	1988	Comercial
Tilburg, Holanda	Resíduos de mercados	3.200	52.000	2	1994	Comercial
Engelskirchen, Alemanha	FORM	3.000	35.000	1	1997	Comercial
Freiburg, Alemanha	FORM	4.000	36.000	1	1999	Comercial
Genebra, Suíça	-	1.000	10.000	1	2000	Comercial

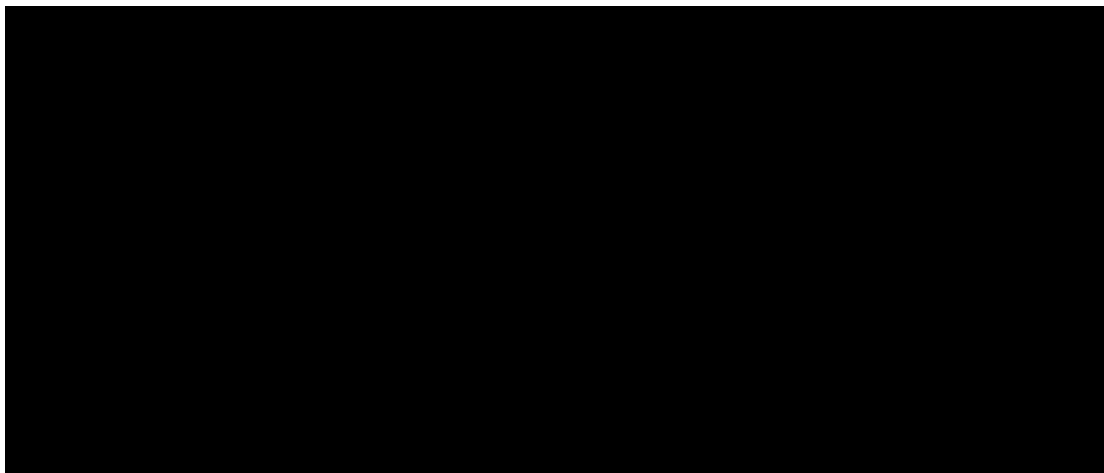
\*Devido a indisponibilidade de dados, estes valores foram calculados considerando um Tempo de Detenção Hidráulico TDH de 25 dias.

Fonte: <http://www.valorgainternational.fr/>

**Tabela 2 – Scale-up Valorga**

Sendo a pioneira no desenvolvimento tecnológico da DA seca de RSU, a empresa Valorga teve seu primeiro digestor em escala de laboratório construído em 1982 com um volume de 5m<sup>3</sup>, promovendo um *scale-up* de 100 vezes para um digestor de 500m<sup>3</sup> em 1984.

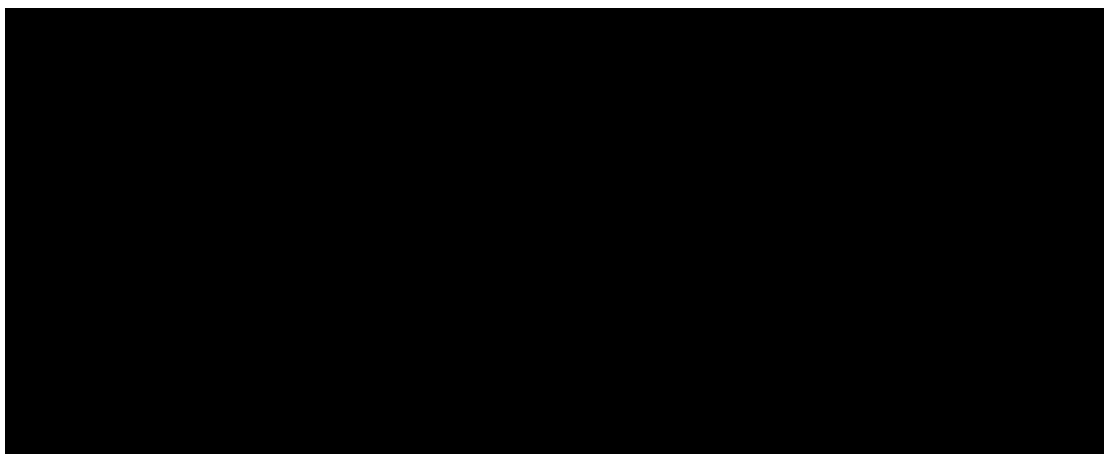
Entretanto, após dois anos da construção do segundo digestor (tempo médio entre escalonamentos), reduziram a escala construindo um digestor com 50m<sup>3</sup>. Em 1988 construíram 4 reatores, sendo 1 em escala piloto de 250m<sup>3</sup> e 3 em escala industrial com volume de 2.500m<sup>3</sup> cada.



**Tabela 3 – Scale-up Dranco**

Com as primeiras plantas piloto construídas em 1984 e 1986 com digestores de capacidade de 60m<sup>3</sup> e 30m<sup>3</sup> respectivamente, a tecnologia Dranco desenvolveu seu primeiro digestor em escalada industrial com 800m<sup>3</sup> na cidade de Brecht, Bélgica em 1992.

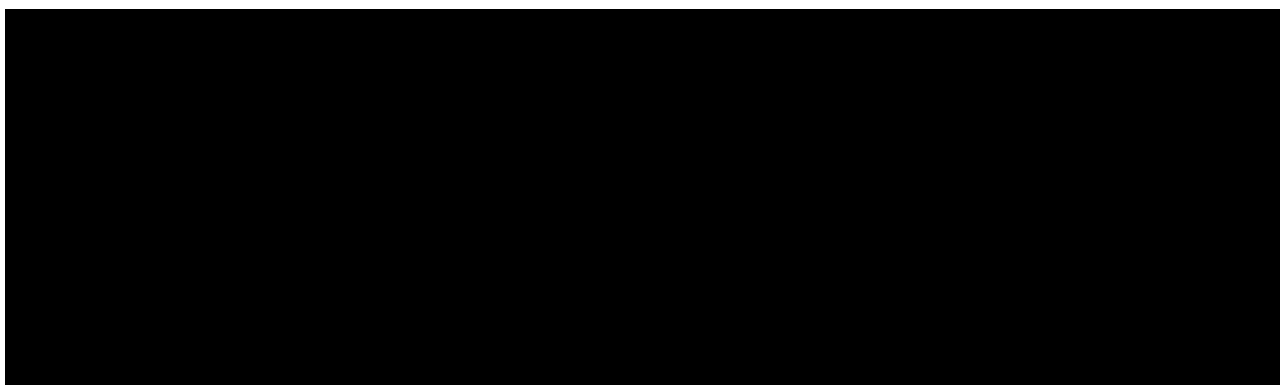
Observa-se que em 1989 e 2004 foram construídos dois digestores em escala de laboratório para estudo do processo.



**Tabela 4 – Scale-up Kompogas**

A tecnologia Kompogas foi desenvolvida a partir de uma planta piloto de 20m<sup>3</sup> construída em 1989 na cidade de Rümlang na Suíça. Após dois anos foram implantados dois novos reatores no mesmo local, que operam até os dias atuais, com uma capacidade de 8.500 t/ano.

A partir desta data foram construídos diversos reatores comerciais de 250m<sup>3</sup> sendo que atualmente o maior módulo comercializado constitui-se de digestores com 1.050m<sup>3</sup> de volume total.



**Tabela 5 – Scale-up Linde-BRV**

Tendo o seu primeiro digestor construído com 500m<sup>3</sup>, em Baar, Suíça, a companhia BRV, precursora da tecnologia Linde, foi alvo de processo por utilização de modelo reator idêntico ao patenteado pela empresa Kompogas.

Desta forma, foi obrigada a desenvolver um novo modelo de reator, o qual foi projetado a partir de duas unidades piloto construída em 1996 com digestores de aproximadamente 90m<sup>3</sup>.

A primeira unidade comercial foi construída em 1999 utilizando-se de reatores com 820m<sup>3</sup>.

A tabela a seguir apresenta uma compilação dos dados das unidades piloto supracitadas.

Tecnologia	Ano	Volume do digestor (m <sup>3</sup> )
Dranco	1984	60
Dranco	1986	30
Valorga	1984	500
Valorga	1986	50
Valorga	1988	250
Kompogás	1989	20
Kompogás	1992	160
Linde-BRV	1994	500
Linde-BRV	1996	90*
Linde-BRV	1996	90*

\* Valor estimado

**Tabela 6 – Scale-up das tecnologias**

Observa-se que para o desenvolvimento da tecnologia Dranco, foi construído primeiramente um reator em escala piloto de 60m<sup>3</sup>, seguido por um de 30m<sup>3</sup> e posteriormente um de digestor em escala laboratorial.

Apesar do primeiro reator piloto de tecnologia Valorga ter sido implantado com 500m<sup>3</sup>, fez-se necessário a construção de um novo piloto de menor volume para avaliação de modificações necessárias na solução de problemas operacionais relativos à sedimentação de impróprios.

Também projetado em 500m<sup>3</sup>, o primeiro digestor em escala piloto da empresa Linde-BRV foi considerado um cópia do Kompogas, sendo necessário o desenvolvimento de um novo conceito. Este novo modelo foi testado em dois reatores de 90m<sup>3</sup> cada.

O desenvolvimento do modelo Kompogas teve como objetivo viabilizar o tratamento dos RSU da cidade de Rümlang na Suíça. Após a operação de um protótipo de 20m<sup>3</sup>,

a planta foi ampliada com a construção subsequente de dois reatores com 160m<sup>3</sup> e 290m<sup>3</sup>, tornando-se assim economicamente viável e permanece em operação até a presente data.

Avaliando portanto a evolução dos modelos reatores das tecnologias existentes de digestão anaeróbia seca, propõe-se a construção de um protótipo de 50m<sup>3</sup> para a verificação da viabilidade técnica do conceito proposto.

Caso comprovada a viabilidade técnica, propõe o *scale-up* com a construção de um digestor de 150m<sup>3</sup>. Considerando a densidade da FORM igual a 0,8 t/m<sup>3</sup>, um volume útil de digestão de 100m<sup>3</sup>, o tempo de residência hidráulico de 25 dias e uma taxa de alimentação de 3,2 t/d e o digestor terá capacidade para atender uma população de aproximadamente 11 mil habitantes.

Caso sua operação demonstre viabilidade econômica, sugere-se a construção de um segundo reator, que operará em paralelo, constituindo assim uma unidade industrial para tratamento dos RSU via metanização seca que atenderá uma população de 25 mil habitantes, considerando os dois reatores de 150 m<sup>3</sup> e o reator de 50m<sup>3</sup>.

Esta escala foi definida de forma a atender um elevado percentual de municípios mineiros. De acordo com o Perfil Demográfico do Estado de Minas Gerais de 2000 (FGV, 2003), 87,5% dos municípios mineiros possuem uma população inferior a 20 mil habitantes, conforme pode ser verificado na tabela 6 apresentada abaixo.

Especificação	Absoluto	%
Mais de 500 mil hab.	2	0,2
De 100 a 500 mil hab.	16	1,9
De 50 a 100 mil hab.	31	3,6
De 20 a 50 mil hab.	58	6,8
De 10 a 20 mil hab.	103	12,1
De 5 a 10 mil hab.	160	18,8
Menos de 5 mil hab.	483	56,6
Total	853	100

**Tabela 7 – Distribuição das sedes municipais, segundo tamanho da população urbana de Minas Gerais, referente ao ano de 2000 (Fonte: Fundação João Pinheiro, 2003)**

## 7 - LINHA DE PRÉ-TRATAMENTO

Devido à quantidade de resíduos a ser tratada no digestor anaeróbio projetado (1,067 t/d), não se recomenda a construção de uma planta de pré-tratamento para esta unidade, devido à pequena escala necessária. Propõe-se que a unidade piloto seja construída em uma estação de triagem e compostagem já existente onde já ocorra a segregação da matéria orgânica. Caso não seja possível, se faz necessário a construção de uma mesa simples de triagem, construída em alvenaria, com capacidade para 3 triadores. Neste caso, apenas a matéria orgânica seria selecionada, não se prevendo nenhum tipo de recuperação de outro material.

Porém, como se prevê um *scale-up* do sistema, foi realizado um projeto de uma linha de pré-tratamento com capacidade de aproximadamente 20 t/d de RSU.

O sistema de pré-tratamento apresentado utiliza uma mescla de triagem manual e mecânica.

De forma a contextualizar este projeto com a realidade de países em desenvolvimento, priorizou-se a utilização de mão-de-obra local em detrimento da utilização de maquinário.

Optou-se pela simplicidade da linha tendo como elementos mecânicos a peneira rotativa (tromel), o separador magnético, as esteiras transporte e o triturador.

Este conceito visa a redução dos custos de implantação/manutenção da planta, uma maior eficiência na recuperação de orgânicos e recicláveis bem como um maior poder de inclusão social para o projeto.

Ressalta-se que é consenso entre os operadores de plantas que a triagem manual é a alternativa mais eficiente na segregação das distintas frações dos RSU.

A linha de pré-tratamento consiste de uma tremonha de alimentação, cabine de triagem de grandes volumes, tromel, linha de apuração da FORM, linha de recuperação de recicláveis e o sistema de *by-pass* para nova triagem do material.

Uma vez basculado no galpão de recebimento, o resíduo municipal será introduzido na tremonha de alimentação da linha de pré-tratamento com o auxílio de uma pá-carregadeira. No caso de um sistema de capacidade superior a 50 t/d se faz necessário a construção de um fosso para o armazenamento dos resíduos e utilização de um guindaste do tipo "clamb shell" para transferência dos resíduos do fosso de armazenamento à correia primária de alimentação.

O sistema de transporte do resíduo será efetuado mediante esteiras rolantes com motores elétricos. O resíduo introduzido na linha será transportado pela correia

primária e é passado em uma cabine de triagem manual de grandes volumes. Nesta cabine os materiais de grande volume deverão ser removidos e lançados em um fosso ou armazenados na própria cabine de triagem. Nesta etapa deverão removidos quaisquer objetos que possam danificar os equipamentos da linha de pré-tratamento.

Uma vez removidos os materiais de grande volume, o resíduo passante é destinado ao tromel, que se constitui de uma peneira cilíndrica rotativa provida de rompedores de sacolas plásticas com uma malha de separação de 50mm de diâmetro de abertura. Neste equipamento, além da abertura dos sacos de lixo, ocorrerá a separação do resíduo em duas frações (superior e inferior a 50mm).

Os materiais com dimensões inferiores a 50mm, denominados passante do tromel, serão encaminhados a uma segunda cabine de triagem para a remoção de materiais indesejáveis ao processo de metanização passíveis de coleta manual(vidros, plásticos, metais, papelão, etc...). O material resultante será encaminhado a um separador magnético para remoção de materiais férricos, e posteriormente a uma esteira reversível que poderá destinar o material ao triturador, para a cominuição em frações inferiores a 10 a 20mm ou ao galpão de armazenamento temporário para posterior lançamento ao triturador. Esta etapa se faz necessária em incidentes no sistema de alimentação do reator. Nesses casos, a correia reverte sua direção, encaminhando o material ao galpão de armazenamento temporário, não sendo assim necessária uma parada da linha de pré-tratamento.

Os materiais com dimensões superiores a 50mm, denominados caída do tromel, são constituídos majoritariamente por plásticos, papelões e papéis. Este material, após passagem pela cabine de triagem de reciclagem será direcionado ao galpão de armazenamento temporário para posterior re-introdução na linha de triagem a montante do tromel.

Nos sistemas de pré-tratamento em operação na Europa, os materiais resultantes da caída do tromel, após passagem pela cabine de triagem de recicláveis são considerados resíduos de planta, sendo destinados a aterros sanitários ou a incineração.

A proposta do sistema de pré-tratamento apresentado considerará que o material da caída do tromel possui potencial de reciclabilidade, sendo o mesmo recirculado na linha de pré-tratamento para uma melhor segregação.

O projeto proposto foi desenvolvido de forma que um terço da jornada de trabalho opere com o resíduo *in-natura* e os outros dois terços com a recirculação da caída do tromel. A re-introdução deste material se dará em uma tremonha de alimentação localizada à montante do tromel. Este fração do resíduo deverá ser re-circulada até ser considerada como resíduo, não possuindo materiais com potencial de



reciclagem, sendo assim destinado a um aterro sanitário ou a outra forma de disposição ou tratamento economicamente viável.

As potências informadas para os equipamentos do sistema de pré-tratamento foram definidas a partir de consultas a fornecedores.

A seguir apresenta-se o fluxograma da linha de pré-tratamento e a descrição das principais características de cada um dos equipamentos.

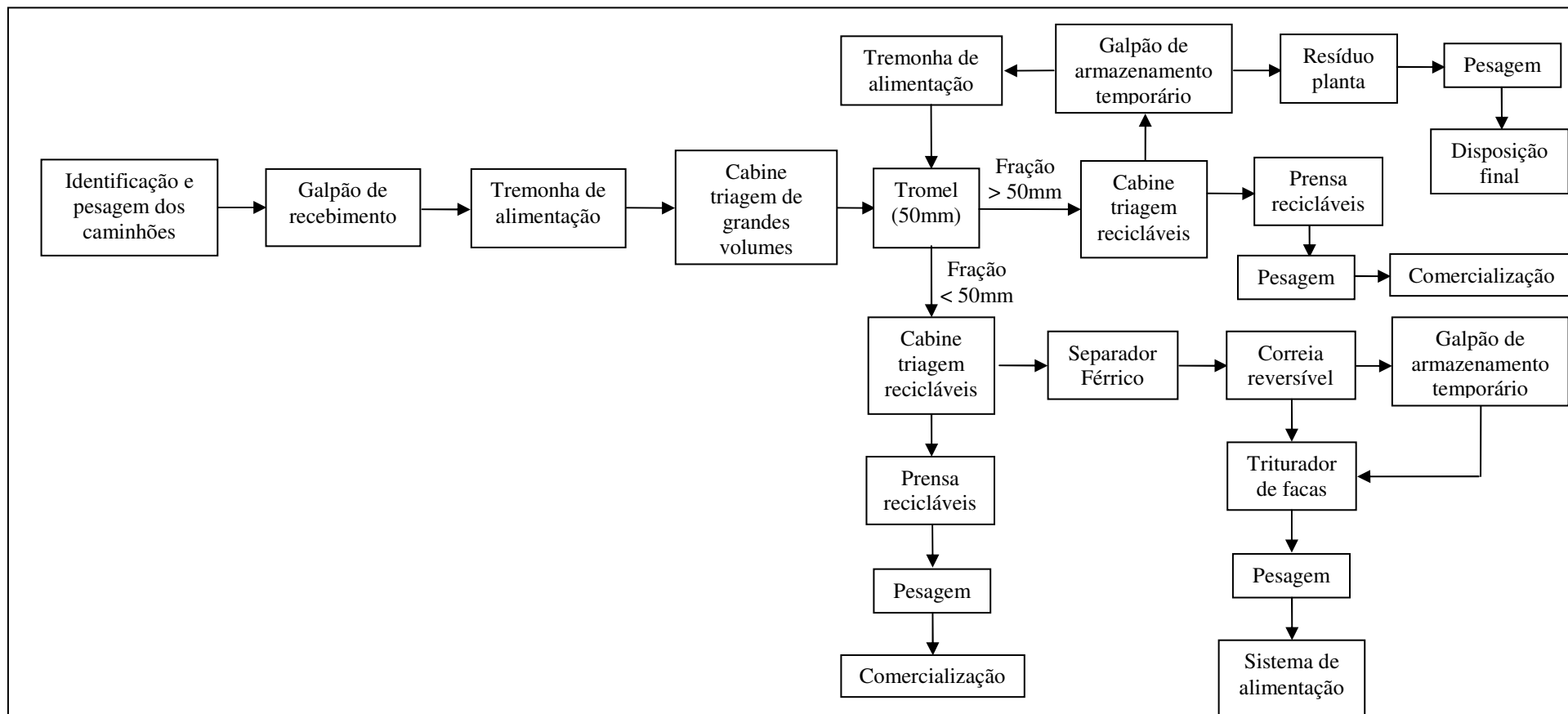


Figura 9 - Diagrama da linha de pré-tratamento da unidade industrial

## 7.1 – Descrição da linha de pré-tratamento “Resíduo Ø”

### 7.1.1 - Recebimento do material

Na chegada à planta, o caminhão é identificado e se dirige a uma balança para pesagem e posterior descarga no galpão de recebimento. Tendo em vista ao elevado custo da balança de pesagem de caminhões pode-se optar pela eliminação da mesma uma vez que haverá uma balança no sistema de pré-tratamento.

Após a pesagem dos caminhões, toda manipulação dos resíduos será realizada em local fechado a fim de se evitar o aparecimento de aves e vetores de doenças, bem como minimizar os problemas com odores.

Uma vez pesado e armazenado, o resíduo será coletado com o auxílio de uma pá carregadeira e encaminhado à tremonha de alimentação. O RSU *in natura* será destinado à linha de pré-tratamento, transportado pela correia primária.

A área de armazenamento do resíduo localiza-se próximo à tremonha de alimentação da linha de pré-tratamento devendo possuir um solo impermeabilizado e uma inclinação mínima de 3% para coleta de lixiviados. Todo o lixiviado será drenado e destinado ao sistema de alimentação do digestor secundário.

Considerando a densidade do lixo bruto igual a  $0,5 \text{ t/m}^3$ , uma altura máxima de empilhamento dos resíduos de 2m de altura e um pátio de recebimento com capacidade de armazenamento para 4 dias, será necessária a construção de um galpão com uma área de  $100\text{m}^2$  para armazenamento do lixo e uma área adicional de  $100\text{m}^2$  para manobra dos caminhões.

Para a entrada do caminhão na nave de pré-tratamento haverá uma porta exclusiva de abertura e fechamento automáticos, via de sensores de presença de forma que a porta permaneça o mínimo tempo aberta.

A alimentação da linha de pré-tratamento será realizada com o auxílio de uma pá-carregadeira que despejará o lixo na tremonha de alimentação.

A borda da tremonha localizada a montante da correia primária funcionará como um regulador de vazão para o resíduo entrante à linha de pré-tratamento. A correia primária transportará o material entrante até a correia da cabine de triagem de grandes volumes.

O transporte do material na linha de pré-tratamento será realizado por esteiras que conduzirão o lixo pelas unidades de triagem.

O pátio de armazenamento deverá ser coberto, com piso inclinado e impermeabilizado de forma a permitir a drenagem do lixiviado.

## 7.2 – Tremonha de Alimentação

Este equipamento tem como função o correto direcionamento do resíduo à linha de pré-tratamento.

É uma estrutura construída em aço-carbono, com pintura resistente a ácidos orgânicos e dispositivo regulador da quantidade de resíduos entrantes na linha. Possui a forma de um funil, tendo a boca de alimentação um comprimento cerca 20% superior a largura da pá-carregadeira utilizada para alimentação da linha e uma largura de 100cm.

As dimensões da boca de saída serão de 65cm de largura por 100cm de comprimento. A altura da tremonha será de 200cm.

A regulação da vazão de alimentação se dá através da variação na altura da chapa de liberação do material (sistema tipo guilhotina), ou seja, quanto maior a altura entre a chapa e a correia, maior será a quantidade de resíduos entrantes na linha.

## 7.3 - Cabine de Triagem de Grandes Volumes

Esta cabine terá capacidade para 2 triadores tendo seu piso elevado a 3,5m do solo para que os materiais triados sejam lançados ao fosso de armazenamento temporário localizados abaixo da cabine. Neste fosso os materiais lançados serão manejados com auxílio de um carro de mão basculante.

A cabine terá uma largura de 5m e um comprimento de 7m. Deve possuir telhas transparentes e janelas com vidro para aproveitamento da luz natural. Para renovação do ar ambiente será instalada uma tubulação para aspiração do ar e direcionamento a um o sistema.

O material triado será lançado ao fosso de armazenamento temporário, através de fundos falsos localizados ao lado dos triadores. Será construído um fundo falso em cada lado da linha, com dimensões de 70cm (largura) x 90cm (comprimento) x 100cm (altura). Uma tremonha de direcionamento do material será instalada em cada um dos fundos falsos para auxiliar no direcionamento do material ao fosso.

## 7.4 - Tromel

Este equipamento tem por finalidade a segregação do resíduo em duas frações, uma de maior diâmetro com elevada concentração de recicláveis e a de menor diâmetro com elevado teor de matéria orgânica.

É composto por uma estrutura cilíndrica, rígida e construída em aço carbono. Este cilindro possui uma malha perfurada com orifícios circulares de diâmetro de 50mm. Será dotado de estruturas para rompimento das sacolas, permitindo a segregação do material.

Este conjunto será instalado sobre um mecanismo para rotação em torno do seu próprio eixo, com rotação variável entre 18 a 60 RPM.

O mecanismo de rotação é composto por um conjunto de pneumáticos localizados nas laterais na parte central inferior ao longo de toda sua extensão. A determinação da quantidade de pneumáticos necessários para a sustentação do tromel será em função do peso total de estrutura, somado ao peso dos resíduos em movimentação ao longo do tromel dividido pela capacidade de suporte de cada pneumático.

De forma a auxiliar o fluxo do material, o tromel possuirá uma inclinação de 3%.

Terá um diâmetro de 170cm e 600cm de comprimento.

Para o rompimento das sacolas serão utilizadas estruturas em chapa de ferro, pontiagudas, instaladas em toda a extensão do tromel.

O resíduo será dividido entre o passante do tromel (> 50mm) e a caída do tromel (< 50mm).

Na parte inferior do cilindro de rotação será instalada uma tremonha para o direcionamento deste material a uma correia transportadora.

De forma a viabilizar a segregação da caída do tromel, o mesmo deverá possuir uma caixa externa de forma a direcionar o material < 50mm a uma esteira para seguimento da linha.

### *7.5 - Cabine de Triagem de Recicláveis*

Esta cabine terá capacidade para 20 triadores, divididos em duas linhas (passante e caída do tromel). A cabine deverá estar em uma cota de, no mínimo, 2,5m do solo para que os materiais triados sejam lançados aos fossos de armazenamento temporário, localizados abaixo da cabine. Neste fosso os materiais lançados serão manejados com auxílio de um carro de mão basculante.

A quantidade de espaços disponíveis em cada linha de segregação é superior ao número de triadores (5 em cada linha). Esta configuração permitirá o remanejamento dos triadores ao longo em função do regime de operação.

A cabine terá uma largura de 7m e um comprimento de 13m. Deve possuir telhas transparentes e janelas com vidro para aproveitamento da luz natural. Para renovação do ar ambiente, será instalada uma tubulação para aspiração do ar e direcionamento a um o sistema desodorização.

O material triado será lançado aos fossos de armazenamento temporário, através de fundos falsos localizados ao lado dos triadores. Será um fundo falso em cada lado da

linha, com dimensões de 70cm (largura) x 90cm (comprimento) x 100cm (altura). Uma tremonha de direcionamento do material será instalada em cada um dos fundos falsos para auxiliar no direcionamento do mesmo ao fosso.

Os fossos de armazenamento serão separados entre si por alvenaria, com muretas de aproximadamente 150cm de altura, de forma a evitar a mistura entre os materiais triados.

### *7.6 - Prensa de Recicláveis*

Atualmente, as linhas de pré-tratamento em operação na Europa, utilizam de prensas enfardadeiras de alimentação contínua, acarretando em elevados custos de aquisição e manutenção.

De forma a minimizar esses custos, optou-se pela utilização de um prensa similar à hoje utilizada nas unidades de triagem e compostagem no Estado de Minas Gerais.

Será utilizada uma prensa enfardadeira, hidráulica com cilindro vertical com diâmetro de 5" e uma caixa de prensagem capaz de enfardar aproximadamente 400kg de papelão e 150kg de PET. Deverá ter capacidade de prensagem de 1000kg/h, motor de 10HP e uma potência nominal de 25ton.

Esta prensa será utilizada na prensagem do material recuperado no processo de pré-tratamento.

### *7.7 - Separador Férrico*

Será utilizado um separador eletromagnético, do tipo *overband*, para extração e recuperação de materiais ferrosos da linha de pré-tratamento. O funcionamento deste equipamento consiste em uma correia dotada de um potente eletroímã que atrai o material férrico passante na linha e direciona-o a um local específico para segregação.

Este separador será instalado sobre a correia posterior da cabine de triagem de recicláveis. A localização do separador busca otimizar a remoção de ferrosos, tendo em vista que nesta etapa do processo de pré-tratamento grande parte dos impróprios e recicláveis já foram removidos.

O equipamento terá uma potência de 3kW, de operação contínua e uma intensidade de indução magnética na superfície do tambor de 70mT.

### *7.8 - Triturador da FORM*

Será utilizado um triturador rotativo de facas, composto por uma caixa de engrenagens com dois eixos de rotação invertida de baixa velocidade e elevado torque. Deve possuir dois eixos paralelos convergentes que sustentam duas séries de

disco moedores em aço laminado reforçado. Estes discos deverão ser resistentes ao ataque de ácidos e possuir dureza superior a 320HB (Hardness Brinell ou Dureza Brinell).

Este triturador deve possuir um sistema alternância da distância entre os eixos, de forma a propiciar uma cominuição do material em diferentes diâmetros para introdução no reator.

Deverá ser utilizado um motor de 15kW, provido de um motoredutor conectado por junta hidráulica.

Na parte superior do triturador deverá ser instalada uma tremonha de alimentação para a caída do material a ser triturado.

Devido à grade heterogenidade do RSU, bem como a presença de impróprios passantes, este equipamento deverá possuir um plano de manutenção preventiva muito bem definido, bem como um estoque de peças para reposição.

### **7.9 - Correias transportadoras**

Para o transporte do material na linha de pré-tratamento serão utilizadas correias transportadoras suportadas sobre roletes montadas em estrutura metálica.

As lonas devem possuir espessura mínima de 3mm e largura de 1000mm. As esteiras deverão ser lisas, em PVC, resistentes a abrasão e a ácidos orgânicos.

Para o tracionamento e movimentação das esteiras serão utilizados motores elétricos trifásicos conectados a moto-redutores de eixo vazado acoplados a roletes de tração localizados em uma das extremidades da esteira. A potência dos motores varia de acordo com comprimento, inclinação e a carga aplicada.

Os roletes deverão ser fabricados em material termoplástico, dispostos a cada 500mm da extensão da correia, terão formato em "V" de forma a evitar a caída do material ao longo do percurso. Devem ser resistentes a corrosão e possuir um sistema para amortecimento das vibrações da correia.

A velocidade de trabalho deverá ser ajustada *in-loco* em função da quantidade de resíduo passante, sendo a velocidade inversamente proporcional ao volume de resíduo a ser triado, variando em torno de 0,2m/s.

#### **7.9.1 - Correia de alimentação**

Esta correia transportará o resíduo entre a tremonha de alimentação e a correia da cabine de triagem de grandes volumes. Possuirá um comprimento de aproximadamente 8m.

Atualmente são utilizadas nesta etapa correias corrugadas com uma inclinação de 40º tendo custos notadamente superiores às correias planas. Para a utilização de correias planas, esta correia deverá estar inclinada a no máximo 30º do solo, evitando assim o escorregamento do material em ascensão.

Para movimentação desta correia será utilizado um motor de 4HP.

### ***7.9.2 - Correia cabine de triagem de grandes volumes - entrada tromel***

Transportará o material da caída da correia de alimentação através da cabine de triagem de grandes volumes até descarregar o material na entrada do tromel. Possuirá um comprimento de 9m.

A correia deve transpassar a entrada do tromel em aproximadamente 50 cm.

Para movimentação desta correia será utilizado um motor de 4HP.

### ***7.9.3 – Conjunto correias passante tromel – cabine triagem de recicláveis***

Este conjunto de correias transportará o material da caída do tromel através da cabine de triagem de recicláveis. O material, após passagem por esta cabine será lançado no carro de mão basculante para retorno à linha de pré-tratamento ou encaminhamento para destinação final.

Devido ao grande comprimento deste trecho, aproximadamente 18m, optou-se pela utilização de duas correias em seqüência para o transporte do material afim de se obter uma redução no custo de substituição de correias. Serão utilizadas duas correias de 9m cada.

Para o correto direcionamento do material na entrada e saída deste sistema, deverá ser instalada uma tremonha na saída do tromel.

Para movimentação deste conjunto de correias serão utilizados dois motores de 5HP.

### ***7.9.4 – Conjunto correias caída do tromel - cabine triagem de recicláveis***

Este conjunto de correias transportará o material proveniente da caída do tromel através da cabine de triagem de recicláveis até a correia do separador férrico.

Devido ao comprimento deste trecho, necessidade de desvio e elevação do material, este conjunto será composto por 4 correias em seqüência (correia primária, de ascensão, triagem 01 e triagem 02).

A correia primária estará localizada abaixo do tromel de forma a receber o material proveniente da caída do tromel. Possuirá uma extensão de 7m, direcionado este



material à correia de ascensão. Ao longo da extensão do tromel deverá ser instalada uma tremonha para o correto direcionamento do material à correia.

A correia de ascensão possuirá 5m de comprimento e transportará o material da correia primária ao início correia para triagem do material proveniente da caída do tromo. Devido à pequena diferença de cota esta correia possuirá uma leve inclinação.

Para a passagem do material ao longo da cabine de triagem de recicláveis serão utilizadas duas correias em seqüência, sendo a primeira com 6m de extensão e a segunda com 7m. A segunda correia destinará o material à correia do separador férrio.

Para movimentação, as correias primária, de ascensão, triagem 01 e triagem 02 serão utilizados motores de 4HP, 3HP, 4HP e 3HP, respectivamente.

#### **7.9.5 – Correia do separador férrio**

A correia do separador férrio receberá o material proveniente da correia 02 de triagem da caída do tromel, destinando este material à correia reversível.

O separador férrio estará situado a aproximadamente 60cm da superfície desta correia de forma a possibilitar a remoção do material ferroso passante.

Esta correia possuirá uma extensão de 5m e será movimentada por um motor de 3HP.

#### **7.9.6 – Correia reversível triturador - pátio de armazenamento temporário do material < 50mm**

Essa correia receberá o material proveniente da correia do separador férrio direcionando-o ao triturador ou ao pátio de armazenamento de FORM. Para isto deverá ser instalado um reversor de freqüência no motor de movimentação desta correia.

A fim de se evitar paradas no sistema de pré-tratamento, esta correia funciona como um mecanismo de segurança no caso de obstrução ou falhas no sistema de alimentação do digestor. Desta forma, uma vez que seja necessária a parada do sistema de alimentação do reator a correia inverterá o sentido de transporte do material direcionando-o ao pátio de armazenamento de FORM.

Esta correia possuirá 3m de comprimento e necessitará de uma potência de 2HP para o conjunto motor-reversor de freqüência.

De forma a monitorar a quantidade de resíduo alimentado no digestor será instalada uma balança integradora para medição em contínuo do material passante na correia.

A balança integradora é um instrumento de pesagem dinâmico, projetada para pesagem de materiais à granel em transportadores de correia à velocidades elevadas. Estas balanças consistem em três elementos básicos: ponte de pesagem com células de carga, gerador de pulsos e equipamento de controle.

Os sinais da célula de carga indicam o peso do material passante e os sinais do gerador de pulsos indicam a velocidade de deslocamento da correia transportadora. Com estes dados o sistema de controle relaciona o fluxo do material passante em relação ao tempo indicando a quantidade de material transportado.

#### *7.10 – Pátio de armazenamento temporário do material > 50mm.*

Este pátio receberá o material > 50mm (passante do tromel) após triagem na linha de pré-tratamento. Terá capacidade de armazenamento igual à produção diária desta linha, devendo possuir uma área de 50m<sup>2</sup>, considerando uma altura da pilha de 1,2m.

Para o retorno deste resíduo à linha de pré-tratamento, deverá ser posicionado um carro de mão basculante na caída da correia de triagem do material >50mm. Este carro será responsável por coletar este material e reintroduzi-lo na tremonha de alimentação da linha de pré-tratamento. Para este transporte serão utilizados 3 carros de mão basculantes.

O carro de mão basculante é similar a uma empilhadeira pantográfica onde será acoplada uma caçamba para transporte do material com capacidade de transporte de até 500kg e 2,5m<sup>3</sup>.

O pátio de armazenamento temporário estará localizado em área coberta, com piso inclinado e impermeabilizado de forma a permitir a drenagem do lixiviado que será encaminhado a uma caixa de contenção para posterior introdução no digestor secundário.

#### *7.11 – Pátio de armazenamento temporário do material < 50mm.*

Este pátio receberá o material < 50mm (caída do tromel) após triagem na linha de pré-tratamento, em paradas do sistema de alimentação do digestor. Terá capacidade de armazenamento igual à produção diária desta linha, devendo possuir uma área de 20m<sup>2</sup>, considerando uma altura da pilha de 0,6m.

Como não é recomendável o armazenamento deste resíduo por períodos superiores a um dia, devido ao elevado grau de putrefação deste material, o mesmo deverá ser encaminhado o mais rapidamente ao pátio de compostagem. Para isso deverá ser posicionado na caída desta correia um carro de mão basculante, similar ao descrito no item 7.10.

Este pátio de armazenamento temporário estará localizado em área coberta, com piso inclinado e impermeabilizado de forma a permitir a drenagem do lixiviado que será encaminhado a uma caixa de contenção para posterior introdução no digestor secundário.

Cabe salientar que a área do pátio de compostagem deverá permitir um tratamento adicional da produção 45 dias de FORM da linha de pré-tratamento caso ocorra paradas de planta para manutenção da unidade.

## 8 – UNIDADE DE METANIZAÇÃO

A unidade de metanização será constituída por dois digestores, digestor principal e digestor secundário. A seguir são descritos cada um deles.

### *8.1 – Digestor Principal*

#### **8.1.1 – Sistema de Alimentação**

O digestor será alimentado com FORM triturada e lodo re-circulado. O sistema de alimentação será composto por um triturador acoplado a um parafuso de introdução. A alimentação da FORM no reator ocorrerá de forma manual. O lodo extraído do reator será impulsionado através de uma tubulação com auxílio da bomba do sistema de extração.

Tendo em vista que a planta piloto foi projetada para tratar 1,067t/d de FORM e que a alimentação do digestor será realizada em 5 dias semanais (de segunda a sexta-feira) este sistema deverá ser capaz de introduzir 1,5t/d de FORM.

De forma a homogeneizar a FORM com o lodo re-circulado, abaixo do triturador haverá uma tremonha onde ocorrerá este processo.

Será utilizado um triturador rotativo de facas, similar ao descrito no item 7.8, composto por uma caixa de engrenagens com dois eixos de rotação invertida de baixa velocidade e elevado torque. Deve possuir dois eixos paralelos convergentes que sustentam duas séries de disco moedores em aço laminado reforçado. Estes discos deverão ser resistentes ao ataque de ácidos e possuir dureza superior a 320HB

Este triturador deve possuir um sistema alternância da distância entre os eixos, de forma a propiciar uma cominuição do material em diferentes diâmetros para introdução no reator.

O sistema de alimentação será constituído por um sistema de impulsão tipo rosca helicoidal-sem-fim encapsulada e inclinada. Este sistema transportará o material à parte superior do digestor, introduzindo-o na secção inicial do reator entre 1 e 3 bar de pressão. O mecanismo de elevação destinará o material entrante a uma tubulação perpendicular à base do digestor e, devido à pressão exercida pelo parafuso, o material será submergido abaixo do nível de lodo de forma a impedir o contato do interior do digestor com o oxigênio externo. Esse sistema deverá ser construído em aço inoxidável.

O triturador terá uma potência de 10kW e o parafuso de introdução de 4kW.

A parte exterior da tubulação do parafuso de alimentação e a tremonha de mescla serão aquecidas por um sistema de serpentina que circulará água aquecida em água aquecida em painéis solares em um circuito fechado. Como mecanismo complementar será instalado um sistema elétrico (resistências) de aquecimento de água para utilização em horários de pouca/falta de insolação. A tubulação do sistema de serpentina deverá ser em cobre, revestida por material termicamente isolante. Este sistema permitirá a alimentação do material em temperaturas de operação na faixa mesofílica (37 °C) ou termofílica (55 °C).

Deverão ser instalados um sensor de temperatura e um sensor de pressão na secção final da tubulação de introdução para monitoramento das condições de trabalho do material entrante.

Deve ser estudada a possibilidade de aquecimento da água via queima direta do biogás no projeto básico.

Tendo em vista que a unidade piloto será instalada em uma usina de triagem e compostagem em operação no Estado de Minas Gerais, o material para introdução no triturador será parte da FORM oriunda do processo de triagem da usina, não necessitando de nenhum tratamento adicional.

Cabe salientar que o reator não deve ser alimentado com resíduos provenientes de poda e/ou varrição.

### **8.1.2 – Digestor principal**

O conceito do digestor apresentado tem como objetivo a construção de um modelo simples, robusto, de alta atividade metanogênica, baixo custo de implantação/manutenção, objetivando o tratamento da fração orgânica dos resíduos municipais (FORM) via metanização seca.

O digestor foi concebido em forma de um reator horizontal tipo “caixa de sapato” (2m largura, 3,5m altura e 7,35m comprimento), onde os resíduos atravessam sua longitude respeitando o princípio do fluxo seqüencial. O material entrante pressiona o material já presente em um volume igual ao seu até a saída do digestor. Deste modo, teoricamente, cada partícula de resíduo dentro do digestor se beneficia do mesmo tempo de residência.

Para o dimensionamento do reator foram considerados os seguintes parâmetros:

Parâmetros de Projeto	
Tempo de Retenção Hidráulico	25 dias
Taxa de alimentação de FORM	1,067 t/d
Densidade aparente do material de entrada	0,8 t/m <sup>3</sup>
Temperatura de operação	37°C ± 2
Volume útil do reator	2/3 do total

**Tabela 8 – Parâmetros de projeto para dimensionamento do reator**

A quantidade diária de material alimentado e extraído regulará o nível de lodo no interior do digestor, definindo o tempo de retenção hidráulica e a taxa de degradação da matéria orgânica.

Operando com um tempo de retenção hidráulico de 25 dias espera-se obter uma concentração de sólidos totais no lodo digerido da ordem de 20 a 24%. Considerando um teor de sólidos totais na FORM entrante de 30 a 35% e uma mistura com o lodo digerido da ordem de 50%, o material alimentado no digestor possuirá um teor de sólidos de 25 a 29,5%.

Devido às características do material em digestão e dos subprodutos deste processo, o digestor deverá ser construído em concreto armado resistente a sulfatos, atendendo as especificações técnicas da norma NBR/ABNT 5737:1992.

O digestor possuirá uma inclinação longitudinal de 3% visando facilitar o fluxo do material em digestão até a saída do mesmo. Este valor foi adotado baseando-se na inclinação usualmente utilizada em unidades industriais de metanização que operam com modelos de digestores similares.

A agitação do material em digestão será realizada mediante a recirculação do lodo e pela injeção de biogás comprimido na parte inferior ou nas paredes laterais do digestor. O lodo será recirculado utilizando-se do sistema de extração reator. Este material poderá ser introduzido juntamente com a FORM, bem como diretamente ao digestor.

Cabe destacar que por se tratar de um projeto experimental o digestor deverá ser construído de forma a permitir a realização de testes de agitação via injeção de biogás nas laterais e na base do reator, a fim de se estudar a melhor configuração para o sistema de agitação proposto.

Para a agitação por biogás comprimido, parte do gás gerado no processo de digestão será direcionado a um sistema de compressão hidráulica, composto por um cilindro de armazenamento e pressurização do biogás e um sistema de armazenamento e bombeamento de água. A água é bombeada ao cilindro de armazenamento do biogás pressurizando-o até atingir uma pressão de 4 bar. Uma vez comprimido, o biogás será liberado através de um mecanismo de abertura de válvulas e injetado pelos bicos injetores localizados na parte inferior ou ao lado do reator.

Este conjunto deve ser projetado de forma que o tempo pressurização do cilindro seja igual ou inferior a quinze minutos. A capacidade de armazenamento do cilindro de biogás deverá ser calculada de forma a permitir que o fluxo do biogás nos bicos injetores promova um decaimento de 0,5bar a cada segundo, em cada uma das seções.

Para injeção do biogás serão utilizados 6 seções de bicos injetores em aço de inoxidável acoplados a mangueiras de borracha flexível capazes de conduzir biogás comprimido a 8bar de pressão e a uma temperatura de 60°C. A conexão entre os bicos injetores e os bocais deverá ser do tipo engate rápido pneumático em aço inoxidável. Entre os bocais de conexão e o biodigestor deverão ser instaladas válvulas de gaveta que servirão para isolamento dos canais de injeção. Isto se faz necessário nos trabalhos de manutenção periódica bem como no rearranjo do fluxo de gás.

O ângulo de instalação dos bicos injetores deverá propiciar um arraste do material no sentido da saída do digestor. O sistema agitação será subdividido em seis setores de forma a possibilitar o jateamento do gás comprimido em diferentes seções do reator, promovendo um revolvimento do material em diversos pontos, o arraste do material, bem como o desprendimento do biogás das camadas inferiores e o revolvimento das capas superiores do lodo em digestão.

Tendo em vista o sistema de agitação instalado nas paredes do digestor, o fundo do reator deverá ser composto por dois canais paralelos, em formato de meia-cana, a fim de propiciar a formação de um fluxo do biogás similar a um "vortex", buscando otimizar o arraste do material à seção de saída.

Para a captação do biogás, deverão ser instalados dois pontos de coleta, em tubulação em aço inoxidável de 15cm de diâmetro. Este diâmetro se faz necessário para impedir a acumulação de biogás no interior do reator e permitir com que o mesmo opere em pressões próximas a atmosférica. Uma válvula manual do tipo borboleta deverá ser instalada em cada uma dessas tubulações.

A tubulação de captação direcionará o biogás ou ao sistema de compressão ou a um queimador com ignitor automático do tipo "open-flare". Tendo em vista que a produção de biogás esperada é da ordem de 6,5m<sup>3</sup>/h, sugere-se que este queimador possua uma capacidade mínima de 10 m<sup>3</sup>/h.

Para o controle do processo de digestão anaeróbia deverão ser instalados no reator dois sensores de pressão, um de temperatura, dois de nível do material em digestão. Esses sensores, bem como as eletroválvulas deverão estar conectados a um sistema de automação, de forma a permitir ao operador atuar desde a sala de controle, bem como gerar gráficos e históricos para um melhor monitoramento do sistema.

Como sistema de segurança, deverão ser instalados duas válvulas de respiro e dois discos de ruptura para despressurização do digestor em caso de pressões superiores a 3 bar. O disco de ruptura funciona como equipamento adicional de segurança e deverá se romper caso o digestor chegue a uma pressão interna de 3,5bar. Estes valores foram definidos com base em dados operacionais de outras unidades de metanização.

Todas as válvulas, bombas, bem como sistema de instrumentação da área do digestor deverão possuir sistema de proteção anti-faísca.

Para diminuir a perda de calor para a atmosfera o digestor deverá ser isolado termicamente com a instalação de uma camada de lã de vidro recoberta por uma chapa de alumínio ao longo de todas as paredes.

### **8.1.3 – Sistema de Extração**

O sistema de extração será composto por uma bomba de sucção (bomba de vácuo de simples estágio) e uma bomba de impulsão acopladas a uma câmara de vácuo. A bomba de sucção exercerá uma pressão negativa no interior da câmara de vácuo (700mbar  $\pm$  300) que, com o auxílio de um sistema de abertura e fechamento de válvulas pneumáticas, o material será extraído em bateladas seqüenciais.

A bomba de impulsão deverá ser do tipo pallheta indicada para o bombeamento de lodos e sólidos. Direcionará o material da câmara de vácuo ao sistema de desidratação e/ou recirculação.

A extração do material será realizada através de três tubulações de saída, em aço carbono, diâmetro interno de 35mm e parede mínima de 2mm.

Como sistema auxiliar de extração, serão instalados 10 pontos de purga nas laterais do digestor ao longo da sua secção longitudinal. Canaletas internas direcionarão o fluxo do material sedimentado aos pontos de purga, propiciando a remoção deste material. Os pontos de purga estarão conectados ao tanque de vácuo via tubulação com diâmetro interno de 35mm. Este sistema será responsável pela remoção do material sedimentado no interior do reator.

No tanque de vácuo deverão ser instalados um sensor de pressão e um sensor de nível.

O material extraído deverá ser desidratado em um filtro prensa manual, sendo a fração sólida direcionada ao processo de compostagem e a fração líquida encaminhada ao digestor secundário.

Buscando a redução de custos, eliminação da necessidade de utilização do filtro-prensa, bem como do processo de compostagem, sugere-se que seja realizado um estudo de viabilidade técnica-econômica da desidratação do lodo via queima direta do biogás em fornos de secagem. Este processo possibilitaria a estabilização do material digerido em um menor espaço, tendo em vista que a compostagem necessita de 30 a 45 dias para estabilização da matéria orgânica após o processo de digestão anaeróbia. Para a construção deste forno se faz necessária a instalação de um sistema de condensação/tratamento do vapor desprendido, uma vez que compostos voláteis presentes no lodo serão disponibilizados neste vapor (amônia, compostos orgânicos voláteis, etc).



Outra opção para aumento da capacidade energética da planta é a possibilidade de queima dos resíduos de poda.

A avaliação da viabilidade técnica e econômica da desidratação do lodo digerido em forno de secagem e a da queima de resíduos de poda deverá ser realizada quando da elaboração do projeto básico.

## *8.2 – Digestor Secundário da unidade piloto*

O digestor secundário tem como objetivo o pós-tratamento do líquido gerado no processo de desidratação do material digerido. O sistema de pós-tratamento é constituído por um tanque de equalização, sistema de bombeamento para introdução, recirculação e extração do lixiviado, digestor e sistema de captação de biogás.

Espera-se uma remoção da DQO do lixiviado na ordem de 60 a 70% da concentração entrante. Estes valores foram estimados com base em reator em escala laboratorial operado pelo coordenador deste projeto.

Considerando uma geração de lixiviado da ordem de 30% do material entrante no digestor principal, o volume diário de efluentes a ser tratado é de aproximadamente  $0,33\text{m}^3$ .

Para o processo de tratamento deste lixiviado será utilizado um reator cilíndrico, do tipo mistura completa, com sistema de agitação por bombas centrífugas.

Considerando um tempo de retenção hidráulica de 5 dias será necessário um volume útil de digestão de  $1,65\text{m}^3$ , e  $2,5\text{m}^3$  totais. As dimensões deste reator serão de 1,3 de diâmetro por 2,2m de altura.

O lixiviado resultante do processo de desidratação do lodo do digestor principal será encaminhado ao tanque de equalização para posterior alimentação do digestor secundário. Este tanque terá uma capacidade de armazenamento igual ao lixiviado gerado em três dias de operação da planta ( $1\text{m}^3$ ).

A alimentação do digestor secundário será efetuado utilizando-se de uma bomba do tipo helicoidal. A tubulação de alimentação deverá possuir um sistema de aquecimento através serpentinas externas similares ao utilizado no digestor principal.

Esta mesma bomba realizará a extração/recirculação do líquido em digestão. Para isso, um sistema de abertura e fechamento de válvulas permitirá ao operador realizar as operações de introdução, extração ou recirculação do material. Deverão ser instalados ao redor do reator dois pontos de sucção e introdução de lodo, de forma garantir a correta homogeneização do material, bem como evitar a formação

de possíveis “zonas mortas” no interior do reator. A tubulação, bem como todas as conexões e válvulas deverão ser de PVC e possuir um diâmetro de uma polegada.

O reator deverá ser construído em concreto armado resistente a sulfatos conforme a norma NBR/ABNT 5737:1992 e incorporar equipamentos de segurança e monitoramento: um sensor de temperatura, um sensor de pressão, um sensor de nível e um analisador de pH.

O biogás será coletado pela parte superior do digestor através de uma tubulação de 50mm de diâmetro em aço inoxidável e direcionado à tubulação de captação do biogás do digestor principal.

Deverá ser instalado uma válvula de respiro e um disco de ruptura de forma a garantir a segurança do sistema.

Deverá ser construído um depósito para armazenar o lodo digerido com a capacidade de 1m<sup>3</sup>.

Uma vez digerido, o lixiviado deverá ser analisado para verificação da possibilidade de utilização como biofertilizante.

Caso se opte pela construção do forno para secagem do material digerido, a construção deste reator pode ser dispensada.

Para diminuir a perda de calor para a atmosfera o digestor deverá ser isolado termicamente com a instalação de uma camada de lã de vidro recoberta por uma chapa de alumínio na sua parede lateral.

## 9 – GASÔMETRO

Este equipamento é utilizado para acumular e regular a pressão do biogás requerida pelo sistema de aproveitamento energético, sendo que este equipamento possui diversos fornecedores no mercado.

O gasômetro é constituído por: membrana exterior, membrana interior, membrana de base, anéis de ancoragem, ventilador de ar, captação de gás/condensados, válvulas de segurança, válvula anti-retorno, válvula reguladora da pressão interna, sensor de nível, janela de inspeção, mangueira de ar.

O gasômetro foi projetado de forma a garantir o fluxo do biogás com uma pressão constante aos sistemas de tratamento e utilização. Foi projetado um sistema de três membranas (interior, exterior e de base). O biogás será direcionado para a área entre a membrana interior e a de base. A pressão do biogás será regulada através do fluxo de ar injetado entre as membranas interior e exterior. Desta forma, o biogás armazenado será direcionado aos sistemas de tratamento/utilização com uma pressão consignada sempre constante, independente da taxa de produção instantânea.

Os anéis de ancoragem tem como função garantir a estanqueidade do sistema, sendo construído em um sistema do tipo selo hidráulico. O ventilador de ar tem a função de regular a pressão requerida no sistema devendo ser dimensionado de acordo com as especificações do equipamento de aproveitamento energético (motor de co-geração, caldeira, etc). A captação de biogás é realizada pela parte inferior do gasômetro e deve possuir um sistema de desumidificação com captação do condensado. A válvula de segurança tem como objetivo despressurizar o sistema em caso de sobrepressões devendo ser dimensionada de acordo com a pressão de trabalho do gasômetro. A válvula anti-retorno deverá ser instalada na saída do ventilador de ar de forma a impedir o retorno de ar ao ventilador. Isto se faz necessário de forma a garantir a segurança do sistema no caso de vazamento do biogás. A válvula reguladora de pressão interna deverá ser instalada no sistema de captação de biogás variando o fluxo em função da utilização instantânea do biogás. O sensor de nível se faz necessário para regular a vazão de entrada e saída de biogás. A janela de inspeção é utilizada para verificação das condições da membrana interna. A mangueira de ar tem por finalidade permitir o fluxo de ar entre o ventilador e a área compreendida entre as membranas internas e externas.

As membranas deverão ser em poliéster termo-soldado, resistente a sulfatos, possuir proteção contra raio UV e ataque químico dos constituintes do biogás, bem como baixo grau de inflamabilidade.

Devido ao não aproveitamento energético do biogás na planta piloto não se faz necessário a construção do mesmo. Cabe salientar que plantas construídas recentemente com unidade de aproveitamento do biogás via geração de energia

elétrica em motores de co-geração estão optando pela não utilização de gasômetros, uma vez que a capacidade armazenamento de biogás no gasômetro é da ordem de apenas 1 a 3 horas de produção e a pressão de trabalho requerida pode ser regulada mediante o consumo do biogás.

## 10 - PLANTA BAIXA

Foram elaborados dois *lay-outs* sendo um da planta piloto e outro da unidade industrial.

O *lay-out* apresentado requer uma área para a planta 408m<sup>2</sup> e 6700m<sup>2</sup> para a unidade industrial.

O *lay-out* destas unidades foi projetado de forma a otimizar a circulação dos materiais e dos trabalhadores e do maquinário envolvido no processo. As salas de controle da metanização, pré-tratamento e compostagem foram dispostas de forma estarem em um nível superior garantindo uma boa visibilidade de todo o processo.

O escritório central bem como as salas de controle foram projetadas em locais estratégicos de forma a obter uma agilidade na mobilidade em diferentes etapas do processo.

Caso a planta seja construída próxima a locais urbanizados deve ser projetado um sistema para coleta e tratamento do ar ambiente. Desta forma, a unidade de metanização deverá ser instalada preferencialmente longe de centros urbanos para evitar problemas com maus odores bem como a necessidade de construção de um sistema de desodorização.

## 11 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO

Na unidade piloto, a FORM selecionada será misturada na proporção de 1:1 com o lodo re-circulado para introdução no digestor. Deverá ser aportado calor na etapa de introdução do material. O biogás será captado, sendo que parte deste será utilizado para a agitação do material.

Cabe salientar que o biogás utilizado no processo de agitação não será consumido, uma vez que o sistema de agitação é em circuito fechado. Porém perdas no processos de manutenção e escapes podem ocorrer ocasionalmente

O biogás produzido passará por um processo controlado de combustão antes do seu lançamento na atmosfera.

O lodo digerido será desidratado sendo a fração sólida encaminhado ao processo de compostagem existente no local e o líquido encaminhado a um tanque de equalização para posterior encaminhamento para o digestor secundário.

Para a operação da unidade piloto foi estabelecido um quadro mínimo de funcionários, conforme pode ser observado na Tabela 9. O regime de trabalho será de 8 horas/dia, com exceção dos operadores de planta que possuirão uma jornada de trabalho de 12/24 (12 horas de trabalho / 24 horas de descanso).

Cargo	Função	Quantidade	Regime de trabalho	Turnos de trabalho
Engenheiro	Responsável pela unidade piloto, coordenando todas as atividades relacionadas a operação e manutenção da unidade	1	8 horas/dia	1
Técnico elétrico e mecânico	Responsável pela manutenção preventiva e corretiva de todos os equipamentos e instrumentos da unidade piloto	1	8 horas/dia	1
Supervisor de operação	Responsável pela execução das atividades operacionais da unidade piloto	1	8 horas/dia	1
Operador de planta	Execução das atividades operacionais da unidade piloto	4	12 horas de trabalho e 24 horas de descanso	2
Técnico em controle e automação	Responsável pelos ajustes no sistema de automação e controle nos 5 primeiros meses de operação da unidade piloto	1	8 horas/dia	1

**Tabela 9 – Quadro mínimo de funcionários da unidade piloto**

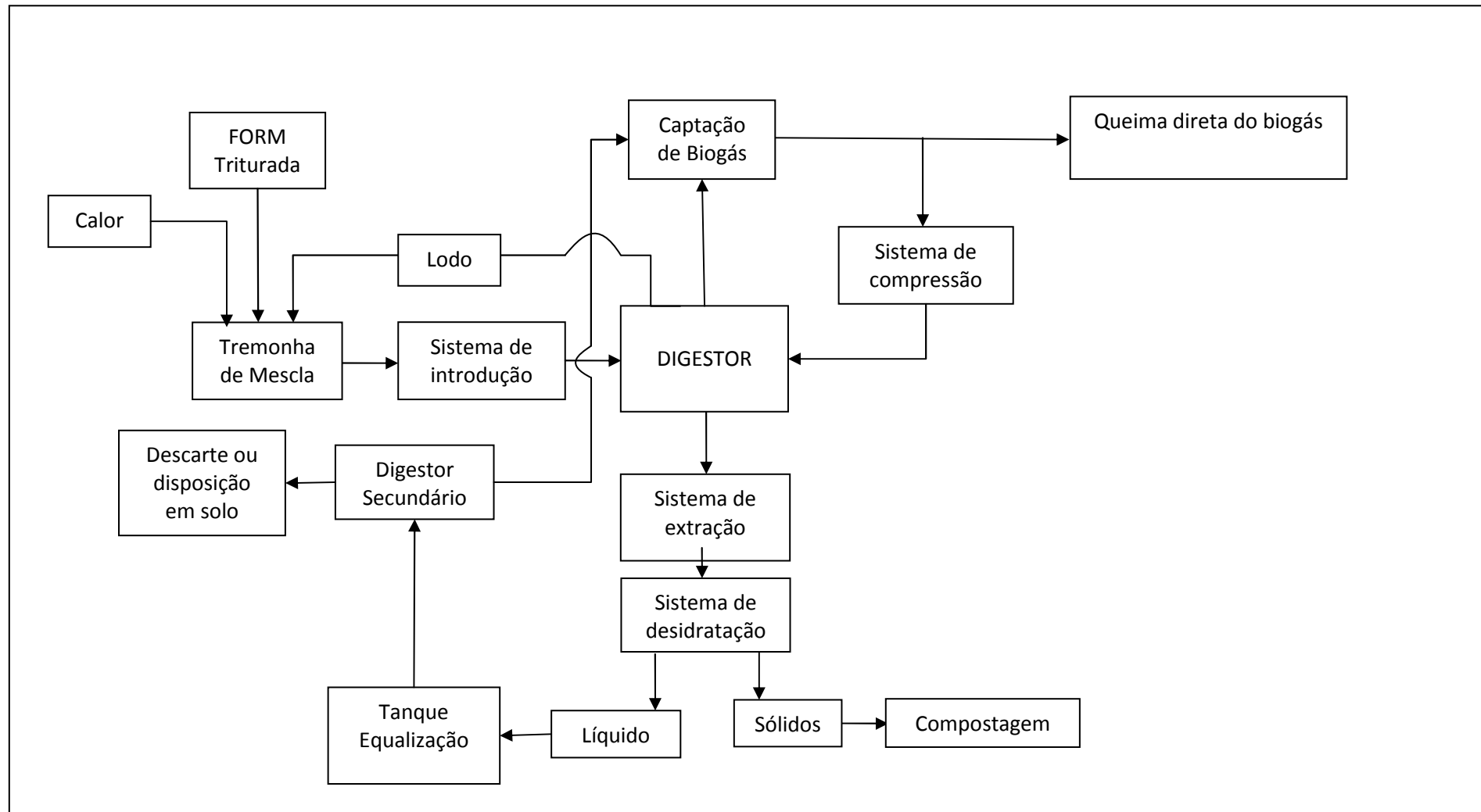


Figura 10 - Diagrama da linha de metanização da unidade piloto

## 12 – TESTES OPERACIONAIS DA UNIDADE PILOTO

### 12.1 - Testes Laboratoriais

Os testes para determinação do teor de sólidos foram definidos de acordo com a metodologia definida pelo Standard Methods, enquanto que os testes de Relação AI/AP foram definidos conforme estabelecido em Jenkins et al, 1983.

#### 12.1.1 – Determinação do teor de Sólidos Totais (ST)

Realizado para determinar a quantidade de matéria orgânica e inorgânica bem como a umidade do sistema. O teste se resume em:

1 - Pesar na balança analítica cada um dos cadinhos e anotar sobre os mesmos e na tabela os respectivos pesos.

**P0: Peso dos Cadinhos (g)**

2 - Colocar uma quantidade de cada amostra do material nos cadinhos, pesá-los e anotar o resultado na tabela abaixo.

**P1: Peso dos Cadinhos + Amostra (g).**

3 - Levantar os cadinhos com a amostra para a Estufa e deixá-los lá por 48 horas a temperatura de 105°C.

4 - Retirar os cadinhos da estufa e diretamente levá-los para a dessecadora para retirar a umidade e resfriar. Deixá-los na dessecadora por pelo menos 30 minutos.

5 - Retirar da dessecadora, pesá-los e anotar na tabela.

**P2: Peso Cadinhos + Amostra após 48h Estufa 105°C**

6 - Determinar a quantidade de Sólidos Totais pela equação abaixo, e anotar na tabela.

O cálculo do teor de ST é realizado pela equação 1.

$$ST = \left[ 1 - \frac{(P1 - P2)}{P1 - P0} \right] \times 100 \%$$

Equação 1 – Determinação do teor de sólidos totais (Standard Methods, 1995)



### **12.1.2 – Determinação do teor de Sólidos Voláteis(SV) e Sólidos Fixos(SF)**

Mensura a quantidade de material volátil e sólidos fixos (cinzas) do sistema. Para sua realização, as etapas de 1 a 6 do item 12.4.1 devem ser realizadas. Após pesar os cadinhos retirados da dessecadora, devem ser realizadas os seguintes passos:

1. Levar os cadinhos com a amostra para a Mufla a temperatura ambiente. Elevar a temperatura da mufla para 200°C por 30 minutos. Elevar a temperatura da mufla para 550°C e manter os cadinhos lá por 2 horas.
2. Retirar os cadinhos da mufla e resfriá-los por 1 minuto, depois levá-los para a Dessecadora para retirar a umidade e resfriar completamente. Deixá-los na dessecadora por pelo menos 30 minutos.
3. Retirar da dessecadora, pesá-los e anotar na tabela.

#### **P3: Peso Cadinhos + Amostra após 2 horas Mufla 550°C**

4. Determinar a quantidade de Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos pelas equações abaixo, e anotar na tabela.

O cálculo do teor de SF é realizado pela equação 2.

$$SF = \left[1 - \frac{(P1 - P3)}{P1 - P0}\right] \times 100 \%$$

**Equação 2 – Determinação do teor de sólidos fixos (Standard Methods, 1995)**

O cálculo do teor de SV é realizado pela equação 3.

$$SV = ST - SF$$

**Equação 3 – Determinação do teor de sólidos voláteis (Standard Methods, 1995)**

### **12.1.3 – Determinação das alcalinidades**

A determinação das alcalinidades é realizada para determinar e relacionar a concentração de ácidos orgânicos presentes no meio e a capacidade tampão do sistema.

Uma amostra de 150 mL de lodo digerido deve ser centrifugada por 35 minutos a uma velocidade de 13.500 rpm. Desta amostra extrai-se 30 mL do material sobrenadante, transferido-o a um becker.

O pH do sobrenadante deve ser medido e posteriormente inicia-se processo de titulação.

A titulação consiste na adição de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a uma concentração de 0,6N na amostra. O volume de ácido empregado para baixar o pH da amostra a 5,75 e 4,3 deve ser determinado. A titulação deve ser realizada com o auxílio de um agitador magnético para mistura constante do meio.

De posse dos volumes utilizados de ácido calcula-se as alcalinidades total (AT), parcial (AP) e intermediária (AI) do meio.

**Alcalinidade total (AT):** alcalinidade obtida no intervalo desde o pH inicial até a tituação ao pH 4,3.

**Alcalinidade parcial (AP):** alcalinidade obtida no intervalo desde o pH inicial até a tituação ao pH 5,75.

**Alcalinidade intermediária (AI):** alcanilindade obtida no intervalo desde o pH 5,75 até o pH 4,30.

Para o cálculo das alcalinidades é utilizada a seguinte equação:

$$\text{Alcalinidade (mg CaCO}_3 \text{ / L)} = \frac{V_{\text{ÁCID}} \cdot N_{\text{ÁCID}} \cdot PM_{\text{CaCO}_3} \cdot 1000}{V_{\text{MOSTRA}} \cdot N_{\text{EQUIV}}}$$

**Equação 4 – Determinação da alcalinidade (Jenkins et al, 1983)**

onde:

$V_{\text{ÁCID}}$  = Volum de ácido empregado em cada caso (mL)

$N_{\text{ÁCID}}$  = Normalidade da solução  $H_2SO_4$  (no caso, 0,6)

$PM \text{ CaCO}_3$  = Peso molecular do  $CaCO_3$ , 100 g/mol

$V_{\text{MOSTRA}}$  = Volume da amostra utilizada na titulação (mL)

$N_{\text{EQUIV}}$  = Número de equivalentes do ácido sulfúrico

Para a determinação da relação AI/AP (concentração de ácidos orgânicos por capacidade tampão do sistema) é utilizada a seguinte equação:

$$\text{Relação AI/AP} = \frac{V_{4,3} - V_{5,75}}{V_{5,75}}$$

**Equação 5 – Determinação da relação AI/AP (Jenkins et al, 1983)**

onde:

$V_{4,3}$  = Volume de ácido empregado desde o pH 5,75 até o pH 4,3 (mL)

$V_{5,75}$  = Volume de ácido empregado até o pH 5,75 (mL)

## *12.2 – Posta em marcha dos digestores*

### **12.2.1 - Testes preliminares**

Constituem-se em testes de verificação do funcionamento de toda a planta piloto, incluindo os sensores de instrumentação, sistema de automação e equipamentos da unidade. Serão realizados em seco, sem material presente no meio.

Testes de estanqueidade deverão ser realizados no digestor principal e secundário para verificação de possíveis fugas. Para tanto deverá ser introduzida água nos reatores até o completo preenchimento.

Para a introdução de água nos reatores e obtenção da pressão requerida para este teste, deverão ser instalados tubos verticais com um metro de comprimento em um dos pontos de coleta do biogás em cada um dos reatores. Os demais pontos de coleta de biogás deverão ser isolados. Uma vez verificada a estanqueidade, os reatores deverão ser esvaziados.

O compressor deverá ser testado utilizando-se de ar ambiente a fim de verificar se o mesmo atende às condições especificadas no projeto básico.

O sistema de automação deverá ser testado de forma a comprovar a efetividade da lógica do mesmo. Os valores de leitura dos sensores deverão ser alterados manualmente com o intuito de se verificar se as respostas do sistema correspondem às estipuladas, avaliando-se todas as regras de funcionamento definidas para o sistema. Deverão ser ainda verificados o acionamento de todas as bombas e válvulas a partir da interface de comando.

No sistema de extração deverá ser testada a eficiência da bomba de vácuo; o acionamento das válvulas e a estanqueidade do tanque de extração.

### **12.2.2. – Posta em marcha do digestor principal**

Uma vez verificado o correto funcionamento da unidade, deverá ser iniciado o processo de introdução do material no digestor. Para isso será utilizado composto orgânico disponível na unidade de compostagem misturado a lodo de digestor anaeróbio de estação de tratamento de efluentes líquidos. Os materiais deverão ser pesados com auxílio de uma balança eletromecânica de plataforma para posterior mistura para obtenção de uma concentração final de matéria seca da ordem de 30%. Este material será misturado manualmente com o auxílio de uma betoneira (misturador de concreto). A mistura resultante deverá ser introduzida pelo sistema de alimentação no digestor em temperatura mesofílica. Caso não haja

disponibilidade de lodo de digestores anaeróbios na região, a adequação do teor de matéria seca no material de alimentação deverá ser realizada via adição de efluente líquido orgânico ou água.

O material introduzido deverá ser recirculado para verificação do funcionamento do sistema de extração durante o processo de enchimento do digestor bem como auxiliar na mistura do lodo em digestão.

Toda a instrumentação e equipamentos do digestor deverão ser novamente testados nesta etapa. Os sensores de pressão e temperatura deverão ser calibrados pelos fornecedores dos mesmos.

Uma vez atingido o volume útil do reator, inicia-se o processo de introdução da FORM a uma razão de 10% sobre a carga orgânica total adotada em projeto. A relação entre ácidos orgânicos e a capacidade tampão do sistema (Relação AI/AP) deverá ser analisada para determinação da viabilidade de incrementos da taxa de alimentação.

De acordo com estudos realizados pelo coordenador do projeto, em escala laboratorial e em escala industrial, o valor máximo recomendável da relação AI/AP para incremento de carga é de 0,3.

Espera-se realizar aumentos de carga semanais adotando-se incrementos de 25% sobre a carga anteriormente aplicada. A tabela 10 apresenta os valores previstos de carga orgânica aplicada no processo de posta em marcha.

Semana	Carga orgânica aplicada (kg/dia de FORM)
1	145
2	181
3	227
4	283
5	354
6	443
7	553
8	691
9	864
10	1080
11	1350
12	1494

**Tabela 10 – Taxa de alimentação no processo de posta em marcha**

Diariamente deverão ser determinados os teores de ST, SV e SF no material de entrada e os teores de ST, SV, SF, pH e relação AI/AP no lodo digerido. A produção de biogás e metano deverá ser correlacionada com as análises de sólidos para cálculo de rendimento do processo.

A posta em marcha só será considerada finalizada uma semana após a operação estável do digestor (relação AI/AP  $\leq$  0,35) e rendimento na produção de biogás superior a 100 Nm<sup>3</sup>/T de FORM alimentada no reator.

Caso verifique-se a desestabilizações do processo de digestão (AI/AP > 0,35 e produção de biogás < 100 Nm<sup>3</sup>/t de FORM alimentada), deve-se reduzir a carga orgânica aplicada em 20%.

### **12.2.3 - Posta em marcha do digestor secundário**

A posta em marcha do digestor secundário só será realizada quando for detectado presença de atividade metanogênica no lodo do digestor primário (CH<sub>4</sub> > 30% no biogás produzido). O digestor será alimentado com o líquido proveniente do sistema de desidratação sendo necessário as seguintes análises para a verificação da estabilidade do processo:

Análise	Periodicidade
pH, AI/AP, ST, SV, SF	diária
DQO, Amônia	3 x semana

**Tabela 11 – Periodicidade de análises**

O rendimento do reator será verificado com dados da produção de biogás, da degradação dos sólidos voláteis introduzidos e monitoramento do processo biológico. Serão analisados os seguintes fatores: o rendimento do reator (m<sup>3</sup> biogás / kg de SV e ST degradado), a carga orgânica aplicada (kg de SV / m<sup>3</sup> digestor.d), a taxa de degradação da matéria orgânica (redução no % de ST e SV) e o rendimento da produção de biogás (Nm<sup>3</sup> biogás / kg de SV e de ST introduzido).

O fato do material de entrada possuir elevada atividade metanogênica propicia uma maior estabilidade no sistema. Desta maneira a posta em marcha será iniciada com 50% da carga orgânica de projeto. A relação AI/AP deverá ser analisada para determinação da viabilidade de incrementos de carga no sistema. Espera-se realizar aumentos de carga a cada 3 dias adotando-se incrementos de 20% sobre a carga anteriormente aplicada.

Na fase de posta em marcha se faz necessário a determinação da DQO para correlacionar os valores com o teor de SV, tornando mais simples e menos dispendiosas as análises de rotina durante a operação do sistema.

De acordo com estudos relacionados pelo coordenador do projeto definiu-se como satisfatórios valores da relação AI/AP < 0,20 e rendimento na produção de biogás superior a 20 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> alimentado no reator. Em casos de desestabilizações (AI/AP > 0,20 e produção de biogás < 20 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> alimentado no reator), deve-se reduzir a carga orgânica aplicada em 20%.

A análise do teor de SF permitirá determinar a quantidade de impróprios sedimentáveis no material de entrada e saída do reator secundário.

### *12.3 – Testes operacionais dos digestores*

#### **12.3.1 - Operação do digestor principal em temperatura mesofílica**

Uma vez atingida a carga orgânica de trabalho (1,494 t/d), o digestor deverá ser mantido em temperatura mesofílica por um período de 3 tempos de residência hidráulicos. Deverá ser realizada uma recirculação do material em digestão a uma taxa de 3 T/dia e a agitação realizada pela parte inferior do reator.

Diariamente deverão ser determinados os teores de ST, SV e SF no material de entrada e os teores de ST, SV, SF, pH e relação AI/AP no lodo digerido. A taxa de eliminação de inertes será avaliada pela comparação do teor de sólidos fixos no material de entrada e de saída do digestor.

Para a comprovação da estabilidade do sistema biológico deverão ser analisados:

- Produção de biogás por tonelada de resíduo alimentado;
- Produção de biogás por kg de SV e ST alimentado;
- Produção de biogás por kg de SV e ST digerido;
- Rendimento da produção de biogás por unidade de volume do digestor ( $\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3$  digestor.d);
- Taxa de degradação da matéria orgânica (eliminação de ST e SV);
- Concentração de ácidos graxos voláteis;
- Capacidade tampão do sistema;

Após três tempos de residência de operação em condições estáveis, o sistema de agitação passará ser realizado pelas laterais do digestor por mais três tempos de residência. Os rendimentos dos dois testes deverão ser comparados para definição da forma mais eficiente de produção de biogás e eliminação de inertes.

Após definida a forma mais eficiente de agitação, esta deverá ser utilizada no teste para determinação da carga orgânica máxima a ser aplicada no reator.

Para a determinação da carga orgânica máxima a ser aplicada deverão ser realizados incrementos subseqüentes de 25% na carga atual de trabalho. Os incrementos de carga só poderão ocorrer uma vez que se verifique a estabilidade do processo biológico analisando-se os fatores listados anteriormente. A carga orgânica máxima deverá possuir uma relação AI/AP  $\leq 0,4$  e rendimento na produção de biogás superior a  $100 \text{ Nm}^3/\text{t}$  de FORM alimentada.

### **12.3.2 - Operação do digestor principal em temperatura termofílicos**

Verificada a carga máxima aplicada em temperatura mesofílica, o reator passará a ser operado em condições termofílicas. Neste processo a carga orgânica aplicada deverá ser reduzida em 50% e a temperatura do material de introdução elevada para 55 - 65°C.

Após a verificação da estabilidade biológica do sistema conforme descrito no item 12.3.1 a carga orgânica deverá sofrer incrementos subseqüentes de 25% até a definição da carga máxima aplicada. Os incrementos na carga orgânica só poderão ser realizados após a verificação da estabilidade biológica com a nova aplicada.

Diariamente deverão ser determinados os teores de ST, SV e SF no material de entrada e os teores de ST, SV, SF, pH e relação AI/AP no lodo digerido. A taxa de eliminação de inertes será avaliada pela comparação do teor de sólidos fixos no material de entrada e de saída do digestor.

Com este teste pretende-se realizar um estudo comparativo entre a operação em temperatura mesofílica e termofílica. Estes estudos consistem basicamente na realização das seguintes comparações:

- Requerimentos energéticos para atingir a temperatura de operação;
- Produção de biogás por tonelada de resíduo alimentado;
- Produção de biogás por kg de SV e ST alimentado;
- Produção de biogás por kg de SV e ST digerido;
- Rendimento da produção de biogás por unidade de volume do digestor ( $\text{m}^3$  biogás/ $\text{m}^3$  digestor.d);
- Taxa de degradação da matéria orgânica (eliminação de ST e SV).

### **12.3.3 - Testes de eliminação de inertes do digestor principal**

Uma vez analisada a melhor temperatura de operação do digestor anaeróbio, deverão ser realizados testes para verificação de eficiência na remoção de inertes. Para tanto o material de entrada deverá ser ajustado para que o mesmo possua uma concentração de materiais sedimentáveis da ordem de 30%. Este ajuste poderá ser realizado com a adição areias e vidros triturados.

A cada 3 dias de operação deverá ser extraído e analisado lodo dos diferentes pontos de purga, para verificação da taxa de extração de material sedimentável do sistema.

Os mesmos testes de rendimento descritos no item 12.3.1 deverão ser também realizados.

Diariamente deverão ser determinados os teores de ST, SV e SF no material de entrada e os teores de ST, SV, SF, pH e relação AI/AP no lodo digerido. A taxa de

eliminação de inertes será avaliada pela comparação do teor de sólidos fixos no material de entrada e de saída do digestor.

Uma vez verificada a eficiência em termos de remoção de inertes o digestor deverá ser esvaziado pelo sistema de extração. Caso não seja verificado a efetividade deste sistema o digestor deverá ser esvaziado pelos pontos de purga para definição das principais zonas de acumulação.

#### **12.3.4 – Operação do digestor secundário**

O digestor será operado na mesma faixa de temperatura do digestor principal, sendo necessárias as seguintes análises para a verificação da estabilidade biológica do sistema:

Análise	Periodicidade
pH, AI/AP, ST, SV, SF	diária
DQO, Amônia	3 x semana

**Tabela 12 – Periodicidade de análises**

Para a avaliação da eficiência de remoção de carga orgânica deverão ser comparadas as concentrações de DQO no material de entrada e de saída.

O rendimento do reator será verificado com dados da produção de biogás, da degradação dos sólidos voláteis introduzidos e monitoramento do processo biológico. Serão analisados os seguintes fatores: o rendimento do reator ( $m^3$  biogás / kg de SV e ST degradado), a carga orgânica aplicada (kg de SV /  $m^3$  digestor.d), a taxa de degradação da matéria orgânica (redução no % de ST e SV) e o rendimento da produção de biogás ( $Nm^3$  biogás / kg de SV e de ST introduzido).

De acordo com estudos relacionados pelo coordenador do projeto definiu-se como satisfatórios valores da relação AI/AP < 0,20 e rendimento na produção de biogás superior a  $20 Nm^3/m^3$  alimentado no reator. Em casos de desestabilizações (AI/AP > 0,20 e produção de biogás <  $20 Nm^3/m^3$  alimentado no reator), deve-se reduzir a carga orgânica aplicada em 20%.



## 13 – BALANÇO DE MASSA

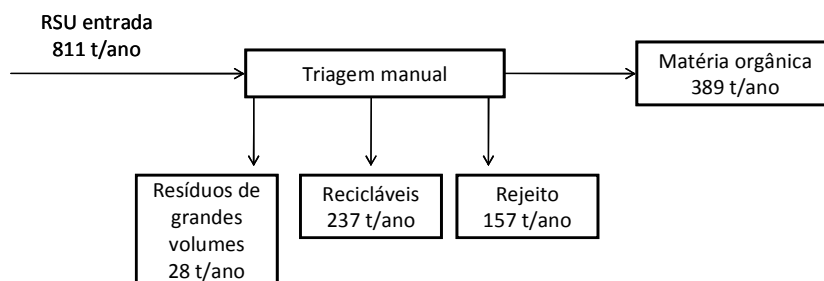
O balanço de massa contempla a operação da unidade piloto com capacidade de tratamento diário de 1,067 t/d de FORM.

Para o cálculo do balanço de massas, foram considerados os seguintes parâmetros de projeto:

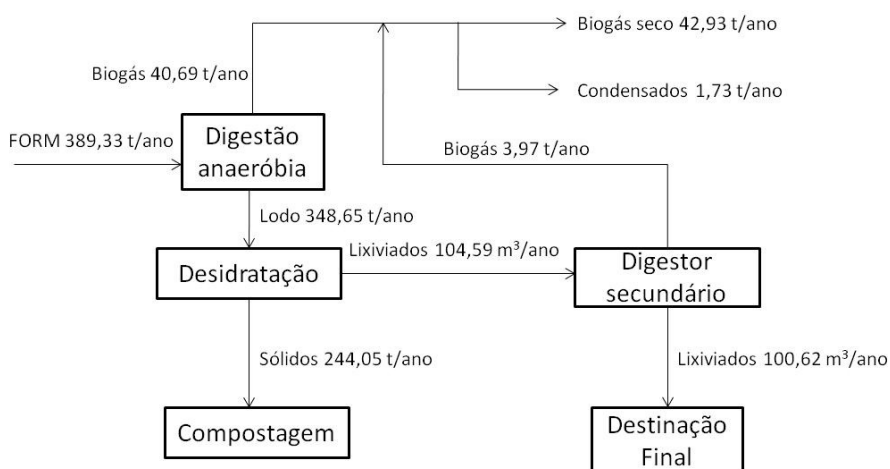
Parâmetro	Valor considerado
RSU a ser tratado	811 t/ano
% Matéria Orgânica	60%
Taxa de recuperação de recicláveis	80%
Taxa de recuperação de matéria orgânica	80%
Taxa de geração de biogás no reator principal	110 Nm <sup>3</sup> /t FORM
Taxa de geração de biogás no reator secundário*	40 Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> lixiviado
% de CH <sub>4</sub> no Biogás	60%
Produção de condensado**	38,8 kg/t biogás
Densidade do biogás***	0,95 kg/m <sup>3</sup>
Taxa de produção de lixiviado na desidratação**	0,3 m <sup>3</sup> /t de lodo

**Tabela 13 – Parâmetros para cálculo de balanços de massa**  
Fonte: \* Proposta quali / \*\*Resa, 2001/ \*\*\* Magalhães,2004

As Figuras 11 e 12 resumem o balanço de massa do processo da unidade piloto.



**Figura 11 - Balanço de massa do sistema de pré-tratamento**



**Figura 12 - Balanço de massa do sistema de metanização**

A FORM processada gerará entre 110 a 150 Nm<sup>3</sup> de biogás por dia com uma riqueza de 55-65% de CH<sub>4</sub> e uma concentração entre 1.000-4.000 ppm de H<sub>2</sub>S (International, 2005).

A carga orgânica aplicada regula a concentração de matéria seca no lodo digerido uma vez que interfere na taxa de degradação da matéria orgânica. Desta forma, variações no tempo de retenção hidráulico permitem um ajuste da matéria seca de saída (lodo digerido). Segundo dados operacionais da unidade Ecoparc 2 espera-se uma concentração de matéria seca da ordem 20 a 24% no lodo digerido e um teor de sólidos totais da ordem de 30 a 35% do material entrante. Este valor é considerado por operadores de planta como o ideal para minimizar sedimentações de materiais no interior reator, devendo ser obtido a partir de variações nas taxas de alimentação e extração do reator.

Após passar pelo processo de desidratação o lodo digerido gerará aproximadamente 0,3m<sup>3</sup> de lixiviado por dia com uma DQO de 50g/L, uma concentração de amônia da ordem de 3-6g/L e 0,65t de sólidos com teor de matéria seca da ordem de 40 a 50% (Hobson, 1981).

A fração sólida do processo de desidratação poderá ser encaminhada a um processo de compostagem seguido de um sistema de remoção de impróprios (peneiramento). Após passagem neste sistema, espera-se obter entre 0,45 e 0,55t de composto orgânico por tonelada de lodo extraído.

## 14 – BALANÇO DE ENERGIA

O balanço de energia foi realizado considerando todos os equipamentos necessários para a construção da planta piloto. Esses valores podem sofrer alguma modificação uma vez que os equipamentos a serem empregados variam de potência entre distintos fornecedores.

Equipamentos	Quantidade	Potência (hp)	Potência (kW)	Horas de trabalho dia	Consumo energético (kWh.ano)
<b>Sistema de introdução</b>					
Triturador de facas (1)	1	10	7,457	3	8165,4
Betoneira para concreto de 400L (12)	1	2	1,512	4	2207,6
Balança de plataforma eletromecânica até 1000kg (14)	1		0,005	4	7,3
Sistema de alimentação em aço inox com rosca helicoidal encamisada (13)	1		5	2	3650,0
Sistema de aquecimento do resíduo de introdução	1		0,005	12	21,9
Sensor de temperatura (2)	1		0,0001	24	0,9
Sensor de pressão (2)	1		0,0001	24	0,9
<b>Sistema de agitação</b>					
Sistema de compressão do biogás(3)	1		4	24	35040,0
Sensor de pressão (2)	2		0,0001	24	0,9
Eletroválvulas (4)	8		0,0001	24	0,9
<b>Sistema de extração</b>					
Eletroválvulas (4)	2		0,0001	24	0,9
Bomba de vácuo (5)	1	2	1,4914	4	2177,4
Bomba de impulsão (6)	1		4	4	5840,0
Sensor de temperatura (2)	1		0,0001	24	0,9
Sensor de pressão (2)	1		0,0001	24	0,9
<b>Digestor principal</b>					
Sensor de pressão (2)	3		0,0001	24	0,9
Sensor de nível (2)	2		0,0001	24	0,9
Medidor de metano (7)	1		0,0004	24	3,5
Medidor de vazão (2)	1		0,0001	24	0,9
Queimador (8)	1		0,0020	24	17,5
<b>Digestor secundário</b>					
Bomba alimentação/extração (6)	1		3	2	2190,0
Sensor de pressão (2)	1		0,0001	24	0,9
Sensor de temperatura (2)	1		0,0001	24	0,9
Phmetro (2)	1		0,0001	24	0,9
Sensor de nível (2)	1		0,0001	24	0,9
Sensor de temperatura (2)	1		0,0001	24	0,9
<b>Sistema de ar comprimido</b>					
Compressor de ar	1	3	2,2371	12	9798,5
<b>Sistema de automação</b>					
Computador	2		0,0005	24	4,4
PLC (11)	1		0,08	24	700,8
<b>Laboratório</b>					
Centrifuga (9)	1		0,8	1	292,0
Phmetro (9)	1		0,02	1	7,3
Estufa (9)	1		0,5	24	4380,0
Mufla (9)	1		0,7	4	1022,0
Exaustor (9)	1		0,4	4	584,0
Balança (9)	1		0,01	1	3,7
Iluminação da planta	1		0,5	24	4380,0
<b>TOTAL</b>			<b>29,8</b>	<b>586</b>	<b>80506,5</b>

(1) <http://www.ability.ind.br/html/>

(2) <http://www.br.endress.com/>

(3) <http://www.hidrovector.com.br/>

(4) [http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br/ln\\_valvulas/oldvlg03.asp](http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br/ln_valvulas/oldvlg03.asp)

(5) [http://www.vacuolu.com.br/index.php?secao=bombas\\_vacuao#2](http://www.vacuolu.com.br/index.php?secao=bombas_vacuao#2)

(6) <http://www.hidrovector.com.br/outras-bombas-imbil.asp>

(7) <http://www.endress.com/>

(8) [http://www.itacreto.com.br/index\\_arquivos/Page612.htm](http://www.itacreto.com.br/index_arquivos/Page612.htm)

(9) <http://www.callmex.com.br/>

(10) <http://www.dewalt.com.br/comp/compcalc.asp>

(11) <http://w1.siemens.com/entry/br/pt/>

(12) <http://www.cec.com.br/>

(13) <http://www.evacon.com.br/>

(14) <http://www.liderbalancas.com.br/>

**Tabela 14 – Consumo de energia elétrica da unidade piloto de metanização**

Equipamentos	Unidades	Horas de trabalho	Potência (hp)	Consumo energético (kWh.ano)
Tromel (2)	1	8	50	146000
<b>Prensa de recicláveis (3)</b>	2	8	4,9	14308
Separador Férrico (8)	1	8	4	11680
Triturador de FORM (1)	1	8	26,8	78256
Correia de alimentação (4)	1	8	4	11680
Correia cabine de triagem grandes volumes - entrada tromel (4)	1	8	4	11680
Conjunto correia passante tromel – cabine triagem de recicláveis (4)	2	8	5	14600
Cinta primária (4)	1	8	4	11680
Cinta de ascensão (4)	1	8	3	8760
Cinta de triagem 01 (4)	1	8	4	11680
Cinta de triagem 02 (4)	1	8	3	8760
Cinta do separador férrico (4)	1	8	3	8760
Cinta reversível triturador (2)	1	8	2	5840
Balança integradora (2)	2	8	0,02	58
Ventilador de exaustão (6)	10	8	0,98	2862
Gasômetro (7)	1	24	6	52560
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>144</b>	<b>124,7</b>	<b>399164</b>

(1) <http://www.ability.ind.br/html/>

(2) [www.doppstadt.de](http://www.doppstadt.de)

(3) <http://www.reforplastica.com.br/1015.html>

(4) <http://www.lemaquim.com.br>

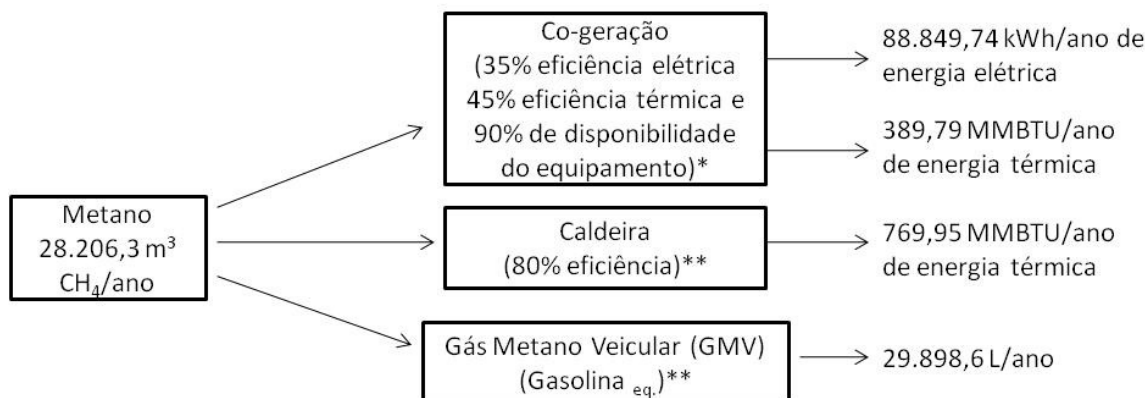
(5) - [www.bextra.com.br](http://www.bextra.com.br)

(6) <http://www.luftmaxi.com.br/ventiladoraxialindustrial.php>

(7) [www.sattler-ag.com](http://www.sattler-ag.com)

(8) [www.lainig.com](http://www.lainig.com)

**Tabela 15 – Consumo de energia elétrica da planta industrial de pré-tratamento**



**Figura 13 - Aproveitamento energético do biogás gerado na planta piloto**

\* Fonte: International, 2005 / \*\* Fonte: Neder, 2005

O fator para conversão do CH<sub>4</sub> em energia elétrica utilizado foi de que 1m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> corresponde a 36 MJ ou 10 kWh (Banks, 2009) e para conversão em energia térmica foi de 1m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> é igual a 18.363,6284 BTU e 1 kWh é igual a 3.412,124 BTU e 1 BTU é igual a 0,2519958 kcal (International, 2005).

A determinação do calor requerido pelo sistema foi realizada com o auxílio da seguinte equação:

$$Q_1 = W_f C_p (T_2 - T_1)$$

**Equação 6 – Determinação do calor requerido (Wang, 2007)**

onde:

$Q_1$  = calor requerido, J/d

$W_f$  = vazão de entrada, kg/d

$C_p$  = calor específico do material: Lixiviado = 4200 J/kg.°C e FORM = 2.470 J/kg.°C

$T_2$  = temperatura de operação do digestor, °C

$T_1$  = temperatura do material, 30°C

Portanto, considerando 1J = 0,2390 calorias, o calor requerido para elevação da temperatura dos materiais alimentados a temperatura adequada são:

- Digestor principal em temperatura mesofílica: 7.558 kcal/dia
- Digestor principal em temperatura termofílica: 20.156 kcal/dia.
- Digestor secundário em temperatura mesofílica: 1.205 kcal/dia
- Digestor secundário em temperatura termofílica: 3.213 kcal/dia

A determinação da perda de calor do sistema foi realizada com o auxílio da seguinte equação:

$$Q_2 = UA (T_2 - T_1)$$

**Equação 7 – Determinação da perda de calor (Wang, 2007)**

onde:

$Q_2$  = perda de calor, J/S

$U$  = coeficiente de transferência de calor J/m<sup>2</sup>.seg.°C

$A$  = área de perda de calor, m<sup>2</sup>

$T_2$  = temperatura do lodo em digestão, °C

$T_1$  = temperatura ambiente, °C

Para os cálculos da perda de calor do sistema foram adotados os seguintes coeficientes (Wang, 2007):

- Coeficiente de transferência de calor para o concreto não isolado termicamente igual a 5J/m<sup>2</sup>.S.°C
- Coeficiente de transferência de calor para o concreto isolado termicamente igual a 1 J/m<sup>2</sup>.seg.°C

- O coeficiente de transferência de calor na base e no topo do digestor igual a  $1,1 \text{ J/m}^2 \cdot \text{seg} \cdot ^\circ\text{C}$ .

A seguir serão apresentadas as perdas de cargas para os digestores.

Digestores construídos em concreto armado sem isolamento térmico:

Digestor principal operando em temperatura mesofílica: 3.492 kcal/dia

Digestor principal operando em temperatura termofílica: 9.312 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura mesofílica: 152 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura termofílica: 1.173 kcal/dia

Digestores construídos em concreto armado com sistema de isolamento térmico:

Digestor principal operando em temperatura mesofílica: 948 kcal/dia

Digestor principal operando em temperatura termofílica: 2.528 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura mesofílica: 88 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura termofílica: 235 kcal/dia

Assim, considerando uma eficiência de transferência de calor de 60% (Wang, 2007), a necessidade de calor do sistema será a seguinte:

Digestores construídos em concreto armado sem isolamento térmico:

Digestor principal operando em temperatura mesofílica: 16.809 kcal/dia

Digestor principal operando em temperatura termofílica: 42.905 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura mesofílica: 2.160 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura termofílica: 6.628 kcal/dia

Digestores construídos em concreto armado com sistema de isolamento térmico:

Digestor principal operando em temperatura mesofílica: 13.545 kcal/dia

Digestor principal operando em temperatura termofílica: 36.121 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura mesofílica: 2.096 kcal/dia

Digestor secundário operando em temperatura termofílica: 5.590 kcal/dia

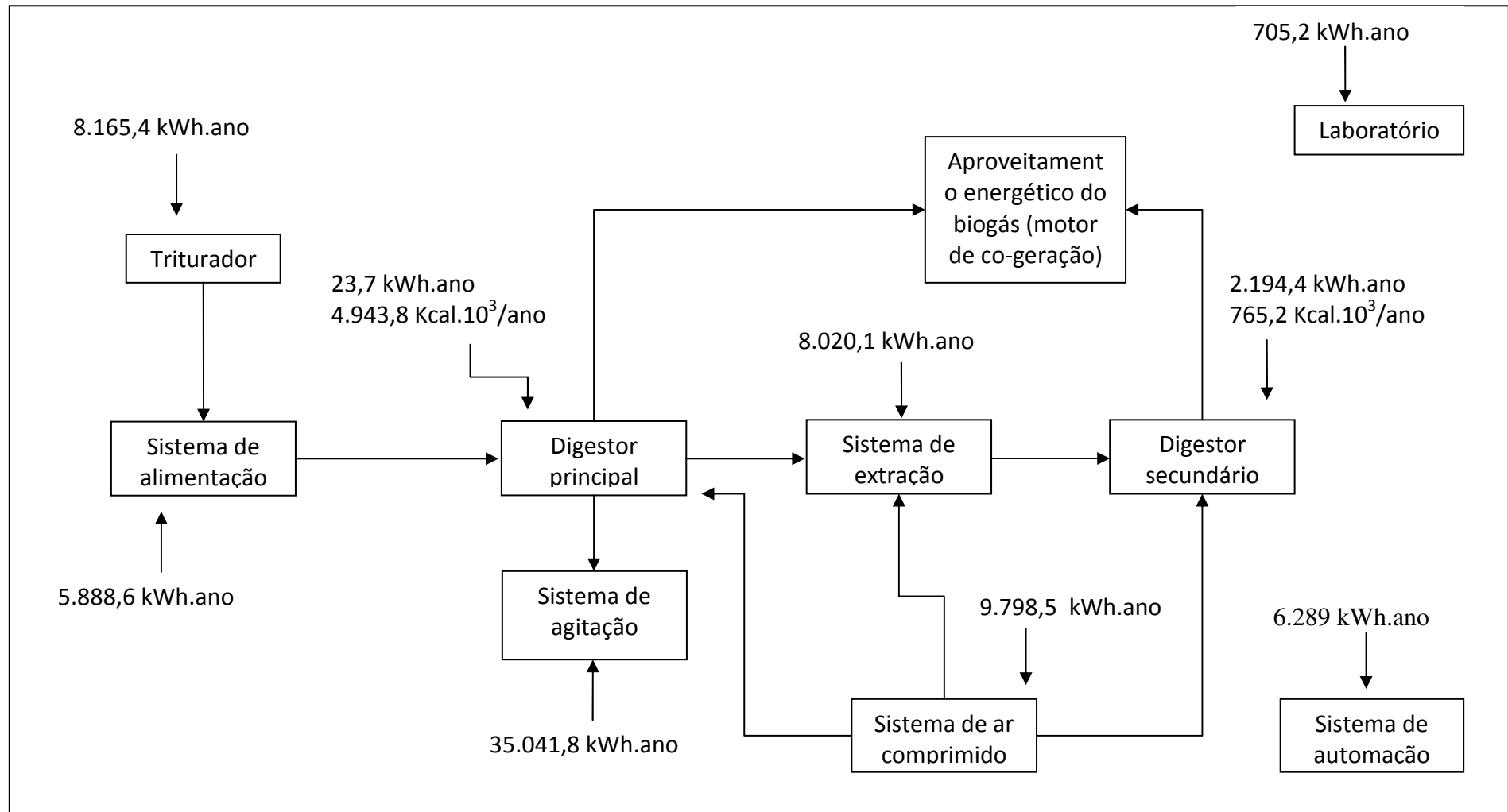


Figura 14 – Consumo energético da unidade piloto, considerando os digestores operando em faixa mesofílica e isolados termicamente – (Energia elétrica em kWh/ano e em calor em kcal.10<sup>3</sup>/ano)

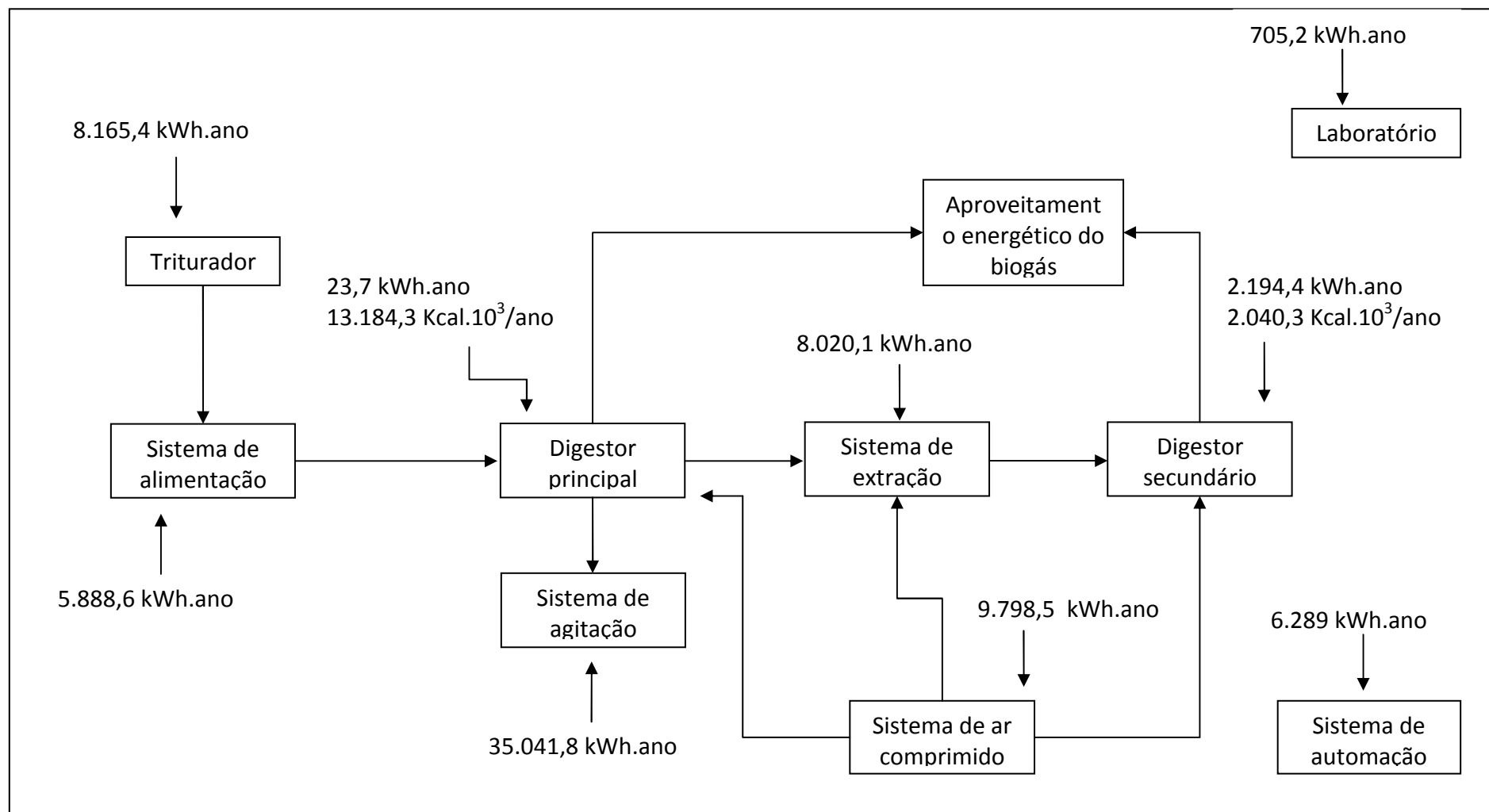


Figura 15 – Consumo energético da unidade piloto, considerando os digestores operando em faixa termofílica e isolados termicamente – (Energia elétrica em kWh/ano e em calor em kcal.10<sup>3</sup>/ano)



## 15 – CUSTOS DO PROJETO BÁSICO, IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DA UNIDADE PILOTO

Para o desenvolvimento do projeto básico considerou-se como necessário a equipe mínima descrita na tabela 16 e aproximadamente 9 meses para a execução do mesmo.

O tempo estimado para a construção da planta piloto é de 10 meses, sendo que no projeto básico deverá ser detalhado a equipe mínima necessária para a montagem do sistema.

Formação	Quantidade	Salário base	Valor Salário mínimo	Salário mais encargos	Tempo de projeto (meses)	Valor total
Engenheiro civil com experiência em projetos de unidades de tratamento de resíduos	1	8,5	R\$ 465,00	R\$ 7.905,00	9	R\$ 71.145,00
Engenheiro mecânico com experiência em projetos de unidades de tratamento de resíduos	1	8,5	R\$ 465,00	R\$ 7.905,00	9	R\$ 71.145,00
Engenheiro ambiental ou químico com experiência em projetos de unidades de tratamento de resíduos	1	8,5	R\$ 465,00	R\$ 7.905,00	9	R\$ 71.145,00
Especialista em Autocad	1	5	R\$ 465,00	R\$ 4.650,00	9	R\$ 41.850,00
Economista ou administrador com experiência na elaboração de análise de viabilidade econômica de projetos	1	8,5	R\$ 465,00	R\$ 7.905,00	3	R\$ 23.715,00
<b>TOTAL</b>						<b>R\$ 279.000,00</b>

**Tabela 16 – Custo de pessoal para a elaboração do projeto básico da unidade piloto**

A tabela 17 apresenta um resumo dos custos operacionais da unidade piloto. Estima-se que o tempo mínimo de operação desta unidade seja de 24 meses para a realização dos testes de viabilidade técnica do projeto proposto.

Mão-de-obra / Insumo / Manutenção	Quantidade	Salário base	Salário base	Salário mais encargos*	Tempo de operação(meses)	Custo mensal	Custo anual
Engenheiro responsável	1	6	R\$ 2.790,00	R\$ 5.580,00	24	R\$ 5.580,00	R\$ 66.960,00
Eleto-mecânico	1	3	R\$ 1.395,00	R\$ 2.790,00	24	R\$ 2.790,00	R\$ 33.480,00
Supervisor de operação	1	2,5	R\$ 1.162,50	R\$ 2.325,00	24	R\$ 2.325,00	R\$ 27.900,00
Operador de planta	4	2	R\$ 930,00	R\$ 7.440,00	24	R\$ 29.760,00	R\$ 357.120,00
Supervisor de controle e automação	1	4,5	R\$ 2.092,50	R\$ 4.185,00	5	R\$ 4.185,00	R\$ 20.925,00
Manutenção da unidade piloto (10% ao ano do custo de construção)	-	-	-	-	24	R\$ 4.744,42	R\$ 56.933,00
Consumo de água (m <sup>3</sup> dia)	15	-	-	-	24	R\$ 465,00	R\$ 5.580,00
Consumo de energia (kWh.ano)	80506,5	-	-	-	24	R\$ 3.689,88	R\$ 44.278,57
Administrativo (material de escritório, telefone, internet...)	-	-	-	-	24	R\$ 700,00	R\$ 8.400,00
Isomos (óleo, combustível, ferramentas...)	-	-	-	-	24	R\$ 600,00	R\$ 7.200,00
Reagentes e vidraria para laboratório	-	-	-	-	24	R\$ 4.000,00	R\$ 48.000,00
<b>TOTAL</b>						<b>R\$ 58.839,30</b>	<b>R\$ 676.776,57</b>

\* Os encargos sociais foram definidos como 100% do salário base

**Tabela 17 – Custos operacionais da operação da unidade piloto**

Equipamentos	Consumo energético (kWh.ano)	Valor Estimado (total/ano)*
<b>Sistema de introdução</b>		
Triturador de facas	8165,4	R\$ 4.490,98
Betoneira para concreto de 400L	2207,6	R\$ 1.214,20
Balança de plataforma eletromecânica até 1000kg	7,3	R\$ 4,02
Sistema de alimentação em aço inox com rosca helicoidal encamisada	3650,0	R\$ 2.007,50
Sistema de aquecimento do resíduo de introdução	21,9	R\$ 12,05
Sensor de temperatura	0,9	R\$ 0,48
Sensor de pressão	0,9	R\$ 0,48
<b>Sistema de agitação</b>		
Sistema de compressão do biogás	35040,0	R\$ 19.272,00
Sensor de pressão	0,9	R\$ 0,48
Eletroválvulas	0,9	R\$ 0,48
<b>Sistema de extração</b>		
Eletroválvulas	0,9	R\$ 0,48
Bomba de vácuo	2177,4	R\$ 1.197,59
Bomba de impulsão	5840,0	R\$ 3.212,00
Sensor de temperatura	0,9	R\$ 0,48
Sensor de pressão	0,9	R\$ 0,48
<b>Digestor principal</b>		
Sensor de pressão	0,9	R\$ 0,48
Sensor de nível	0,9	R\$ 0,48
Medidor de metano	3,5	R\$ 1,93
Medidor de vazão	0,9	R\$ 0,48
Queimador	17,5	R\$ 9,64
<b>Digestor secundário</b>		
Bomba alimentação/extração	2190,0	R\$ 1.204,50
Sensor de pressão	0,9	R\$ 0,48
Sensor de temperatura	0,9	R\$ 0,48
Phmetro	0,9	R\$ 0,48
Sensor de nível	0,9	R\$ 0,48
Sensor de temperatura	0,9	R\$ 0,48
<b>Sistema de ar comprimido</b>		
Compressor de ar	9798,5	R\$ 5.389,17
<b>Sistema de automação</b>		
Computador	4,4	R\$ 2,41
PLC	700,8	R\$ 385,44
<b>Laboratório</b>		
Centrifuga	292,0	R\$ 160,60
Phmetro	7,3	R\$ 4,02
Estufa	4380,0	R\$ 2.409,00
Mufla	1022,0	R\$ 562,10
Exaustor	584,0	R\$ 321,20
Balança	3,7	R\$ 2,01
Iluminação da planta	4380,0	R\$ 2.409,00
<b>TOTAL</b>	<b>80506,5</b>	<b>R\$ 44.278,57</b>

\* considerando R\$ 0,55 o kWh

Tabela 18 – Custo anual do consumo de energia elétrica da unidade piloto

Equipamentos	Consumo energético (kWh.ano)		Valor estimado (total/ano)*
Tromel	146000	R\$	80.300,00
<b>Prensa de recicláveis</b>	14308	R\$	7.869,40
Separador Férrico	11680	R\$	6.424,00
Triturador de FORM	78256	R\$	43.040,80
Correia de alimentação	11680	R\$	6.424,00
Correia cabine de triagem grandes volumes - entrada tromel	11680	R\$	6.424,00
Conjunto correia passante tromel – cabine triagem de recicláveis	14600	R\$	8.030,00
Cinta primária	11680	R\$	6.424,00
Cinta de ascensão	8760	R\$	4.818,00
Cinta de triagem 01	11680	R\$	6.424,00
Cinta de triagem 02	8760	R\$	4.818,00
Cinta do separador férrico	8760	R\$	4.818,00
Cinta reversível triturador	5840	R\$	3.212,00
Balança integradora	58	R\$	32,12
Ventilador de exaustão	2862	R\$	1.573,88
Gasômetro	52560	R\$	28.908,00
<b>TOTAL</b>	<b>399164</b>	<b>R\$</b>	<b>219.540,20</b>

\* considerando R\$ 0,55 o kWh

**Tabela 19 – Custo anual do consumo de energia elétrica da unidade industrial de pré-tratamento**

Lista de Equipamentos	Quantidade	Unidade	Valor Estimado (unitário)	Valor Estimado (total)
<b>Sistema de introdução</b>				
Triturador de facas	1	Unidade	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00
Sistema de alimentação em aço inox com rosca helicoidal encamisada	1	Unidade	R\$ 14.000,00	R\$ 14.000,00
Sistema de aquecimento do resíduo de introdução	1	Unidade	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00
Sensor de temperatura	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Sensor de pressão	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
<b>Digestor principal</b>				
Concreto armado resistente a sulfato para construção do digestor	25	m <sup>3</sup>	R\$ 1.300,00	R\$ 32.500,00
Fundação, pilares e vigas	24	m <sup>3</sup>	R\$ 1.100,00	R\$ 26.400,00
Alvenaria	62	m <sup>2</sup>	R\$ 65,00	R\$ 4.030,00
Sensor de pressão	3	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 7.500,00
Sensor de nível	2	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 5.000,00
Medidor de metano	1	Unidade	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00
Medidor de vazão	1	Unidade	R\$ 3.000,00	R\$ 3.000,00
<b>Digestor secundário</b>				
Digestor	1	Unidade	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00
Tubulação, conexões (PVC DN 1") e válvulas			R\$ 4.000,00	R\$ 4.000,00
Bomba de alimentação/extração	1	Unidade	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00
Sensor de pressão	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Sensor de temperatura	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Phmetro	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Sensor de nível	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
<b>Sistema de ar comprimido</b>				
Compressor de ar	1	Unidade	R\$ 4.000,00	R\$ 4.000,00
<b>Sistema de automação</b>				
Computador	2	Unidade	R\$ 2.000,00	R\$ 4.000,00
PLC e software	1	Unidade	R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00
<b>Laboratório</b>				
Centrifuga	1	Unidade	R\$ 5.000,00	R\$ 5.000,00
Phmetro	1	Unidade	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
Estufa	1	Unidade	R\$ 1.500,00	R\$ 1.500,00
Mufla	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Balança precisão	1	Unidade	R\$ 1.500,00	R\$ 1.500,00
Exaustor	1	Unidade	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
<b>Sistema de agitação</b>				
Bicos injetores	64	Unidade	R\$ 25,00	R\$ 1.600,00
Mangueira de acoplamento - até 5bar de pressão	64	Unidade	R\$ 200,00	R\$ 12.800,00
Tubulação em aço inox (diâmetros variados)	120	metros	R\$ 150,00	R\$ 18.000,00
Conexões / soldas			R\$ 8.000,00	R\$ 8.000,00
Sistema de compressão do biogás	1	Unidade	R\$ 50.000,00	R\$ 50.000,00
Sensor de pressão	2	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 5.000,00
Eletroválvulas	8	Unidade	R\$ 3.000,00	R\$ 24.000,00
<b>Sistema de extração</b>				
Tubulação em aço carbono 3mm, DN250	80	metros	R\$ 150,00	R\$ 12.000,00
Válvulas de gaveta - DN250	10	Unidade	R\$ 800,00	R\$ 8.000,00
Eletroválvulas	3	Unidade	R\$ 3.000,00	R\$ 9.000,00
Tanque de vácuo	1	Unidade	R\$ 6.000,00	R\$ 6.000,00
Bomba de vácuo	1	Unidade	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00
Bomba de impulsão	1	Unidade	R\$ 15.000,00	R\$ 15.000,00
Sensor de temperatura	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Sensor de pressão	1	Unidade	R\$ 2.500,00	R\$ 2.500,00
Prensa	1	Unidade	R\$ 7.000,00	R\$ 7.000,00
Tanque de armazenamento de lixiviado em alvenaria, impermeabilizado	10	m <sup>3</sup>	R\$ 1.000,00	R\$ 10.000,00
<b>Coleta do biogás</b>				
Tubo em aço inox	40	m	R\$ 200,00	R\$ 8.000,00
Conexões / soldas			R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00
Válvula de segurança	2	Unidade	R\$ 4.000,00	R\$ 8.000,00
Queimador	1	Unidade	R\$ 8.000,00	R\$ 8.000,00
Sensor de metano	1	Unidade	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00
<b>Desenvolvimento do sistema de controle e automação</b>			R\$ 25.000,00	R\$ 25.000,00
<b>Obras Civil</b>			R\$ 20.000,00	R\$ 20.000,00
<b>Instalação Elétrica da unidade</b>			R\$ 20.000,00	R\$ 20.000,00
<b>Instalação hidráulica</b>			R\$ 20.000,00	R\$ 20.000,00
<b>Ajustes e adaptações</b>			R\$ 30.000,00	R\$ 30.000,00
<b>TOTAL</b>				<b>R\$ 562.330,00</b>

Tabela 20 – Custo de construção da unidade piloto de metanização

Equipamentos	Unidades	Valor Estimado (unitário)	Valor Estimado (total)
<b>Tremonha de alimentação</b>	1	R\$ 7.000,00	7.000,00
<b>Cabine de triagem de grandes volumes</b>	1	R\$ 15.000,00	15.000,00
Tromel	1	R\$ 70.000,00	70.000,00
<b>Cabina de triagem de recicláveis</b>	1	R\$ 50.000,00	50.000,00
<b>Prensa de recicláveis</b>	2	R\$ 18.000,00	36.000,00
Separador Férrico	1	R\$ 13.000,00	13.000,00
Triturador de FORM	1	R\$ 40.000,00	40.000,00
Correia de alimentação	1	R\$ 10.000,00	10.000,00
Correia cabine de triagem grandes volumes - entrada tromel	1	R\$ 10.000,00	10.000,00
Conjunto correia passante tromel – cabine triagem de recicláveis	2	R\$ 13.000,00	26.000,00
Cinta primária	1	R\$ 10.000,00	10.000,00
Cinta de ascensão	1	R\$ 8.000,00	8.000,00
Cinta de triagem 01	1	R\$ 10.000,00	10.000,00
Cinta de triagem 02	1	R\$ 8.000,00	8.000,00
Cinta do separador férrico	1	R\$ 8.000,00	8.000,00
Cinta reversível triturador	1	R\$ 6.500,00	6.500,00
Balança integradora	2	R\$ 25.000,00	50.000,00
Carro de mão basculante	5	R\$ 3.000,00	15.000,00
Ventilador de exaustão	10	R\$ 2.000,00	20.000,00
Gasômetro	1	R\$ 70.000,00	70.000,00
<b>Obras Civil</b>	1	R\$ 100.000,00	100.000,00
<b>Instalação Elétrica da unidade</b>	1	R\$ 40.000,00	40.000,00
<b>Instalação hidráulica</b>	1	R\$ 30.000,00	30.000,00
<b>Ajustes e adaptações</b>	1	R\$ 40.000,00	40.000,00
Sistema de controle e automação	5	R\$ 70.000,00	350.000,00
Sistema de proteção e combate a incêndio	1	R\$ 20.000,00	20.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>46</b>	<b>R\$ 696.500,00</b>	<b>R\$ 1.062.500,00</b>

**Tabela 21 – Custo de construção da planta de pré-tratamento da unidade industrial**

## 16 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O projeto apresentado refere-se a um novo conceito de uma unidade TMB para RSU, via metanização seca. Teve como objetivo a minimização na geração de resíduos de plantas, na utilização de maquinário e nos custos de implantação, operação e manutenção, bem como a simplicidade operacional para adequação da tecnologia a realidade de países em desenvolvimento..

Avaliando a evolução histórica de modelos de reatores das tecnologias existentes de digestão anaeróbia seca, foi definido a construção de um protótipo de digestor com um volume total de 50m<sup>3</sup> para a verificação da viabilidade técnica do conceito proposto.

Caso comprovada a viabilidade técnica e econômica, recomenda-se o *scale-up* com a construção de um digestor de 150m<sup>3</sup>.

Além disso, a alternativa tecnológica de tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos municipais via metanização seca seguida pela pós-digestão dos efluentes líquidos do processo buscam otimizar a produção de biogás por tonelada de resíduo tratado da ordem de 10%.

A configuração do reator foi projetada de forma a promover a remoção de inertes sedimentados no interior do reator, bem como a agitação do material em digestão sem utilização de elementos mecânicos internos.

Devido à quantidade de resíduos a ser tratada no digestor anaeróbio projetado (1,067 t/d), não se recomenda a construção de uma planta de pré-tratamento, devido à pequena escala necessária. Propõe-se que a planta seja construída em uma unidade de triagem e compostagem já existente onde já ocorra a segregação da matéria orgânica. Caso não seja possível, se faz necessário a construção de uma mesa simples de triagem, construída em alvenaria, com capacidade para 3 triadores. Neste caso, apenas a matéria orgânica seria selecionada, não se prevendo nenhum tipo de recuperação de outro material.

Porém, como se prevê um *scale-up* do sistema, foi realizado um projeto de uma linha de pré-tratamento com capacidade de aproximadamente 20 t/d de RSU.

A linha de pré-tratamento foi concebida objetivando a simplicidade de maquinário e a valorização da utilização de mão-de-obra humana na triagem dos materiais.

A correia reversível anterior à alimentação do triturador possibilita o direcionamento do material a um pátio de armazenamento evitando uma parada da linha de pré-tratamento quando da ocorrência de falhas no processo de alimentação do reator.

A alternativa do *by-pass* dos resíduos da caída do tromel (>50mm) possibilita o incremento da recuperação de recicláveis e da matéria orgânica, bem como uma diminuição na quantidade de resíduos gerados na planta.

Desta forma, entende-se que o conceito desta unidade de valorização dos resíduos sólidos urbanos pode viabilizar a implantação de unidades de metanização em países em desenvolvimento.

## 17 – CRONOGRAMA

Atividade	Duração																																																			
	1º ano												2º ano												3º ano												4º ano															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43									
1 - Elaboração do Projeto Básico																																																				
2 - Construção da unidade piloto																																																				
3 - Testes preliminares																																																				
4 - Posta em marcha																																																				
5 - Operação em faixa mesofílica																																																				
5.1 - Agitação inferior																																																				
5.2 - Agitação lateral																																																				
5.2 - Definição da carga orgânica máxima																																																				
6 - Operação em faixa termofílica																																																				
7 - Teste de eliminação de inertes																																																				



## 18 – BIBLIOGRAFIA

ABNT – NBR 5737:1992 - Cimentos Portland resistentes a sulfatos, 1992

Abu Qdais H.A., Hamoda M.F., Newham, J. - "Analysis of residential solid waste at generation sites" Waste Management & Research, 15, 1997.

Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P.F., Zepeda, F. - "Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y El Caribe" Pub: Banco Interamericano de Desarrollo y Organización Panamericana, 1997.

Albritton, D. L. y L. G. Meira. - Technical Summary: A report accepted by Working Group I of the IPCC, 2001.

Alvarez, M.D., Sans, R., Garrido, N., Torres, A. - "Factors that affect the quality of the bio-waste fraction of selectively collected solid waste in Catalonia" Waste Management, 2007.

Archer, E., Baddeley, A., Klein, A., Schwager, J., Whiting, K. - "Mechanical-biological-Treatment: A guide for decision makers processes, policies and markets" Pub: Juniper Consultancy Services Ltd, 2005.

Banks, C., Optimising anaerobic digestion - University of Southampton – Inglaterra, 2009.

Bernache Pérez, G., Sánchez Colón, S., Garmendia, A.M., Dávila Villareal, A., Sánchez Salazar, M.E. - "Solid waste characterization study in Guadalajara metropolitan zone, Mexico" Waste Management & Research, 19, 2001.

Bolaane, B., Ali, M. - "Sampling household waste at source: lessons learnt in Gabarone" Waste Management & Research, 22, 2004.

Braber, K. - "Anaerobic digestion of municipal solid wastes: a modern waste disposal option on the verge of breakthrough" Biomass and Bioenergy, 1995.

Braun, R., Prinzipien un systeme von vergarungsanlagen fur biogene kommelabfalle, - Abteilung Umweltbiotechnologie – IFA Tulln

Burnley, S. "A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom" Waste Management, 2006.

Cortinas, C. - "Situación de los residuos en México", <http://www.giresol.org> (acessado em abril 2007).

De Baere L. 2003. - State-of-the-art of anaerobic digestion of municipal solid waste. In: Ninth international waste management and landfill symposium, Cagliari, Italy, 2003.

De Baere L., The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe“ Pres. Nr. 10 „The practice of dry digestion of organic waste in the European context“ , ECN/ORBIT, 2008.

De Baere, L. - ‘Worldwide state-of-the-art of anaerobic digestion of solid waste’. Proceedings (Part 2) of 9th World Congress Anaerobic Digestion: ‘Anaerobic Conversion for Sustainability’, Antwerp, 2001.

Di Pinto AC, Limoni N, Passino R, Rozzi A and Tomei MC, Anaerobic process control by bicarbonate monitoring. Abstract, 5<sup>th</sup> IAWPRC workshop on instrumentation control and automation of water and wastewater treatment. Yokahoma, Kyoto, 1990.

DiLallo R and Albertson OE, Volatile acids by direct titration. Journal WPCF 33:356-365, 1961.

Edelmann, W. e Engeli H. - More than 12 years of experience with commercial anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes in Switzerland – 2008.

EPA (Environmental Protection Agency). - Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2000. Washington, D.C.: Office of Atmospheric Programs, 2002.

Fundação João Pinheiro - Centro de Estatística e Informações. - Perfil demográfico do Estado de Minas Gerais - 2002. – Belo Horizonte, 2003.

Gidaracos, E., Havas, G., Ntzamilis, P. “Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. Waste Management, 26, 668-679, 2006.

Guatellas, F. – “Residuos Urbanos, fuente de energía renovable” – Associação Catalã de Empresas de Valorização Energética de R.S.U., Valência, 2008.

Hobson, P N, Methane production from agricultural and domestic wastes. – Energy from wastes series – Appied Science Publisher LTD – 1981.

International, R., Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area - Final Report - Report to SMUD Advanced Renewable and Distributed Generation Program – Ris International Ltda. and MacViro Consultants Inc. - April 2005.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 1995: The Scientific Basis. Group I, 2nd Assessment Report. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press, 1996.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press, 2001.

Isaacson, R. "Methane for community wastes" – Taylor & Francis Group – 1991.

J. Mata-Alvarez , Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, 2006.

Jenkins SR, Morgan JM and Sawyer CL, Measuring anaerobic sludge digestion and growth by a simple alkalimetric titration. Journal WPCF 55: 448-453, 1983.

Kapp H, Schlammfäulung mit hohem Feststoffgehalt. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 86, Oldenbourg Verlag, Munchen, 300pp, 1984.

Lahav O, Morgan BE and Loewenthal RE. A rapid, simple and accurate method for measurement of VFA and carbonate alkalinity in anaerobic digestors. Environmental Science & Technology 36: 2736-2741, 2002.

Linde-KCA-Dresden GmbH em <http://www.linde-kca.com/> (acessado em abril 2007).

Magalhães E. A., Souza S. N. M., Afonso A. D. L, Ricieri R. P, Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO2 contido no biogás - Acta Scientiarum. Technology, 2004

McGhee J, A method for approximation of volatile acid concentrations in anaerobic digesters. Water e Sewage works 115: 162 -166, 1968.

Ministerio de Medio Ambiente (España) "Estado y evolución del medio ambiente". 2005

Moosbrugger RE, Wentzel MC, Loewenthal RE, Examaga and Marais GVR. Alkalinity measurement: A 5 pH point titration method to determine the carbonate and SCFA weak acid/ bases in aqueous solution containing also known concentrations of other weak acid/bases. *Water SA* 19 (1) 29-40, 1993.

Munch E and Greenfield PF, Estimation VFA concentrations in prefermenters by measuring pH. *Water Research* 32: 2431-2441, 1998.

Nath, K.J. "Solid waste management in the present indian perspectiva" proceedings of the ISWA 1993 Annual Conference, Jönköping, Sweden, September 1993.

Neder, KD – Aproveitamento energético de biogás na CAESB – II Semana da eficiência energética da CEMIG - 2005

Parizeau, K., Maclaren, V., Chanthy, L. - "Waste characterization as an element of waste management planning: Lessons learned from a study in Siem Reap, Cambodia"

Resources Conservation & Recycling, 2006.

Pauss A, Rozzi A, Ledrut MJ, Naveau H and Nyns EJ, Bicarbonate determination in complex acid-basic solutions by a back-titration method. Environmental Technology 11: 469-476, 1990

Reichert GA, Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão publicado no 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – Campo Grande/MG, 2003

RESA - Projectos Medioambientales y Energéticos - Estudi D'impacte ambiental - Centre Metropolità nº 2 de tractament integral de residuos municipals, Espanha – 2001x

Ripley LE, Bowle WC and Converse JC, Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high strength wastes. Journal WPCF 58:406-411, 1986.

Rozzi A and Brunetti A, Direct bicarbonate determination in anaerobic digester liquors. Environmental Technology Letters 2:385-392, 1981.

Schmid, W., Biokraftstoffe aus Biomüll am Beispiel des Kompogas-Verfahrens - Kompogas - Suíça, 2008

Seinfeld, J. H. y S. Pandis. - Atmospheric Chemistry and Physics From Air Pollution to Climate Change. New York, 1998.

Sokka, L., Antikainen, R., Kauppi, P.E. “Municipal solid wastes production and composition in Finland – changes in the period 1969-2002 and prospects until 2020”. Resources Conservation and Recycling, 2007.

Soliva, M. - “El compostatge com a activitat industrial aplicada a la gestió dels residus orgànics” IV Jornada Tècnica sobre la Gestió de Residus Municipals: El compostatge. Diciembre 2000.

Standard Methods - Standard Methods for the examination of water and wastewater. 19th edicion. Washington, DC: APHA, AWWA, WPCF, 1995

Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape - “Composition of waste in rubbish bags in Switzerland (2001/2002)”, 2003

Tsilemou, K., Panagiotakopoulos - “Approximate cost function for solid waste treatment facilities” Waste Management & Research, 2006.

Wang, L. H.; Shammas, N. K., Hung, Y.-T. Anaerobic Digestion. In: Biosolids Treatment Processes. Ed. by Lawrence K. Wang et al. 2007. 700 p. SPRINGER, BERLIN; HUMANA PRESS 2007.

U.S. Environmental Protection Agency “Municipal Solid Wastes in the United States: 2005 facts and figures”. 2006.

United Nations Environment Programme - “Solid Waste Management” ISBN: 92-807-2676-5, 2005.

United Nations Environment Programme - “Vital waste graphics: you and your trashbin: its guilty secret”, <http://www.vitalgraphics.net> (acessado em abril 2007).

United States Environmental Protection Agency EPA530-F-02-026 (5306W) Solid Waste and Emergency Response, 2002.

Van der Zee, F.P., Villaverde, S., García, P.A., Fdz.-Polanco, F. - “Sulfide removal by moderate oxygenation of anaerobic sludge environments” Bioresource Technology, 2007.

Vandevier, P., De Baere, L., Verstraete, W. “Biomethanization. Anaerobic digesters for the organic fraction of solid wastes” Encuentro Internacional sobre Gestión de Residuos Orgánicos en el Ámbito Rural Mediterráneo. Pamplona, Espanha, 2001.

Zhang, r., El-Mashad, H.M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., Gamble, P. “Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion”. Bioresource technology, 98, 929-935, 2007.

Zickefoose C, Hayes R B J, Anaerobic Sludge Digestion – Operations Manual. EPA 430/9-76-001, 1976.

[http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/03-04/biomass/index.html](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/biomass/index.html); acessado em Março 2009.

<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/437/dick.html>, acessado em outubro 2008.

[http://www.ows.be/pages/index.php?menu=85&submenu=125&choose\\_lang=EN](http://www.ows.be/pages/index.php?menu=85&submenu=125&choose_lang=EN); acessado em Março 2009.

<http://www.technischweekblad.nl/Uploads/Images/Technisch-Weekblad-39-VAR-groot.jpg>, acessado em fev. 2009

<http://www.valorgainternational.fr/en/page1.xml?>; Acessado em Março 2009.  
<http://www.valorgainternational.fr/fr/multipage.xml?pg=3&id=128079>, acessado em fevevereiro 2009

[http://www.waste-management-world.com/display\\_article/339836/123/ARCHI/none/none/1/State-of-the-art-2008---Anaerobic-digestion-of-solid-waste/](http://www.waste-management-world.com/display_article/339836/123/ARCHI/none/none/1/State-of-the-art-2008---Anaerobic-digestion-of-solid-waste/), acessado em fevereiro 2009

[UNFCCC \(United Nations Framework Convention on Climate Change\).  
http://www.unfccc.int/resource/docs/2000/sbi/inf13.pdf.](http://www.unfccc.int/resource/docs/2000/sbi/inf13.pdf) Acessado em janeiro 2009.

[Organic Waste Systems \(OWS\)- A true all-rounder in anaerobic digestion of solid and semisolid organics – http://www.ciwm.co.uk/mediastore/files/17546.pdf;](http://www.ciwm.co.uk/mediastore/files/17546.pdf) acessado em Março 2009.

Organic Waste Systems em <http://www.ows.be/>, acessado abril 2009.

[Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos no Brasil 2007 – Abrelpe  
http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_2007.php](http://www.abrelpe.org.br/panorama_2007.php) acessado em agosto. 2008.

<http://www.ability.ind.br/html/>, acessado em fevereiro. 2009.

<http://www.br.endress.com/>, acessado em março de 2009

<http://www.hidrovector.com.br/>, acessado em março 2009.

[http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br/In\\_valvulas/oldvlg03.asp](http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br/In_valvulas/oldvlg03.asp), acessado em abril 2009.

[http://www.vacuolu.com.br/index.php?secao=bombas\\_vacuo#2](http://www.vacuolu.com.br/index.php?secao=bombas_vacuo#2), acessado em abril 2009.

<http://www.hidrovector.com.br/outras-bombas-imbil.asp>, acessado em março 2009.

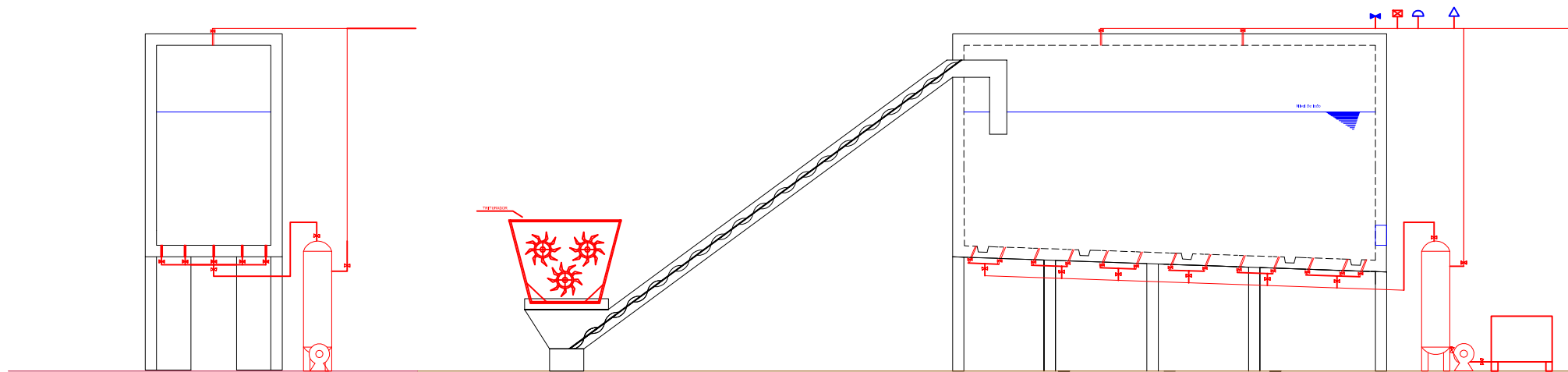
<http://www.endress.com/>, acessado em abril 2009.

[http://www.itacreto.com.br/index\\_arquivos/Page612.htm](http://www.itacreto.com.br/index_arquivos/Page612.htm), acessado em janeiro 2009.

<http://www.callmex.com.br/>, acessado em março 2009.

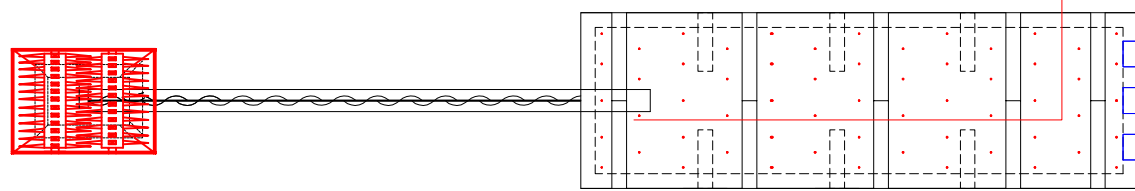
<http://www.dewalt.com.br/comp/compcalc.asp>, acessado em janeiro 2009.

<http://w1.siemens.com/entry/br/pt/>, acessado em março 2009.

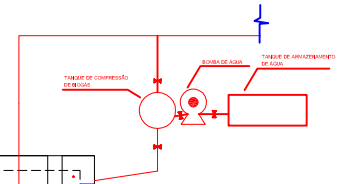


⊖ Elevação do digestor

⊖ Elevação do digestor



⊖ Digestor  
PLANTA BAIXA



LEGENDA

1. Tubulação biogás / Digestor

- Eletroválvula
- Válvula manual
- Medidor de vazão
- Medidor de pressão
- Medidor de metano

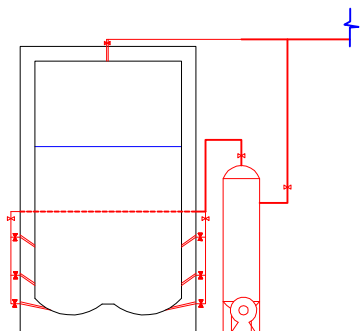
PROJETO



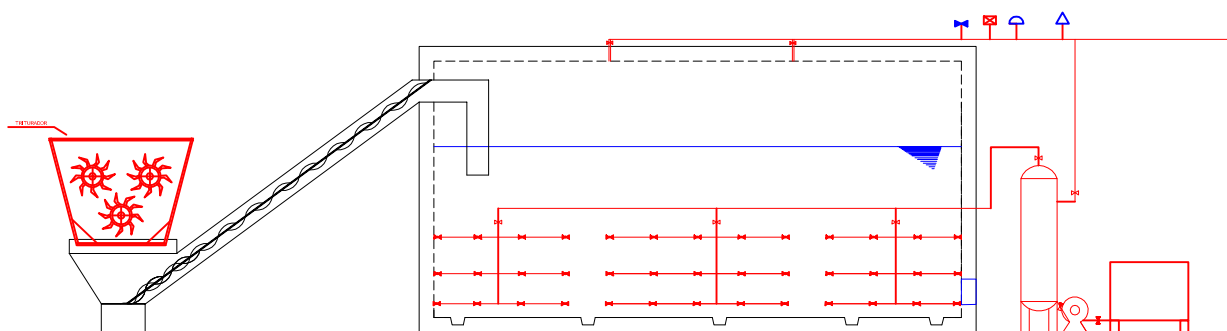
DEFLOR Bioengenharia

Nº	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.
Rev 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO	28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP

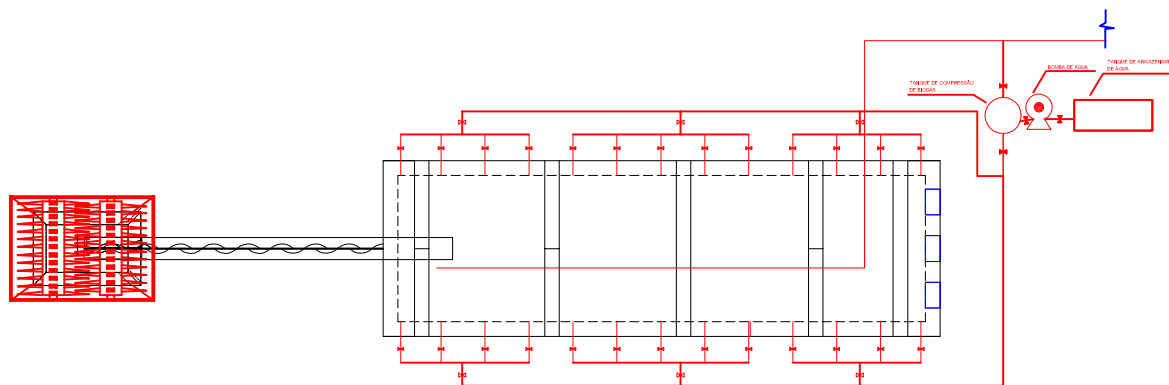
EMISSÃO		CLIENTE				
DES.	PRP					
PROJ.	LFC					
VERIF.	LFC	TÍTULO				
APROV.	ARP	PROJETO DIGESTOR – AGITAÇÃO INFERIOR DETALHES CONSTRUTIVOS				
ESCALA		FOLHA	No.	REVISÃO		
1/50		1/1	004	Rev 00		



Elevação digestor



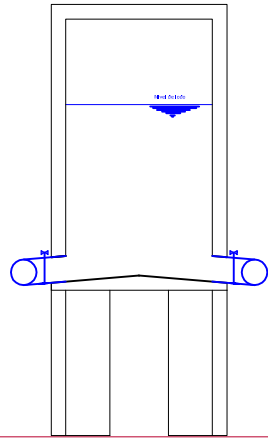
Elevação digestor



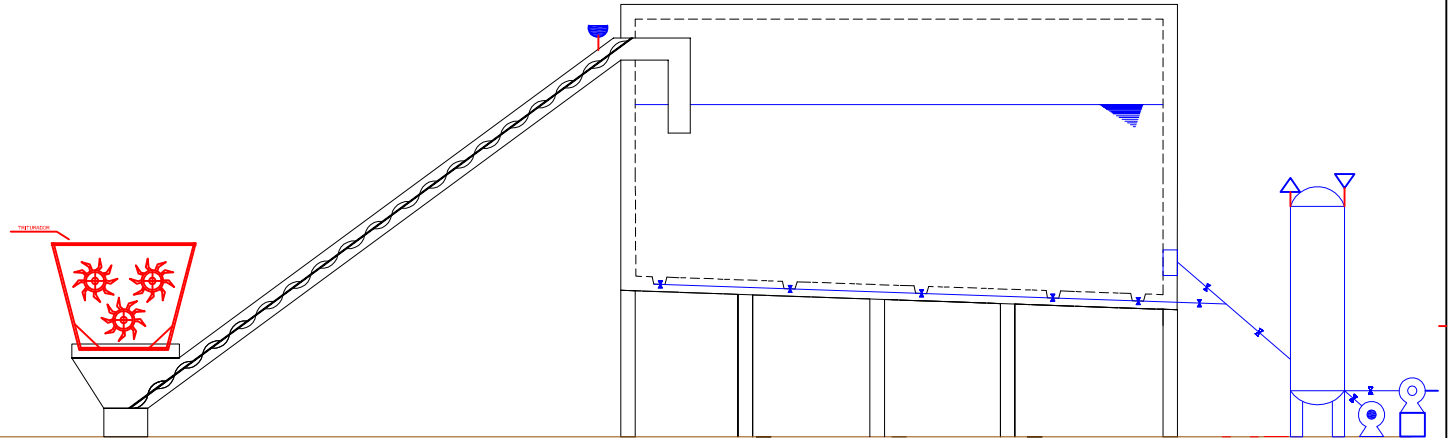
Digestor  
PLANTA BAIXA

LEGENDA		PROJETO																					
<p><u>1. Tubulação biogás / Digestor</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Eletroválvula</li> <li> Válvula manual</li> <li> Medidor de vazão</li> <li> Medidor de pressão</li> <li> Medidor de metano</li> </ul>		<p><b>deflor</b> Bioengenharia</p> <p>DEFLOR Bioengenharia</p>																					
		<table border="1"> <tr> <td rowspan="2" style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">OTIMIZADO</td> <td>Rev 0</td> <td>EMISSÃO PARA APROVAÇÃO</td> <td>28.11.08</td> <td>PRP</td> <td>LFC</td> <td>LFC</td> <td>ARP</td> </tr> <tr> <td>Nº</td> <td>DESCRIÇÃO</td> <td>DATA</td> <td>DES.</td> <td>PROJ.</td> <td>VERIF.</td> <td>APROV.</td> </tr> </table>							OTIMIZADO	Rev 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO	28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP	Nº	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.
OTIMIZADO	Rev 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO	28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP																
	Nº	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.																
		<p>EMISSÃO</p> <p>DES. PRP 10.11.08</p> <p>PROJ. LFC 10.11.08</p> <p>VERIF. LFC 28.11.08</p> <p>APROV. ARP 28.11.08</p>		<p>CLIENTE</p> <p><b>feam</b> FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE</p>																			
				<p>TÍTULO</p> <p>PROJETO DIGESTOR – AGITAÇÃO LATERAL DETALHES CONSTRUTIVOS</p>																			
		ESCALA	FOLHA	No.			REVISÃO																
		1/50	1/1	005			Rev 00																

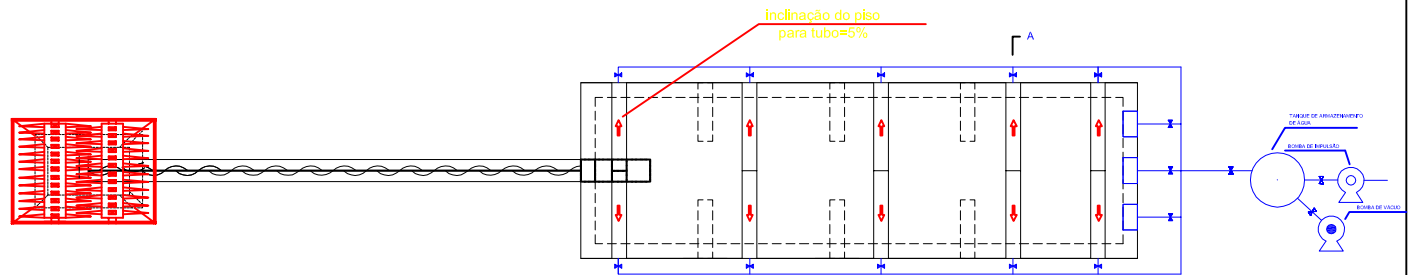




○ Elevação digester  
Corte A-A'



○ Elevação do digester



○ Digester  
PLANTA BAIXA



○ Digester principal - esquema de sensores  
PLANTA BAIXA

LEGENDA

1. Tubulação biogás / Digester

- ▶ Eletroválvula
- ✕ Válvula manual
- ◐ Medidor de vazão
- △ Medidor de pressão
- ⊠ Medidor de metano

2. Sensores e dispositivos de segurança

- ⊕ Tampa cega
- Disco de ruptura / baixa pressão
- Disco de ruptura / alta pressão
- ▽ Sensor de nível
- △ sensor de pressão
- ◐ sensor de Temperatura

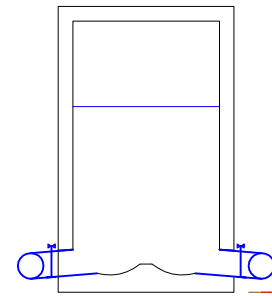
PROJETO



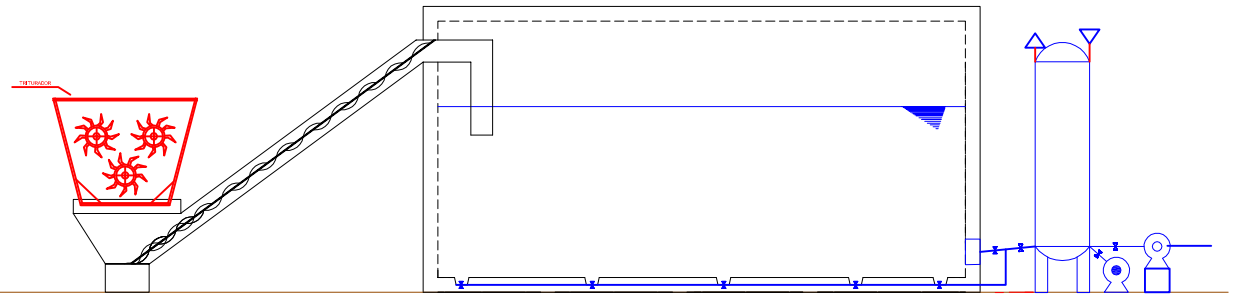
DEFLOR Bioengenharia

N°	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.

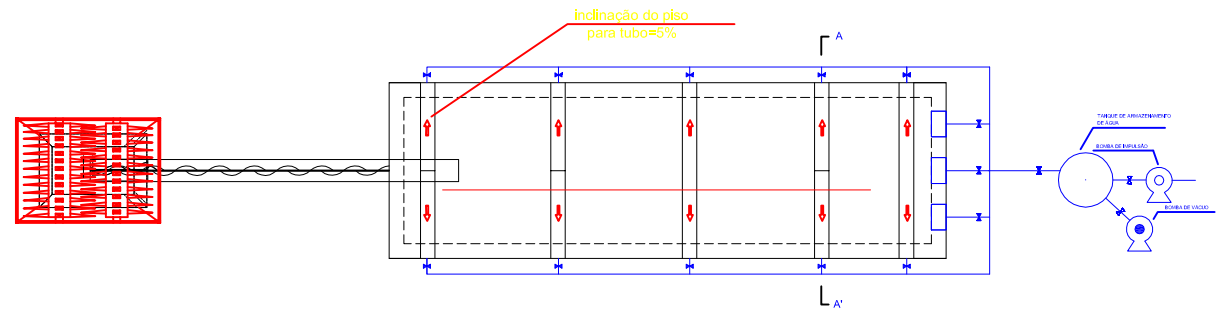
EMISSÃO		CLIENTE				
DES.	PRP	 FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE				
10.02.09						
PROJ.	LFC	TÍTULO				
10.02.09		PROJETO DIGESTOR – SISTEMA DE INTRODUÇÃO / EXTRAÇÃO				
VERIF.	LFC	DETALHES CONSTRUTIVOS				
28.02.09		ESCALA	FOLHA	No.	REVISÃO	
28.02.09		1/50	1/1	003	Rev 00	



Elevação digestor



Elevação digestor



Digestor  
PLANTA BAIXA

LEGENDA

1. Tubulação biogás / Digestor

- Eletroválvula
- Válvula manual
- Medidor de vazão
- Medidor de pressão
- Medidor de metano

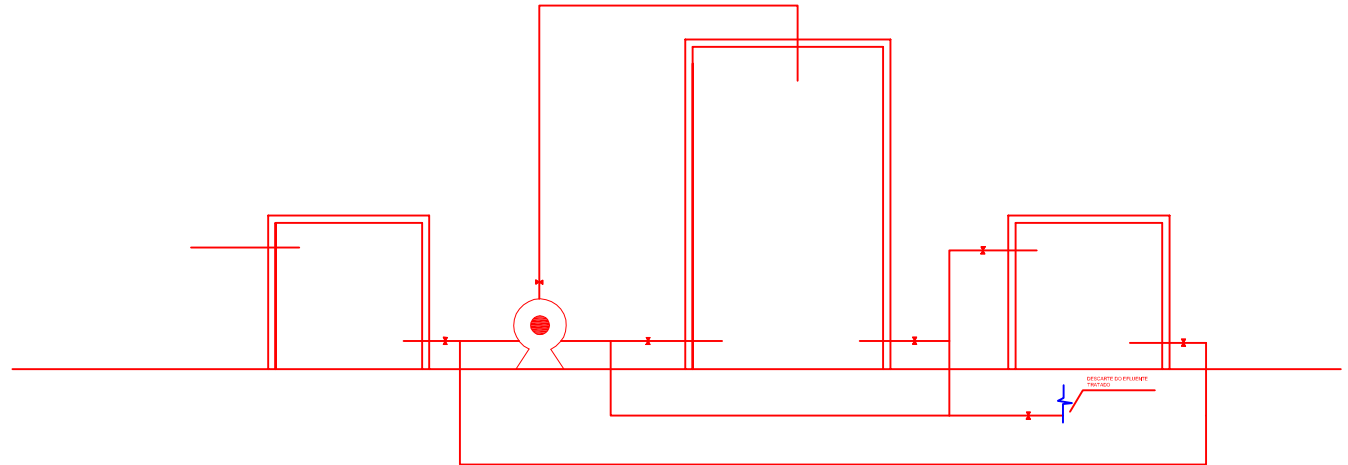
PROJETO



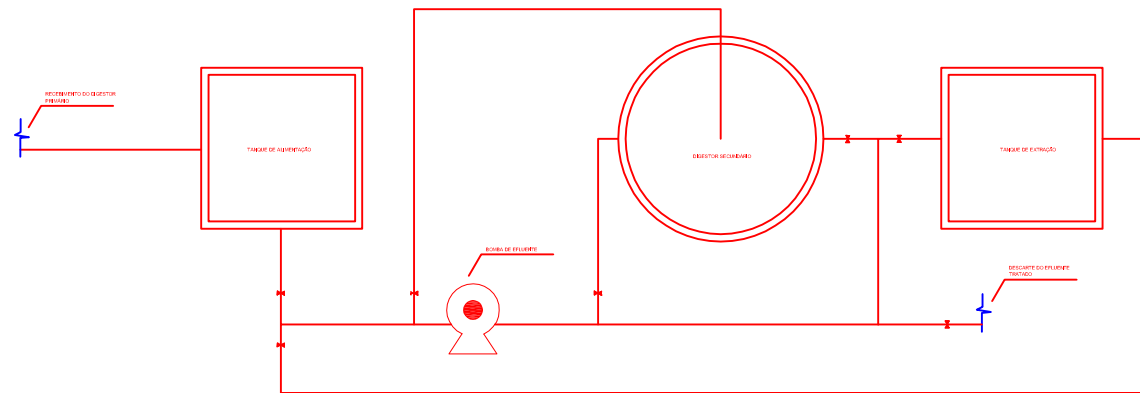
DEFLOR Bioengenharia

OTIMIZADO	Nº	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.
	Rev 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO	28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP


EMISSÃO		CLIENTE				
DES.	PRP	<b>FEAM</b> FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE				
PROJ.	LFC					
VERIF.	LFC					
APROV.	ARP					
TÍTULO		ESCALA	FOLHA	No.	REVISÃO	
PROJETO DIGESTOR - AGITAÇÃO LATERAL DETALHES CONSTRUTIVOS		1/50	1/1	0010	Rev 00	

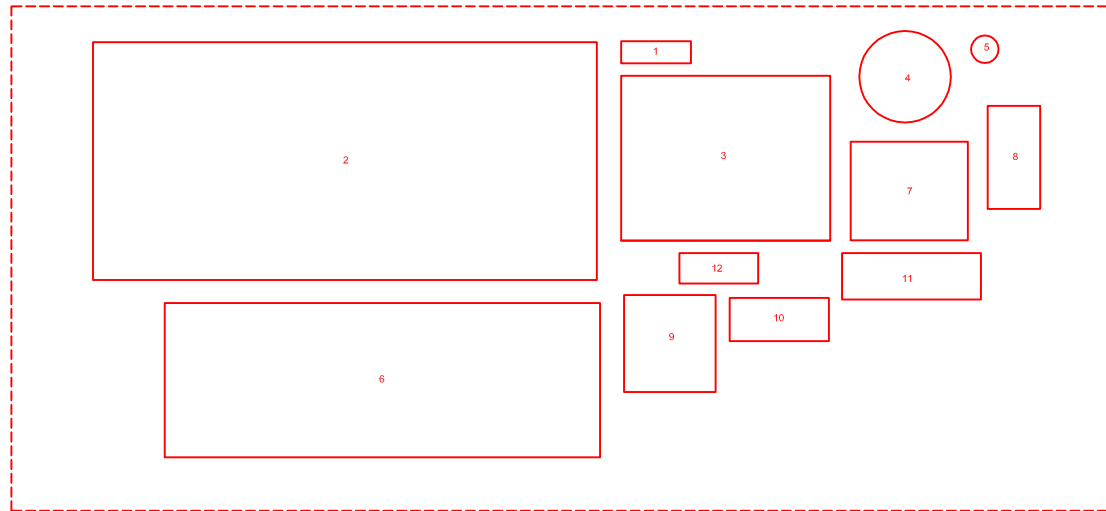


Digestor secundário  
ELEVAÇÃO





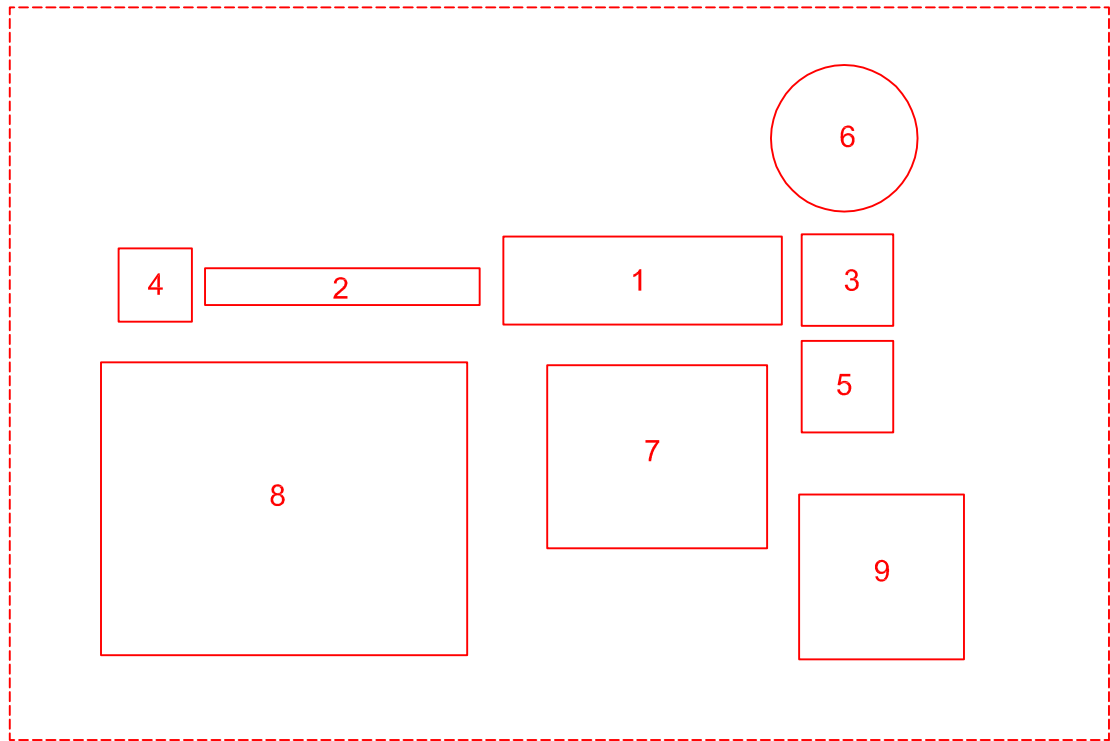
Digestor secundário  
PLANTA BAIXA

LEGENDA		PROJETO																														
<p>✦ VÁLVULA MANUAL</p>		 <b>DEFLOR Bioengenharia</b>																														
		<table border="1"> <tr> <td>OT</td> <td>OS</td> <td>OR</td> <td>OP</td> <td>OA</td> <td>OP</td> <td>OA</td> <td>OP</td> </tr> <tr> <td>Rev 0</td> <td colspan="2">EMISSÃO PARA APROVAÇÃO</td> <td>28.11.08</td> <td>PRP</td> <td>LFC</td> <td>LFC</td> <td>ARP</td> </tr> <tr> <td>Nº</td> <td colspan="2">DESCRIÇÃO</td> <td>DATA</td> <td>DES.</td> <td>PROJ.</td> <td>VERIF.</td> <td>APROV.</td> </tr> </table>							OT	OS	OR	OP	OA	OP	OA	OP	Rev 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO		28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP	Nº	DESCRIÇÃO		DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.
OT	OS	OR	OP	OA	OP	OA	OP																									
Rev 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO		28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP																									
Nº	DESCRIÇÃO		DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.																									
		<b>EMISSÃO</b>		<b>CLIENTE</b> <b>feam</b> FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE																												
		<b>DES. PRP</b> 10.11.08		<b>TÍTULO</b> PROJETO DIGESTOR SECUNDÁRIO ESQUEMA DE TUBULAÇÕES																												
		<b>PROJ. LFC</b> 10.11.08																														
		<b>VERIF. LFC</b> 28.11.08																														
		<b>APROV. ARP</b> 28.11.08		<b>ESCALA</b> 1/25		<b>FOLHA</b> 1/1		<b>No.</b> 006		<b>REVISÃO</b> Rev 00																						




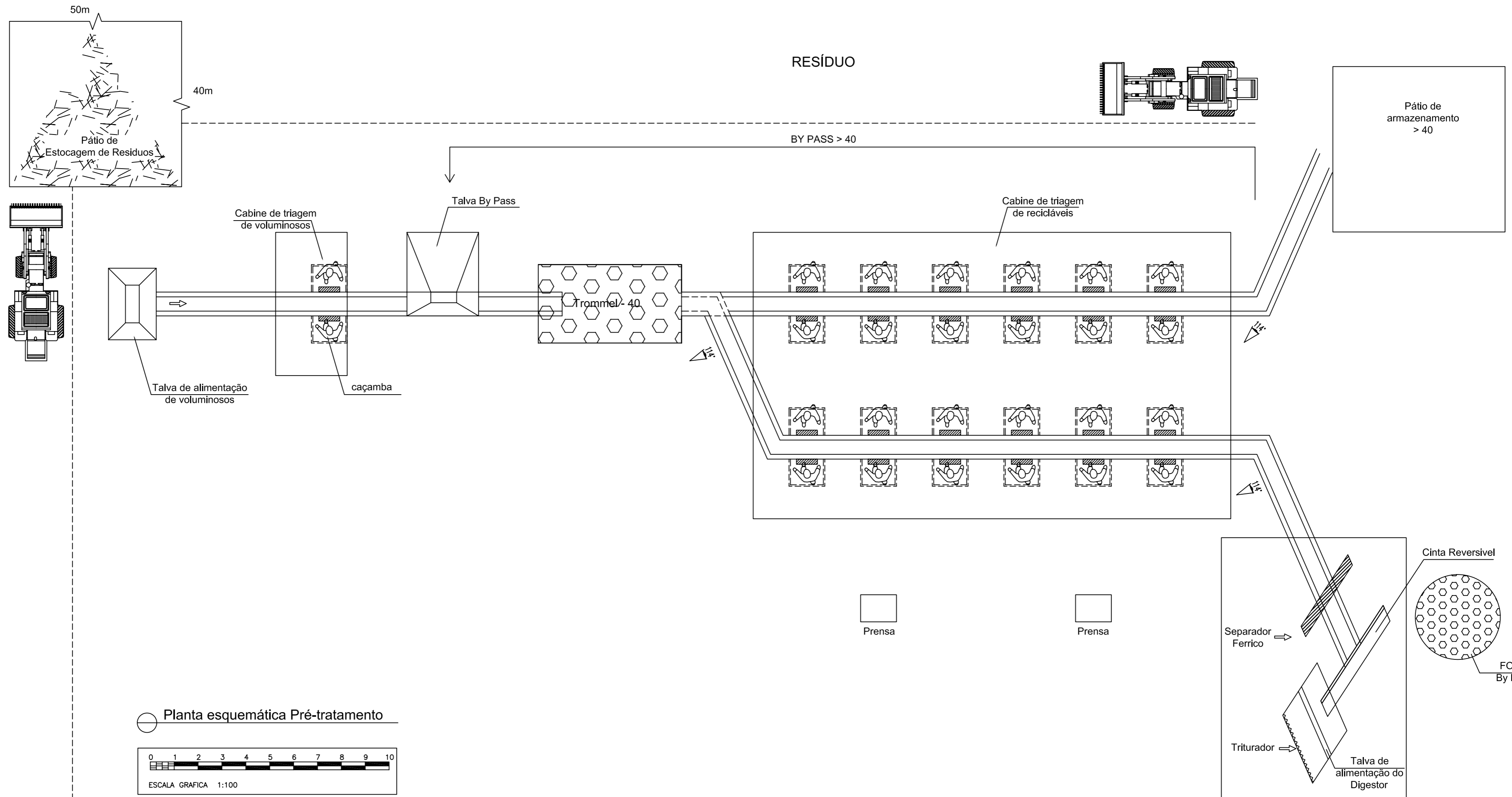
PLANTA GERAL

LEGENDA		PROJETO																																	
1 - DIGESTOR PRIMÁRIO 2 - SISTEMA DE PRÉ-TRATAMENTO 3 - ÁREA DE EXPANÇÃO PARA BIOMETANIZAÇÃO 4 - GASÔMETRO 5 - QUEIMADOR DE BIOGÁS 6 - PÁTIO DE COMPOSTAGEM 7 - TRATAMENTO DO BIOGÁS E DESODORIZAÇÃO 8 - APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS 9 - DIGESTOR SECUNDÁRIO 10 - SISTEMA DE DESAGUAMENTO DO LODO DIGERIDO 11 - OFICINA MECÂNICA 12 - SALA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO 13 - ALMOXARIFADO		 <b>DEFLOR Bioengenharia</b>																																	
		<table border="1"> <tr> <td>OTIOSO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rev 0</td> <td></td> <td>28.11.08</td> <td>PRP</td> <td>LFC</td> <td>LFC</td> <td>ARP</td> </tr> <tr> <td>Nº</td> <td>DESCRIÇÃO</td> <td>DATA</td> <td>DES.</td> <td>PROJ.</td> <td>VERIF.</td> <td>APROV.</td> </tr> </table>						OTIOSO							VERIF.							Rev 0		28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP	Nº	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.
OTIOSO																																			
VERIF.																																			
Rev 0		28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP																													
Nº	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.																													
		<b>EMISSÃO</b>		<b>CLIENTE</b>  <b>FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE</b>																															
		DES. PRP 10.11.08		<b>TÍTULO</b> PLANTA BAIXA DA UNIDADE INDUSTRIAL																															
		PROJ. LFC 10.11.08																																	
		VERIF. LFC 28.11.08																																	
		APROV. ARP 28.11.08		ESCALA 1/400	FOLHA 1/1	No. 005	REVISÃO Rev 00																												



PLANTA GERAL

LEGENDA		PROJETO						
1 - DIGESTOR PRIMÁRIO 2 - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO 3 - SISTEMA DE EXTRAÇÃO 4 - TRITURADOR 5 - SISTEMA DE DESAGUAMENTO 6 - QUEIMADOR DO BIOGÁS 7 - SALA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO 8 - OFICINA MECÂNICA 9 - LABORATÓRIO DE ANÁLISES		 <b>DEFLOR Bioengenharia</b>						
		OTIMIZADO VERIFICADO	Rev 0	28.11.08	PRP	LFC	LFC	ARP
			Nº	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.
		<b>EMISSÃO</b>		CLIENTE <b>feam</b> FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE				
		DES.	PRP	10.11.08				
		PROJ.	LFC	10.11.08	TÍTULO			
		VERIF.	LFC	28.11.08	PLANTA BAIXA DA UNIDADE PILOTO			
APROV.	ARP	28.11.08	ESCALA	FOLHA	No.	REVISÃO		
		1/100	1/1	005	Rev 00			

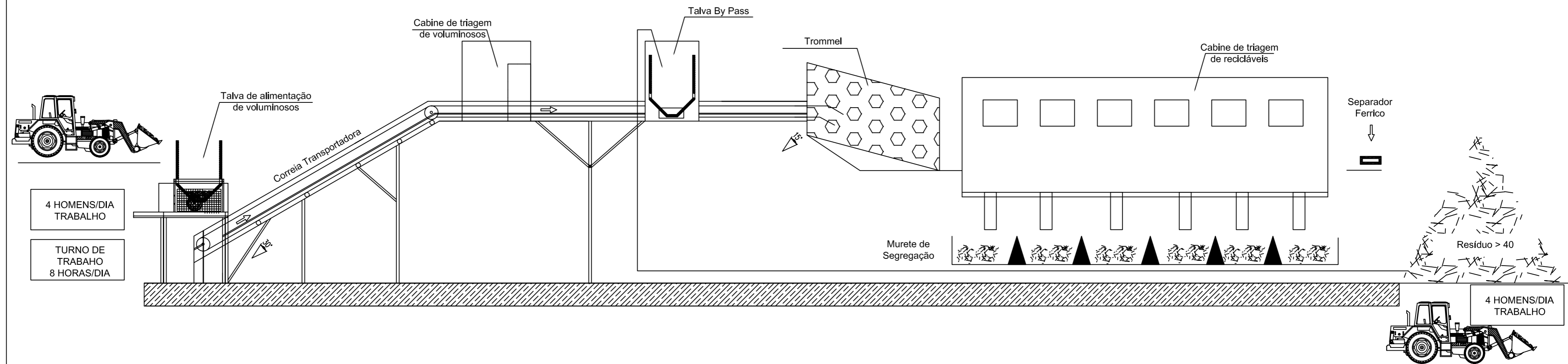


Planta esquemática Pré-tratamento

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

ESCALA GRAFICA 1:100

PROJETO							
		DEFLOR Bioengenharia					
REVISÕES	Rev 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO	15.02.09	MG	XXX	XXX	XXX
	N°	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.
	EMISSÃO		CLIENTE				
DES.	MG	FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE					
PROJ.	LFC	TÍTULO					
VERIF.	LFC	PROJETO ESTAÇÃO DE PRÉ-TRATAMENTO					
APROV.	LFC	CORTE ESQUEMÁTICO					
	ESCALA INDICADA	FOLHA 1/1	No. 001				REVISÃO Rev 00



4 HOMENS/DIA  
TRABALHO

TURNO DE  
TRABAHO  
8 HORAS/DIA

4 HOMENS/DIA  
TRABALHO

Planta esquemática Pré-tratamento  
Sem escala  
Vista Lateral

ESCALA GRAFICA

PROJETO																		
		DEFLOR Bioengenharia																
		<table border="1"> <tr> <td>REV 0</td> <td>EMISSÃO PARA APROVAÇÃO</td> <td>15.02.09</td> <td>MG</td> <td>XXX</td> <td>XXX</td> <td>XXX</td> </tr> <tr> <th>N°</th> <th>DESCRIÇÃO</th> <th>DATA</th> <th>DES.</th> <th>PROJ.</th> <th>VERIF.</th> <th>APROV.</th> </tr> </table>					REV 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO	15.02.09	MG	XXX	XXX	XXX	N°	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.
REV 0	EMISSÃO PARA APROVAÇÃO	15.02.09	MG	XXX	XXX	XXX												
N°	DESCRIÇÃO	DATA	DES.	PROJ.	VERIF.	APROV.												
<b>EMISSÃO</b> DES. MG 15.02.09		<b>CLIENTE</b> <b>FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE</b>																
<b>PROJ.</b> LFC 15.02.09		<b>TÍTULO</b> PROJETO ESTAÇÃO DE PRÉ-TRATAMENTO VISTA LATERAL																
<b>VERIF.</b> LFC 15.02.09		<b>ESCALA</b> INDICADA		<b>FOLHA</b> 1/1		<b>No.</b> 002												
<b>APROV.</b> LFC 15.02.09						<b>REVISÃO</b> Rev 00												