

**III-464 – ESTUDO DO ESTADO DA ARTE E ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DA IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA DE TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**Mario Saffer<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Especialização Diplôme d'Etudes Approfondies – Science et Technique des Procédés Chimiques e. Doutor em Engenharia de Processos – Modelagem matemática e simulação de Processos, Institut National Polytechnique de Toulouse – Institut du Génie Chimique – Toulouse, França. Atualmente Sócio Diretor da Engebio Engenharia S/S Ltda – Porto Alegre – RS.

**Guilherme Augusto Araujo Duarte<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Químico pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente Engenheiro responsável na Engebio Engenharia S/S Ltda – Porto Alegre – RS.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua João Abbott, 482 – Petrópolis – Porto Alegre – RS – CEP: 90460-150 – Brasil – Tel: (51) 3333-6005 – e-mail: [saffer@engebio.net](mailto:saffer@engebio.net)

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Rua João Abbott, 482 – Petrópolis – Porto Alegre – RS – CEP: 90460-150 – Brasil – Tel: (51) 3333-6005 – e-mail: [guilherme.duarte@engebio.net](mailto:guilherme.duarte@engebio.net)

**RESUMO**

A Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, do estado de Minas Gerais, com base na Lei Delegada nº. 156, de 25 de janeiro de 2007, regulamentada pelo Decreto 44819/2008 teve sua atribuição executiva no licenciamento ambiental transferida para unidades descentralizadas do Sistema Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SISEMA, passando a atuar com ênfase nas estratégias de busca de melhoria de qualidade ambiental e sustentabilidade do Estado, no âmbito da Agenda Marrom, incluindo o tema energia e mudanças climáticas. Nesse contexto a FEAM busca contratar serviços técnicos especializados para apoiar o desenvolvimento de novos temas com foco na formulação de diretivas e normativas legais para fortalecimento da política ambiental do Estado.

A FEAM desenvolve-se no estado de Minas Gerais o Programa "Resíduos Energia". Este programa foi implantado pela própria FEAM, como uma das ações do Projeto Estruturador "Resíduos Sólidos" do Governo Estadual e, pretende colaborar para a solução dos problemas gerados pelos resíduos sólidos em Minas Gerais. Assim, foram iniciadas as pesquisas e estudos para subsidiar políticas de incentivo à construção de usinas térmicas a lixo, co-processamento de resíduos em fornos de cimento e aproveitamento do gás metano em aterros sanitários, além de soluções regionais e de inclusão social, priorizando as associações de catadores para o processo prévio de triagem e reciclagem.

Dentro desse programa existem três estudos em andamento que visam atingir essa meta:

- Captação de gás de aterro;
- Biodigestão anaeróbia com obtenção de gás para geração de energia elétrica;
- Implantação de Usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos por combustão para fins de geração de energia elétrica.

Para avaliar a alternativa de destinação final dos resíduos para destruição térmica em uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos por combustão para fins de geração de energia elétrica, a FEAM contratou serviços de consultoria especializada para desenvolver um “Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica em um município ou conjunto de municípios no estado de MG”.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduo Sólido Urbano, Tratamento térmico RSU, Geração energia, Combustão, Engebio.

## INTRODUÇÃO

O “Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica em um município ou conjunto de municípios no estado de Minas Gerais”. Em um primeiro momento foi realizada uma avaliação global de processos térmicos de tratamento de resíduos sólidos urbanos, definindo as melhores tecnologias a serem avaliadas e apresenta os critérios e os resultados da seleção da área e do conjunto de municípios que serão objeto do estudo de viabilidade técnica e econômica. Foram avaliados os métodos alternativos de disposição de resíduos com recuperação de energia. Foram analisadas as emissões gasosas devido ao processo de combustão e os métodos de tratamento físico-químico avançados para neutralizar os poluentes gerados.

Para a avaliação de custos de investimentos e de operação, foram selecionadas fornecedoras de sistemas de combustão de resíduos sólidos urbanos consagradas no mercado internacional e, solicitadas cotações formais para 05 fornecedores e, o estudo considerou obviamente custos praticados no Brasil, principalmente no que se refere aos custos operacionais e de obras civis.

Para simulação de um cenário real, considerado a região de Minas Gerais selecionada que serviu como base para um estudo preliminar de viabilidade técnica e econômica para diferentes cenários.

O estudo dos sistemas de controle de emissões atmosféricas foi desenvolvido com base nos padrões de qualidade do ar dados pela Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990, pela Deliberação Normativa COPAM nº 11, de 16 de dezembro de 1986, do estado de Minas Gerais e pela Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, incluindo os resíduos de origem urbana.

Estudos divulgados em vários países do chamado “Primeiro Mundo” revelam o alto grau de desinformação quando o assunto é a combustão de resíduos urbanos.

Muito frequentemente adjetivam essa técnica como nociva à saúde humana e prejudicial ao meio ambiente porque tomam por referência resultados obtidos em equipamentos já obsoletos. O atual nível de desenvolvimento tecnológico – leia-se, eficientes sistemas de controle de emissão de gases, somados à vigência de legislações com rígidos parâmetros –, permite hoje considerar a combustão uma alternativa ambientalmente segura e economicamente viável para o tratamento de resíduos urbanos.

No momento presente, a combustão de resíduos sólidos municipais deve ser encarada como uma das formas viáveis existentes para a disposição de resíduos. Dentre os processos de tratamento térmico em alta temperatura, a combustão atualmente é o mais difundido, com um número elevado de unidades em operação comercial em todo o mundo, muitas de grande porte.

Os atuais custos de disposição em aterros tendem a se elevar com o tempo, principalmente nas grandes metrópoles brasileiras, o que provavelmente tornará a combustão com geração de energia elétrica ou vapor d’água, em unidades de grande porte, uma alternativa economicamente mais atraente que o aterro sanitário. Deve ser sempre lembrado que a disposição em aterros trata-se de um passivo ambiental para as gerações futuras.

Mundialmente já se observa uma forte tendência nesse sentido. Países com pequena disponibilidade de área adequada para a construção de novos aterros, a exemplo do Japão, Suíça e Cingapura, não somente exibem um grande número de incineradores em operação, mas têm apresentado uma tendência de crescimento desta forma de disposição dos RSU ao longo dos anos.

Isso tem ocorrido devido à incorporação, às novas unidades, de sistemas de recuperação de energia e de tratamento de gases de combustão eficientes, tornando-os mais interessantes do ponto de vista econômico e mais seguros do ponto de vista ambiental.

É importante notar que, mantidas as condições operacionais do incinerador em determinados valores de temperatura e concentração de oxigênio nos gases, os teores de compostos orgânicos voláteis são minimizados e a formação das dioxinas e dos furanos é fortemente inibida, mesmo com a presença de materiais que favoreçam a sua formação.

Em diversos países a combustão com geração de energia prevalece sobre a disposição em aterros e reciclagem, alcançando índices bastante significativos: o Japão incinera 72% dos resíduos sólidos municipais gerados; Bélgica, 25%; Suíça, 59%; Dinamarca, 90%; França, 42% e Alemanha, 36% (CEMPRE, 2002, apud CAIXETA, 2005).

Atualmente, há mais de 1.700 incineradores instalados no mundo que, a partir da queima em altíssimas temperaturas dos RSU, geram energia elétrica ou vapor d'água. Esses dois produtos são hoje obtidos, na sua maioria, em incineradores com combustão em grelha. Essas instalações são sempre construídas nas proximidades dos pólos consumidores de vapor para aquecimento ou de redes de distribuição de energia elétrica.

Uma usina com incineradores de grelha normalmente é composta de dois a três equipamentos de combustão operando em paralelo, cada um com capacidade variando de 50 a 1000 toneladas de resíduos por dia. Os gases ácidos de combustão, material particulado, dioxinas, furanos e metais pesados, eventualmente presentes, são removidos por sistemas de limpeza apresentando índices de eficiência bastante elevados.

Um relatório divulgado em junho de 2003, pela Agência de Proteção Ambiental da Inglaterra, concluiu que o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (RSU) encerra baixíssimos riscos à saúde da população, bem como ao meio ambiente, vizinhos às instalações desta natureza.

Suas emissões mais nocivas, as dioxinas e furanos, têm suas concentrações mantidas em níveis baixíssimos como resultado da operação de eficientes sistemas de limpeza de gases presentes nas plantas de tratamento térmico.

Nessa direção seguem estudos similares realizados por agências de proteção ambiental de outros países, a exemplo da Áustria, Alemanha e Dinamarca. Todas concluíram que a incineração de embalagens plásticas foi a solução mais econômica, ambientalmente segura e apta para o alcance das metas de implementação do desenvolvimento sustentável acordadas pelos países integrantes da União Européia, resultando na atualidade em reciclagem de 22,5% de todas as embalagens plásticas pós-consumo.

É importante ressaltar que o tratamento térmico de resíduos sólidos para geração de energia elétrica também contribui para a redução das emissões globais de gás carbônico. As tecnologias de limpeza de gases hoje presentes nos incineradores permitem atingir padrões de emissão abaixo dos exigidos pelas legislações mais restritivas e, contrariamente ao conceito geral existente, o tratamento térmico pode apresentar vantagens, em termos ambientais, em relação a outros meios de disposição, a exemplo de aterros.

Neste último, a matéria orgânica presente no resíduo, ao ser decomposta, libera gás metano que, se não queimado, tem um potencial 21 vezes maior que o gás carbônico em relação ao efeito estufa, além de emitir outros gases orgânicos que contribuem para a formação de compostos poluentes atmosféricos, bem como efluentes líquidos, especialmente o chorume, que pode contaminar os lençóis freáticos.

## **ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS**

As usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica podem reduzir o volume de resíduo municipal em aproximadamente 80%. A qualidade da queima do resíduo depende naturalmente do poder calorífico do combustível, neste caso, do poder calorífico dos resíduos sólidos municipais, e dos parâmetros de combustão. A energia gerada pela combustão dos resíduos sólidos é utilizada para alimentar turbinas para a geração de eletricidade.

Dempsey e Oppelt (1987) dividem um sistema de incineração de resíduos perigosos em quatro subsistemas: 1) preparação e alimentação do resíduo; 2) câmara(s) de combustão; 3) controle dos poluentes atmosféricos e 4) manuseio das cinzas/resíduos. A seleção da combinação e os arranjos apropriados para cada usina irão depender das propriedades físicas e químicas dos resíduos a serem incinerados. Essa configuração de usinas composta pelos quatro subsistemas também se aplica às unidades que utilizam os resíduos sólidos urbanos no processo.

Usualmente os resíduos são queimados em uma grelha (queima em massa) em plantas com capacidade que varia de 8 a 30 toneladas de resíduos por hora. Essas plantas possuem potência instalada entre 20 e 80 MW.

Mais recentemente novas tecnologias utilizam combustão em leito fluidizado circulante.

As plantas de tratamento térmico exigem um rigoroso controle do processo de combustão, pois o combustível pode ter grandes variações em suas propriedades como poder calorífico, umidade, composição e peso específico.

Devido ao fato de não ser conhecida a exata composição dos resíduos sólidos urbanos, além de sua constante variação e, de existir uma rigorosa legislação referente às emissões atmosféricas, as plantas de tratamento térmico de resíduos possuem sofisticados dispositivos de limpeza de gases e controle de emissões.

## GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E GERAÇÃO DE ENERGIA

Juntamente com a reciclagem e a compostagem, o reaproveitamento da energia derivada dos resíduos tem um papel importante no gerenciamento de resíduos e na recuperação de recursos.

As principais vantagens da recuperação da energia são:

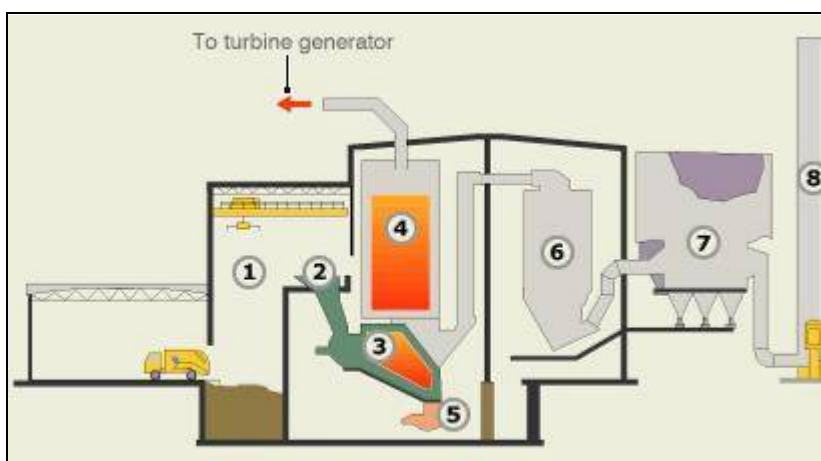
- Redução do volume de resíduos;
- Geração de resíduos inertes;
- Benefícios financeiros obtidos a partir dos resíduos;
- Desvio do fluxo de resíduos biodegradáveis;
- Um modo prático de gerenciar os aumentos na geração de resíduos.

## TRATAMENTO TÉRMICO

O processo de tratamento térmico está esquematizado na Figura 1, a seguir.

Em plantas de tratamento térmico, o lixo é descarregado no silo da usina (1) de onde é tomado por agarradores mecânicos e jogado em moegas (2). Das moegas o lixo é empurrado gradualmente para o interior do incinerador (3) que opera em temperaturas que costumam variar entre 750 e 1000 graus Celsius.

O calor produzido pela queima do lixo é utilizado em caldeiras (4) e o vapor gerado nestas é conduzido por tubulações para um sistema de turbina e gerador, para a produção de energia elétrica.



Fonte: National Energy Education Development Project, Museum of Solid Waste, Sept/2006

**Figura 1: Planta do tratamento térmico**

Depois de o resíduo sólido urbano ser incinerado resta sobre as grelhas as cinzas mais pesadas, que são drenadas para sistemas coletores situados abaixo das grelhas (5), passando após por separadores eletromagnéticos que promovem a extração de metais para reciclagem. Os gases de combustão contendo contaminantes sólidos e gasosos passam através de sistema de lavagem (6) para o tratamento e remoção de

poluentes ácidos como o SO<sub>2</sub> e também dioxinas. Os gases passam então por filtros para retenção de partículas finas (poeiras) (7) e são lançados ao meio ambiente através da chaminé (8).

Existem quatro rotas tecnológicas principais para o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos e uma nova rota tecnológica: a tecnologia arco de plasma, que se encontra em estudo e ainda é pouco difundida no mercado devido ao seu alto custo. Um resumo de cada tecnologia é descrito a seguir.

## COMBUSTÃO EM GRELHA

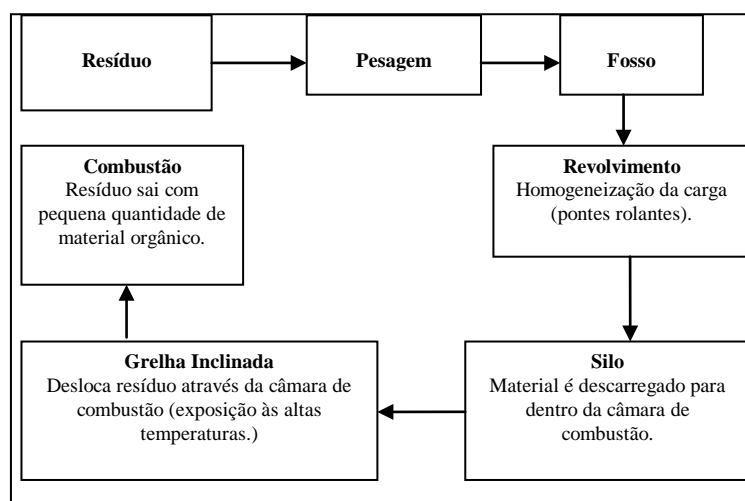
A técnica convencional de combustão de resíduos, chamada de tratamento térmico em massa, envolve a queima dos resíduos à medida que eles vão sendo enviados, após a retirada dos itens pesados. Normalmente é feita a mistura dos resíduos para ajudar a queima. No passado, as instalações para incineração eram projetadas com o único objetivo de processar os resíduos, mas as instalações atuais são de um modo geral, projetadas para recuperar a energia dos resíduos na forma de vapor, água quente ou eletricidade, sendo comum na Europa sua utilização em sistemas de aquecimento distrital.

A queima em grelhas é certamente a forma mais simples e comum de tratamento térmico. A rigor pode-se dividir este método de tratamento térmico em dois conceitos principais: (i) a queima massiva (MASS BURN) e (ii) queima de não recicláveis. Na primeira alternativa, o resíduo sólido urbano bruto é misturado sem operação de triagem para retirada de materiais recicláveis (ex: plásticos, madeira e papel). A energia presente nos RSU é recuperada dos gases de combustão em alta temperatura. Cerca de 100.000 toneladas/ano de resíduo sólido urbano são suficientes para garantir uma geração média de até 7 MWh, dependendo do poder calorífico do resíduo incinerado, suficiente para atender cerca de 10.000 domicílios de padrão Classe Média.

Na segunda alternativa, o resíduo sólido urbano passa por etapas de triagem e separação de recicláveis, restando apenas os resíduos orgânicos úmidos e materiais não aproveitáveis para serem incinerados. Neste caso, o resíduo sólido urbano incinerado apresenta poder calorífico mais baixo e seu rendimento para geração de energia reduz-se consideravelmente.

Um fluxograma simplificado do processo de combustão em grelha pode ser ilustrado na Figura 2.

Durante o deslocamento dos resíduos na grelha o material vai se aquecendo e passa por secagem, perda de compostos orgânicos voláteis, combustão do resíduo carbonoso e sai da câmara de combustão com uma pequena quantidade de material orgânico. Cerca de 60% do ar de combustão é introduzido por baixo da grelha e o restante entra sobre o material depositado na grelha. O ar injetado por baixo da grelha (pré-aquecido) tem a função de resfriar e auxiliar na secagem e combustão dos resíduos. O ar introduzido sobre a grelha tem alta velocidade para criar uma região de elevada turbulência e promover sua mistura com os gases e vapores gerados durante a combustão.



Fonte: Elaboração Engebio

**Figura 2: Fluxograma das operações para a combustão em grelha**

A temperatura recomendada é cerca de 1200 °C, temperatura na qual são decompostos a maior parte dos compostos orgânicos a gás carbônico e água.

Na combustão também é possível formar gases corrosivos (ácido clorídrico, outros compostos de cloro, etc.) por isso as tubulações metálicas próximas às grelhas devem ser revestidas com material refratário e a temperatura não deve ser maior que 420 °C.

Os gases da combustão, que saem numa temperatura de aproximadamente 250 °C são enviados para os sistemas de tratamento de gases para remoção dos gases ácidos, material particulado, dioxinas, furanos e eventuais metais pesados.

Ao fim da grelha a fração orgânica deve estar quase totalmente consumida restando apenas uma fração inorgânica, a cinza de fundo. As cinzas são apagadas em um tanque com água e desaguadas.

O vapor gerado é normalmente utilizado para a geração de energia e, em países de clima frio, para sistemas de aquecimento distrital.

## COMBUSTÃO EM LEITO FLUIDIZADO

A tecnologia de combustão em leito fluidizado é baseada em um sistema no qual os resíduos, adequadamente triturados, são incinerados em suspensão, dispersos em leito composto por partículas inertes como areia ou cinzas. Este leito é mantido em intensa movimentação promovida pelo insuflamento do ar primário de combustão através de um distribuidor especialmente dimensionado para este processo de queima, situado na base (fundo) da caldeira. O material em suspensão comporta-se similarmente a um fluido em ebulição, decorrendo daí a denominação “Leito Fluidizado” (LF).

Há diferentes conceitos de combustores de leito fluidizado, por exemplo, os de leito circulante e os borbulhantes. Em qualquer dos casos há a necessidade de que os resíduos a serem incinerados tenham tamanho relativamente uniforme e a granulometria do leito de inertes deve ser controlada.

Em comparação com a queima em grelha, os sistemas de combustão em leito fluidizado possibilitam a redução das emissões de gases, parcialmente devido ao próprio processo e, também, porque se pode acrescentar cal ou calcário ao leito simultaneamente à combustão.

Como aproximadamente um terço das despesas nas unidades de queima em grelha é derivado ao sistema de controle de poluição do ar (CPA), torna-se possível economizar já que os sistemas de leito fluidizado têm menores necessidades desses controladores.

Por outro lado, as usinas de queima em grelha não necessitam do pré-processamento dos resíduos. Com o desenvolvimento da queima em leito fluidizado circulante, as unidades incineradoras aumentaram em porte, resultando em ganhos de escala. Logo, os custos por tonelada de resíduos processados, em comparação à queima em grelhas não chegam a ser acentuadamente diferentes. Porém, para uma eficaz aplicação desta tecnologia, antes da operação de tratamento térmico dos resíduos sólidos, materiais componentes não-combustíveis são removidos e o resíduo sólido urbano passa por uma operação de trituração tendo em vista prepará-lo para a queima. O resíduo sólido urbano preparado desta forma recebe o nome de Combustível Derivado de Resíduo (CDR), que tem poder calorífico superior ao resíduo sólido urbano não tratado.

Devido ao fato de os sistemas de LF borbulhantes serem tipicamente menores, o seu uso torna-se mais apropriado para comunidades de menor porte. A necessidade de se processar previamente os resíduos para reduzir o seu tamanho e torná-los uniformes antes da combustão em uma usina de LF cria a oportunidade de maximizar a reciclagem dos materiais. Os metais podem ser separados dos outros resíduos à medida que são triturados, sofrendo redução de tamanho. Mas, esses resíduos metálicos devem ser mantidos limpos para que a reciclagem da maioria dos outros materiais seja bem sucedida e isto requer uma pré-seleção na fonte para que não haja a mistura.

O início da operação de um sistema de combustão em leito fluidizado é promovido por queimadores de óleo, situados acima do leito, que o aquecem até atingir uma temperatura de 400 °C. Neste instante inicia-se a alimentação dos resíduos sólidos que pode ser feita acima ou dentro do leito, a agitação intensa distribui os resíduos por todo o leito de maneira uniforme.



As partículas dos resíduos sólidos entram em contato com a areia, trocando calor, o que faz com que o sistema aqueça e entre em combustão rapidamente. Ao atingir a temperatura de operação (600 °C) os queimadores auxiliares são desligados e a queima passa a ser sustentada com a alimentação contínua do resíduo. As cinzas mais pesadas são retiradas por extratores mecânicos situados no fundo da caldeira e as cinzas leves são arrastadas e coletadas nos sistemas de limpeza de gases.

Os compostos orgânicos arrastados pelos gases em forma sólida ou gasosa são queimados na região superior do leito, conhecida como free-board. Após o free-board os gases são enviados para o sistema de recuperação de energia e tratamento de gases.

O leito fluidizado permite um pré-tratamento dos gases pela adição de calcário ao leito que reage com boa parte dos gases ácidos formados durante a combustão formando sais como sulfato de cálcio e cloreto de cálcio. O pré-tratamento alivia o sistema de limpeza de gases, mas não o elimina.

Apesar destas vantagens técnicas, o processo de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos por meio de combustão em leito fluidizado ainda não alcançou seu pleno desenvolvimento comercial, devido à sua maior complexidade operativa (requer controles mais sofisticados e operadores mais qualificados). A experiência comercial com esta tecnologia para o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos é, portanto, limitada e sua performance ainda requer etapas de desenvolvimento, para sua plena aceitação e ganho de competitividade. São poucos os detentores de tecnologias de tratamento térmico que oferecem a combustão em leito fluidizado e há experiências negativas, a exemplo de uma unidade instalada na cidade de Berlim que, há poucos anos, acabou sendo fechada por apresentar problemas de pouca confiabilidade.

### CDR - COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO

A produção de Combustíveis Derivados de Resíduo (CDR) não é um processo recente. Esse método foi inicialmente desenvolvido como um meio de evitar-se a queima imediata dos RSU e, em vez disso, transformá-los em um combustível que pudesse ser transportado e armazenado. A produção de CDR possibilita a subsequente conversão térmica de resíduos combustíveis.

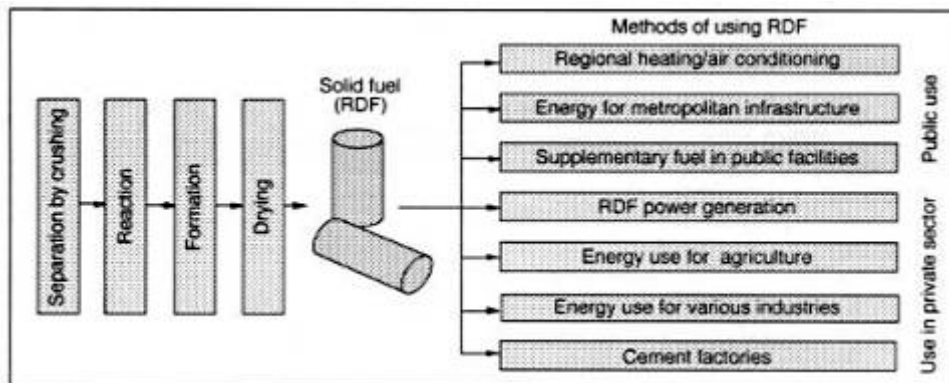
No caso da queima em grelha não há uma grande necessidade de classificação ou de processamento dos resíduos, entretanto, para a produção de CDR é aconselhável que os resíduos passem por uma série de estágios de processamento prévio.

Em sua forma mais simples, o CDR se apresenta como um material bruto na forma de flocos, produzido a partir de RSU de origens diversas que passaram por uma série de estágios de classificação e remoção magnética de materiais ferrosos e não ferrosos. Alternativamente, pode haver processos adicionais que transformarão o CDR em um combustível adensado e pelletizado (ou em forma de cubos), como pode ser visto na Figura 3, o que facilitará o transporte e a estocagem. A transformação dos resíduos em CDR bruto ou pelletizado difere da queima em grelha convencional por ser feita em dois estágios, onde o primeiro estágio de processamento pode ser conduzido de forma independente em relação ao estágio de queima. Este último poderá acontecer em um local diferente e a qualquer hora. Um exemplo de processo de tratamento de RSU para obtenção de CDR está apresentado na Figura 4.



Fonte: RMA Publications, 2009.

**Figura 3: Resíduo transformado em CDR**



Fonte: Ministry of the Environment – Government of Japan (1998)

**Figura 4: Processo de obtenção do CDR**

## GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE

A gaseificação é o processo de reação do carbono com o vapor para produzir hidrogênio e monóxido de carbono. A gaseificação converte uma matéria-prima sólida ou líquida em gás por meio da oxidação parcial, sob a aplicação de calor.

A pirólise é um processo formado por uma série de reações complexas, iniciadas quando um material é aquecido (de 400 a 800 °C), na ausência de oxigênio, para produzir correntes de vapores condensáveis e não condensáveis e resíduos sólidos. O calor fraciona a estrutura molecular dos resíduos, liberando compostos de carbono na forma líquida, sólida e gasosa, que poderão ser utilizados como combustíveis.

Ambas as tecnologias foram primariamente usadas para fontes específicas - e geralmente únicas - de resíduos não misturados, como pneus e plásticos, ou então para se processar os CDR. Entretanto, na Alemanha, uma usina de pirólise vem processando resíduos municipais desde 1985. Em 1983, na cidade de Günzburg, na Bavária, a empresa municipal de limpeza urbana, utilizando projetos e equipamentos da Deutsche Babcock (empresa já extinta) recebeu autorização para que sua usina entrasse em operação. Esta planta está em atividade permanente desde 1985.

Os resíduos triturados são colocados em um tambor rotativo aquecido por chamas de gás, onde as temperaturas variam de 400 °C a 500 °C. O gás passa por um separador ciclônico para a remoção das partículas brutas e então é direcionado para uma câmara de pós-combustão onde a temperatura é de 1200 °C. Atualmente, a despeito do exemplo citado acima, os sistemas de pirólise e de gaseificação não são considerados próprios para processar grandes volumes de RSU não tratados e misturados.

## TECNOLOGIA ARCO DE PLASMA

A tecnologia arco de plasma também conhecida como plasma pirólise consiste em um processo de decomposição química por calor na ausência de oxigênio. Esta é uma tecnologia dedicada à destruição dos resíduos que associa as altas temperaturas geradas pelo plasma com a pirólise dos resíduos.

As propriedades de um gás sofrem mudanças significativas quando este gás é submetido a temperaturas muito elevadas. Quando a temperatura de aquecimento atinge cerca de 2.000 °C as moléculas do gás começam a dissociarem-se em estado atômico. Quando atinge 3.000 °C os átomos são ionizados devido à perda de parte dos elétrons. Este gás ionizado é chamado de plasma.

O plasma é conhecido como o “quarto estado da matéria”: sólido, líquido, gasoso e plasma, é uma forma especial de material gasoso que conduz eletricidade. No estado de plasma o gás atinge temperaturas extremamente elevadas, variando de 5.000 °C a 50.000 °C de acordo com as condições de geração, tipicamente as temperaturas do plasma são da ordem de 15.000 °C. O gás sob o estado de plasma apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado a um gás no estado normal.



O plasma é gerado pela formação de um arco elétrico através da passagem de corrente entre o cátodo e o ânodo. Podem ser utilizadas tanto a corrente contínua como a corrente alternada, mas até o momento a predominância é da utilização de corrente contínua. O plasma é gerado e controlado em tochas de plasma que possuem o mesmo formato dos queimadores utilizados nos fornos.

A tocha de plasma é um dispositivo que transforma energia elétrica em calor transportado por um gás. As tochas podem ser de dois tipos: arco não transferido ou arco transferido. O arco é dito não transferido quando é produzido no interior do dispositivo de geração que contem os eletrodos e do qual sai o gás aquecido, pode ser de corrente contínua ou corrente alternada. As tochas de arco transferido utilizam um eletrodo emissor, estando o receptor do arco localizado fora da tocha, podendo ser outro eletrodo ou o material sob aquecimento interligado ao circuito através de um eletrodo, estas tochas utilizam corrente contínuas. A eficiência de transformação da tocha de plasma é da ordem de 85% a 90% da energia elétrica utilizada.

Num processo de queima de resíduos sólidos urbanos o resíduo é termicamente decomposto em gás combustível numa fornalha vertical ("shaft").

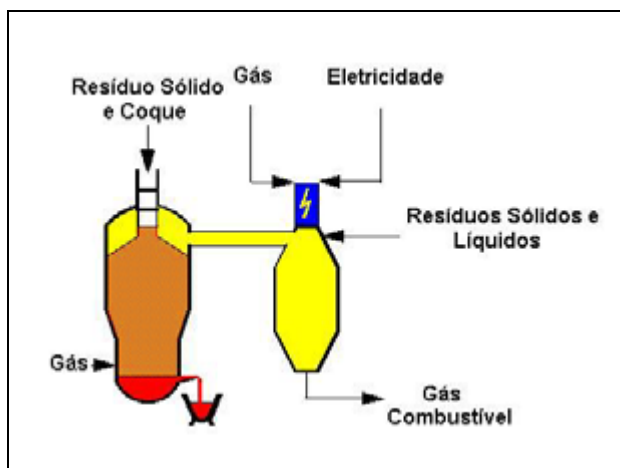
O resíduo sólido é alimentado na fornalha por meio de um sistema de alimentação de câmaras estanques ("lock hopper"). Ar pré-aquecido, enriquecido ou não com oxigênio, é injetado na base da fornalha para alimentar a combustão de parte do material, sob a forma carbonizada neste ponto do equipamento.

Os gases de queima são conduzidos para um reator de decomposição térmica a plasma, onde são totalmente decompostos, tendo ao final como constituintes, basicamente, hidrogênio e monóxido de carbono. A queima do resíduo é acompanhada da vitrificação do material inorgânico no fundo da fornalha. Na concepção deste processo nenhuma corrente resultante da queima pode deixar o sistema sem ser exposta a elevadas temperaturas, quer seja a escória vitrificada ou os gases da decomposição.

Os gases e os sólidos fluem contracorrente através da fornalha. A escória fundida escoar pela base a cerca de 1450 °C enquanto que o gás, inclusive hidrocarbonetos e outras substâncias orgânicas parcialmente decompostas, sai pelo topo da fornalha entre 600 °C e 800 °C. Este gás é misturado com ar aquecido a plasma no reator de decomposição, onde é completamente destruída a matéria orgânica remanescente, produzindo um gás combustível a cerca de 1200 °C a 1400 °C. A Figura 5 mostra esquematicamente este processo de gaseificação.

As principais vantagens do uso de plasma na decomposição térmica de substâncias são as elevadas temperaturas causam rápida e completa pirólise da substância orgânica, permitindo fundir e vitrificar certos resíduos inorgânicos; os resíduos/produtos vitrificados são similares a um mineral de alta dureza; o processo permite reduções de volume extremamente elevadas, podendo ser superiores a 99%.

O uso de plasma na decomposição térmica de substâncias é uma técnica dedicada, exigindo um grande investimento; o volume de gases inicialmente gerado é mais baixo do que na combustão convencional, mas depois da combustão dos gases produzidos, é idêntico ao de outras formas de incineração; o sistema não dispensa um sofisticado sistema de lavagem de gases, tal como incineradores.



Fonte: Martin GmbH (2009)

**Figura 5: Fluxograma esquemático de gaseificação**

No que diz respeito à produção de dioxinas e furanos, os sistemas estão dependentes das tecnologias de recuperação térmica utilizada a jusante, não sendo claro que se possa garantir inequivocamente uma vantagem nítida sobre as tecnologias de incineração mais avançadas nem com as técnicas mais simples de gaseificação. As técnicas de incineração por plasma não parecem ter alcançado grande desenvolvimento industrial. Segundo Jonathan Strickland (2008), existem somente duas indústrias de plasma comerciais que processam RSU e elas estão instaladas no Japão.

A indústria situada no parque industrial Mihama-Mikata começou a operar em 2002. Ela pode processar mais de 24 toneladas por dia de RSU e quatro toneladas por dia de lodo de tratamento de esgoto. A indústria é relativamente pequena e não produz gás de síntese para combustível. Entretanto, ela produz vapor e água quente, que são usados como energia e geração de calor no parque industrial. A indústria usa um sistema de resfriamento a água para a escória fundida e separa os nódulos de metal para vendê-los como sucata. A areia é misturada com o concreto para ser usada em blocos de pavimentação.

A outra indústria de gaseificação por plasma fica em Utashinai, Japão. Também começou a processar RSU em 2002. O desenho original da aparelhagem determinou sua capacidade em torno de 170 toneladas por dia de RSU e de resíduos automotivos. Hoje o aparelho processa aproximadamente 300 toneladas por dia. O aparelho gera mais de 7,9 MWh de eletricidade, enviando aproximadamente 4,3 MWh de volta à rede elétrica.

Os métodos por plasma na prática estão ganhando importância na fusão de sucata de metais e ligas, alumínio contido nos rejeitos, lamas de eletrodeposição, recuperação de metais de catalisadores gastos e cinzas de incineração, processos para tratamento de líquidos orgânicos, inclusive organoclorados.

No Japão o plasma é usado para fundir cinzas de incineração e conseqüentemente reduzir o volume descartado; na França, cinzas de incineração e asbesto são transformados pela tecnologia de plasma em escória inerte; nos Estados Unidos da América, está sendo empregado para recuperar metais de catalisadores e também vem crescendo em importância desenvolvimentos para destruição de resíduos militares e recuperação de zinco metálico de poeiras siderúrgicas.

## **INSERÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS JUNTO AO PÚBLICO**

A exemplo do que ocorre em outros países, o Governo Inglês está revendo as estratégias relativas ao tratamento a ser dado ao Lixo Urbano. Entre as propostas em curso está o plano de aumentar a participação do tratamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos, para a redução de seu lançamento em aterros.

Este trabalho revelou que cerca de 9% do Lixo Urbano gerado na Inglaterra está sendo hoje incinerado. A região sudeste é a que detém a menor participação do tratamento térmico: menor do que 1%. O meio oeste é a

região onde mais se pratica a incineração, alcançando cerca de 31% do resíduo gerado. A grande maioria do Lixo Urbano ainda é disposto em aterros, cerca de 72% dos 29,1 milhões de toneladas produzidas anualmente. Correntes ambientalistas afirmam que o tratamento térmico estimula a produção de resíduo porque as operadoras de incineradores necessitam de quantidades mínimas de resíduo para a manutenção das plantas em operação. Para atender estas demandas, dizem estes, as autoridades locais abandonam os programas de reciclagem e de diminuição da produção de RSU.

O Governo inglês contrapõe estas afirmativas demonstrando por meio de estatísticas que reciclagem e compostagem cresceram de 3,3% para 19% nos últimos anos.

Sem dúvida, a maior preocupação da população em geral, quando o assunto é o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos, fica por conta da poluição causada pelas emissões de gases, vapores e poeiras através das chaminés das Unidades de tratamento térmico. Logicamente, a maior preocupação está centrada nas emissões de Dioxinas, principalmente pela suspeição de que seriam causadoras de câncer.

Por outro lado, a adoção de legislação mais restritiva pela União Européia, desde 1996, forçou o fechamento de plantas de tratamento térmico mais antigas por não terem condições de atender aos novos padrões de emissão estabelecidos.

Mas afinal de contas, “quais seriam os benefícios do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos?” Perguntaria a população. Poder-se-ia argumentar que na grande maioria das plantas de tratamento térmico o calor gerado é utilizado para a produção de energia elétrica. Se o resíduo não for queimado então será, muito provavelmente, lançado em algum aterro, o que é considerada a menos amigável solução sob o ponto de vista ambiental.

Correntes ambientalistas argumentam que embora os incineradores possam produzir energia elétrica, no longo prazo estas plantas não economizam energia porque o resíduo incinerado não é reciclado. Isto é, mais matérias primas terão que ser produzidas para repor os materiais queimados.

Atualmente, cerca de 17% do resíduo da União Européia é incinerado. Na Dinamarca, que é vista como uma das nações européias com maior conscientização ambiental incinera-se aproximadamente 53% do Resíduo Urbano produzido. Por outro lado, alguns países, entre eles Irlanda e Grécia, não possuem plantas de tratamento térmico.

## PRINCIPAIS POLUENTES RESULTANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RSU

Os principais poluentes resultantes do tratamento térmico de resíduos domiciliares são descritos a seguir.

**Gases** – gases ácidos (tais como Ácido Clorídrico, Ácido Fluorídrico e Dióxido de Enxofre), e outros gases como Óxidos de Nitrogênio (NOx), Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) são gerados e devem ser removidos pelos sistemas de limpeza dos gases.

**Metais** – em particular Cádmio, Mercúrio, Arsênico, Vanádio, Cromo, Cobalto, Cobre, Chumbo, Manganês, Níquel e Tálcio, entre outros. Estes estão presentes como compostos solúveis (como cloretos e sulfatos), e compostos menos solúveis (como óxidos e silicatos). Mercúrio e algum Cádmio são emitidos em forma de vapor.

**Substâncias Orgânicas** – estas ocorrem frequentemente quando a combustão não é completa, ou são formadas após a incineração. Os compostos orgânicos podem ser emitidos na forma de vapor ou aderidos ao material particulado (poeiras) arrastado pelos gases de combustão. As dioxinas são os poluentes orgânicos que motivam as maiores preocupações (conforme apresentado no item 3.3.1, a seguir).

**Materiais Particulados** – partículas finas (quase sempre materiais inorgânicos como Sílica), frequentemente com metais e compostos orgânicos em suas superfícies. Estas apresentam grandes variações em seus tamanhos e normalmente são retidas sem muita dificuldade. Mas recentemente as preocupações voltaram-se para as partículas ultrafinas, menores do que 10 microns (10 milionésimos de metro), conhecidas como PM<sub>10</sub>, cuja remoção requer tecnologias mais sofisticadas.

## SISTEMAS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR (SCPA)

As emissões gasosas devido ao processo de combustão são constituídas por substâncias em concentrações muito acima das permitidas pela legislação, por este motivo essas plantas requerem um tratamento físico-químico avançado para neutralizar os poluentes gerados. De forma geral um sistema para depuração dos gases é constituído por unidades para lavagem ácida de halogênios, lavagem alcalina, lavagem de aerossóis e filtros de manga.

Um sistema de controle da poluição do ar deve contemplar o conjunto de equipamentos, a tecnologia empregada, os procedimentos de operação, a manutenção e o monitoramento para que as emissões atmosféricas de uma unidade de combustão de resíduos sólidos atendam aos níveis estabelecidos pelas normas pertinentes e aceitáveis do ponto de vista ambiental (GRIPP, 1998).

Os equipamentos de controle de poluição do ar utilizados para tratar as emissões atmosféricas da combustão são agrupados em função das frações das emissões (gases ácidos, orgânicos ou material particulado). As tecnologias empregadas no processo de incineração também fazem parte do controle da poluição do ar, uma vez que técnicas podem ser aplicadas visando melhor desempenho na combustão de resíduos e diminuição das emissões gasosas, sem que necessariamente sejam empregados equipamentos específicos para o tratamento dos gases.

Além dos equipamentos de controle das emissões gasosas e das tecnologias utilizadas, a eficácia de um sistema de controle de poluição do ar requer um monitoramento contínuo, não apenas das emissões atmosféricas como também da operação do incinerador. Para isso um sistema de monitoramento contínuo deve ser instalado e equipado para medir e gravar os vários parâmetros, para que estejam em conformidade com as normas legais vigentes e que não afetem a qualidade do ar e conseqüentemente a saúde da população.

Os Sistemas de Monitoramento Contínuo (SMC) são requeridos ou utilizados na medição contínua dos gases de combustão: CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC; recentemente tem-se utilizado também monitores para HCl e opacidade (DEMPSEY e OPPELT, 1987).

De acordo com a legislação canadense CCREM (apud GRIPP, 1998), no sistema de controle de poluição do ar, quando a temperatura de operação é baixa (temperatura de entrada no dispositivo de controle do material particulado na faixa de 140 °C), a eficiência da remoção do material particulado é alta e é garantida a condensação de traços orgânicos e substâncias metálicas. Ao controlar as emissões de certos contaminantes como material particulado, HCl, CO e dioxinas e furanos, pode-se inferir que os níveis de emissão de outras substâncias como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, Pb, Cd, Hg, As e Cr estarão dentro dos níveis aceitáveis de emissão. Condições adequadas de operação da incineração e do sistema de controle de poluição do ar garantirão baixos níveis de emissão. Também, ao melhorar as taxas de remoção de material particulado, haverá redução das emissões de traços orgânicos que aderem às superfícies das partículas.

## RESÍDUOS SÓLIDOS DO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO

As cinzas são subprodutos do tratamento térmico e constituem-se da porção inorgânica e da matéria não-combustível presente nos RSU. Durante o processo de tratamento térmico são gerados dois tipos de cinzas: as de fundo denominadas por alguns autores como cinza pesada, cinza de fundo ou escória e as cinzas suspensas retidas pelo sistema de controle das emissões gasosas, também denominadas de cinza leve ou cinzas volantes. As primeiras correspondem de 75% a 90% de toda cinza gerada dependendo do tipo de instalação e do tipo de combustível (resíduo sólido domiciliar, resíduo sólido dos serviços de saúde, resíduo sólido industrial ou outros). Este percentual somente se altera significativamente em incineradores que empregam o princípio da combustão em leito fluidizado, para a qual o resíduo sofre uma prévia trituração e na qual a velocidade dos gases de combustão é mais alta. Com isso, incineradores de leito fluidizado requerem sistemas de coleta de poeiras mais robustos e eficientes, pois mais de 50% dos sólidos poderá estar sendo transportado nos gases de combustão, na forma de materiais particulados.

Outro aspecto a ser considerado em relação aos resíduos sólidos da queima refere-se à temperatura em que se processa a incineração. Na queima em grelha as temperaturas são mais elevadas, com grande parte do material residual sólido resultando fundido e/ou sinterizado, diferentemente dos incineradores que empregam o princípio

do leito fluidizado, nos quais a temperatura de combustão normalmente não ultrapassa os 900 °C, o que resulta em resíduos sólidos pulverulentos e calcinados, sem praticamente ocorrer fusão ou sinterização de cinzas.

As diferenças entre as condições de queima influenciam decisivamente nas propriedades físicas e químicas das cinzas, fazendo com que sua reatividade e, conseqüentemente, potencialidade para impactação ambiental sejam distintas.

A maior preocupação quanto à disposição final das cinzas está relacionada aos metais pesados e outros materiais orgânicos não destruídos.

## DESTINAÇÃO E VALORIZAÇÃO DAS CINZAS

As cinzas geradas durante o processo de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos e de seu sistema de tratamento de gases (cinza, de fundo e cinza volante respectivamente) podem torna-se uma fonte de poluição, sendo, portanto necessários cuidados quanto a sua destinação, tanto para disposição em aterros como para a valorização.

Quando destinados à disposição final em aterros estes devem atender a exigências normativas conforme a classe em que os resíduos são enquadrados.

Existem estudos e aplicações de destinação com valorização e descrevem-se a seguir alguns, a título de exemplo.

- Nos Estados Unidos há um crescente interesse em aplicações marítimas, como na prevenção de erosão de áreas costeiras e construção de recifes artificiais. Na Alemanha, metade das cinzas que vão para o fundo do incinerador (resíduos da queima) é usada como material utilizado na construção de estradas e fabricação de barreiras à prova de som.

- Na Holanda, pretende-se usar 80 por cento de todos os subprodutos do incinerador de RSM. Atualmente, 40 por cento das cinzas captadas pelo equipamento de controle de poluição são usados como agregado para asfalto. Cerca de 60 por cento das cinzas do fundo dos incineradores (mais de dois milhões de toneladas por ano) já são utilizadas como base para estradas, aterros e como agregado para concreto. Na Dinamarca, as cinzas de fundo vêm sendo utilizadas desde 1974. Quase três quartos (72 por cento) são usados como sub-base em estacionamentos, ciclovias e estradas. (KOMPAC & KOGENERGY, 2005, p. 4).

Como exemplos de utilização de resíduos sólidos de usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos, na França 50% da produção anual de cinzas de fundo é submetida ao processo de valorização e utilizada na pavimentação de rodovias e na cobertura de fossas e aterros, sendo utilizadas na cidade de Toulouse, desde 1926 (BUREAU DE RECHERCHE GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES, 2004)

Ainda a título de exemplo, 21 mil toneladas de cinzas de fundo foram utilizadas na construção da estação de metrô ao lado do Stade de France, em Saint-Denis, e 117 mil toneladas foram utilizadas na construção da Eurodisney (MIQUEL e POIGNANT, 1999).

Um estudo detalhado (QUINA, 2005) foi realizado com cinzas volantes produzidas em usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos implantadas em Portugal, concluindo que os métodos de solidificação/estabilização (S/S) imobilizam eficazmente os metais pesados, porém os sais solúveis são susceptíveis de serem libertados em quantidades significativas. Esse estudo destaca que é tecnicamente possível o uso de cinzas volantes na produção de materiais cerâmicos, desde que os agregados leves produzidos apresentem características comercialmente aceitáveis, o que limita o uso de quantidades elevadas de resíduo. Conclui também que o impacto ambiental dos agregados leves produzidos laboratorialmente, com incorporação de resíduo, não é relevante ao nível dos processos de lixiviação.

Na Comunidade Européia não existe uma posição comum sobre o nível de periculosidade destes materiais residuais. Por isso, os diferentes atos legislativos de cada Estado-Membro da Comunidade Européia têm gerado diferentes classificações destes materiais, conduzindo a níveis diferenciados de valorização (NUNES, 2004).

No cenário da Comunidade Européia, assim como no Brasil, existem normas e legislações que contemplam a caracterização e sistemas de destinação destes resíduos.



A Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos e engloba o tratamento térmico de resíduos sólidos de origem urbana, considerando que as cinzas volantes e escórias provenientes do processo de tratamento térmico, devem ser consideradas, para fins de disposição final, como resíduos Classe I – Perigoso, e que o órgão ambiental poderá autorizar a disposição destes como resíduos Classe II A (não perigoso, não inerte) e Classe II B (não perigoso, inerte), se comprovada sua inertização pelo operador.

A NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação, não define uma classificação específica para as cinzas volantes e escórias da combustão de RSU e, também permite que o gerador dos resíduos perigosos possa demonstrar que um resíduo em particular apresenta ou não características de periculosidade especificadas nesta norma.

No Estado de Minas Gerais a Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009, dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos, porém não menciona os resíduos sólidos gerados por processos de valorização térmica de resíduos sólidos urbanos.

Na União Européia, a Decisão da Comissão nº 2000/532/CE, de 3 de maio de 2000, estabelece uma lista de resíduos em conformidade com a alínea a) do artigo 1º da Diretiva 75/442/CEE e identifica os resíduos que são considerados perigosos. Conforme esta Decisão, as cinzas volantes e escórias (cinza de fundo) são consideradas como resíduos perigosos somente quando estas contiverem substâncias perigosas. Permite ainda, aos Estados – Membros decidir, com base em informações fornecidas pelo gerador dos resíduos, que um determinado resíduo indicado como perigoso não apresenta características de periculosidade.

A Circular 94-IV-1, de 9 de maio de 1994, do Ministério do Meio Ambiente da França, relativa à eliminação de cinzas de fundo de usinas de tratamento térmico de resíduos urbanos regulamenta os procedimentos para valorização e eliminação de cinzas de fundo.

Para os resíduos gerados pelas usinas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (cinzas volantes e cinzas de fundo), quando a destinação for definida como a disposição final em aterros, a classe dos resíduos é determinante para a definição do tipo de aterro, devendo ser garantida a sua disposição em locais em conformidade com a legislação e normas específicas para tal.

Quando estes resíduos forem destinados para valorização (requalificação do resíduo sólido como subproduto ou material de segunda geração por meio da reutilização, reciclagem ou do tratamento para outras aplicações) a classificação dos resíduos não é mandatória, pois neste caso, deverá ser analisada individualmente cada solução de valorização e, aplicadas normas, padrões e legislações específicas ao tipo de valorização prevista.

## **IDENTIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS NO BRASIL E NO MUNDO – ESCALAS INDUSTRIAL OU PILOTO**

### **Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos no Brasil**

No Brasil, o primeiro incinerador foi construído na cidade de Manaus, em 1896, pelos ingleses e tinha capacidade para processar 60 t/dia de resíduo doméstico. Foi desativado em 1958 por não mais atender às necessidades locais e por problemas de manutenção. Em São Paulo, em 1913, foi instalado um incinerador especial, com capacidade para 40 t/dia de resíduo, provido de um sistema de recuperação de energia (uma caldeira e um alternador), que devido a problemas de adaptação à rede elétrica foi desativado e substituído por motores elétricos convencionais. Este último foi desativado em 1949 e demolido em 1953 (CETESB, 1997).

As tecnologias tanto desses primeiros incineradores municipais no Brasil, quanto daqueles que foram instalados em São Paulo em 1959 e 1967, na região de Vergueiro e no Bom Retiro, respectivamente, eram antigas e não atendiam aos padrões de controle de poluição exigidos pela legislação vigente (LIMA, 1985).

Na década de 1950, com o surgimento da construção de prédios de vários pavimentos nas cidades de maior porte foram implantados vários incineradores prediais para queimar o resíduo gerado nos apartamentos, porém foram banidos entre 1969 e 1970 por não possuírem nenhum controle do processo de incineração.

De acordo com Gripp (1998) o tratamento térmico de resíduos sólidos domiciliares no Brasil é praticamente inexistente e apenas os incineradores de Vergueiro e Ponte Pequena funcionavam, cada um, com capacidade de

300 t/dia. Ambos incineraram em 1993 um total de 73.000,00 t de resíduos, sendo 28.000,00 t de RSU, que correspondiam a 1,16% dos resíduos sólidos domésticos tratados e/ou dispostos no município de São Paulo.

Os primeiros incineradores no Brasil se enquadravam dentro da primeira geração, com tecnologia ultrapassada, cuja função principal das plantas era reduzir o volume do resíduo, sendo que os gases gerados eram lançados diretamente na atmosfera, sem tratamento. Nos dias atuais, diante das exigências da legislação ambiental e da mobilização da opinião pública por meio de entidades ambientalistas, são inconcebíveis tais sistemas.

A implantação de incineradores atualmente no Brasil teve maior projeção para o tratamento de resíduos classificados como especiais (aeroportuários, hospitalares e industriais). Com isso, verifica-se que o tratamento térmico no país ainda se caracteriza pela grande quantidade de incineradores de pequeno porte, instalados principalmente em hospitais, os quais operam de forma precária, sem manutenção adequada e sem controle das emissões atmosféricas.

No Brasil o processo de tratamento térmico ganhou o conceito de poluidor, nocivo à saúde e prejudicial ao meio ambiente devido ao uso de equipamentos obsoletos ou à operação e manutenção inadequadas. Esta visão negativa ainda é marcante para grande parte da população brasileira. Como no Brasil a imagem dos incineradores ainda é associada a potenciais fontes de poluição, o processo de tratamento térmico para o tratamento de RSU não tem sido incluído nos programas de gerenciamento dos resíduos sólidos.

Para Menezes et al. (2000), enquanto a tendência mundial é aproveitar os resíduos urbanos para a geração de energia, no Brasil não existem projetos representativos que promovam a reciclagem, considerando o uso do biogás e do resíduo em termelétricas, o que contribuiria para equacionar dois problemas: o ambiental, com o tratamento dos resíduos, e o de geração de energia.

#### Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos no mundo

Em vários países o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia prevalece sobre a disposição em aterros e sobre a reciclagem, alcançando índices elevados como mostra a Tabela 1. No Japão, onde são escassas as áreas adequadas para construir aterros sanitários, a tendência é que cresça o número de unidades de tratamento térmico de resíduos. Isto ocorre também em função do desenvolvimento de novas tecnologias para a recuperação de energia e para o tratamento dos gases de combustão, tornando as unidades econômica e ambientalmente mais viáveis (MENEZES et al., 2000).

**Tabela 1: Destino dos resíduos em alguns países**

PAÍS	ATERROS SANITÁRIOS (%)	USINAS TRIAGEM E COMPOSTAGEM (%)	INCINERADORES (%)
Alemanha	72	3	25
Bélgica	62	9	29
Dinamarca	37	7	56
Espanha	76	16	8
França	50	20	30
Holanda	50	20	30
Inglaterra	90	1	9
Itália	56	10	34
Japão	24	4	72
Suécia	35	10	55
Suíça	6	6	88

Fonte: [www.conecteeducacao.com/2008](http://www.conecteeducacao.com/2008)

O tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos vem sendo praticado por diversos países visando principalmente a redução de volume, face aos problemas de disponibilidade de área, e de periculosidade dos resíduos. No Japão o percentual de RSU incinerado chega a 80% e, apenas em Tóquio, funcionavam 13 usinas até 1994 (IPT/CEMPRE, 1995).

Para Lima (1985), persistindo a crise energética no mundo e desenvolvendo-se tecnologias para melhorar o aproveitamento do poder calorífico do resíduo sólido urbano, os processos de tratamento térmico com recuperação de energia tenderão a dominar o mercado do tratamento do resíduo urbano.

Uns dos primeiros incineradores destinados a queima dos RSU, ou o primeiro utilizando-se de técnicas ainda rudimentares e de operações simples, foi instalado na cidade de Nottingham, na Inglaterra em 1874. Nos USA o primeiro incinerador com geração de vapor foi construído em Nova York, em 1905, ocorrendo um rápido crescimento com mais 200 unidades instaladas até 1920.

Segundo Gripp (1998) cerca de 94% dos incineradores dos EUA, com capacidade maior que 500 t/dia, têm sistemas de recuperação de energia e a maioria em operação é do tipo Mass Burn – MB (queima direta sem triagem). Menezes et al. (2000) também afirmam que em países desenvolvidos como a Alemanha, Japão, Suíça e outros, onde o percentual de incineração é elevado, muitas plantas foram construídas recentemente, outras estão em construção, principalmente para a geração de energia. Para Suíça e Japão a projeção é que tenham, brevemente, 90% de seus resíduos processados em plantas de tratamento térmico.

Desde 1989 a Comunidade Econômica Européia (CEE) conta com legislação específica para fins de redução da poluição atmosférica proveniente das instalações de tratamento térmico de resíduos urbanos: a Diretiva n.º 89/369/CEE, trata das novas instalações e a Diretiva n.º 89/429/CEE, refere-se às instalações existentes. Atualmente em vigência, a Diretiva n.º 2000/76/CE visa melhorar o controle de emissões dos processos de incineração e co-incineração, fixando valores limite para emissões atmosféricas, bem como para as descargas de água.

Conforme já relatado, na União Européia, a Decisão da Comissão n.º 2000/532/CE, de 3 de maio de 2000 estabelece uma lista de resíduos em conformidade com a alínea a) do artigo 1º da Diretiva 75/442/CEE e identifica os resíduos que são considerados perigosos. Conforme essa Decisão, as cinzas volantes e as cinzas de fundo são consideradas como resíduos perigosos somente quando estas contiverem substâncias perigosas. Permite, ainda, aos Estados – Membros possam decidir, com base em informações fornecidas pelo gerador dos resíduos, que um determinado resíduo indicado como perigoso não apresenta características de periculosidade. Apenas a título ilustrativo seguem apresentadas algumas fotos de Centrais de Tratamento Térmico de Resíduos Urbanos:



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 6: Usina LIPOR II – Portugal**



Fonte: CNIM (2009)

**Figura 7: Centro de triagem**





Fonte: Von Roll Inova (2009)

**Figura 8: Usina East Liverpool – USA**



Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 9: Usina em Amsterdã, Holanda**





Fonte: Martin Gmbh (2009)

**Figura 10: Usina em Milão, Itália**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 11: Resíduo final inerte**



Fonte: Energy Products of Idaho (2009)

**Figura 12: Fosso para despejo dos detritos sólidos urbanos**

## COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO TÉCNICA E AMBIENTAL DOS PROCESSOS IDENTIFICADOS

Na prática, os processos identificados como comercialmente disponíveis e potencialmente adotáveis para a implantação de Plantas de Incineração de Resíduos Urbanos podem ser divididos em duas rotas tecnológicas principais: Queima em Grelhas e Queima em Leito Fluidizado, sendo que esta última poderá seguir dois diferentes conceitos, que são leito borbulhante e leito circulante, em função do porte da instalação.

Quatro variáveis operacionais determinam as principais diferenças de comportamento de desempenho ambiental entre estas rotas tecnológicas.

- Pressão de fornalha;
- Temperatura de combustão;
- Velocidade superficial dos gases na caldeira;
- Grau de preparação dos resíduos para a incineração.

### Pressão de fornalha

As plantas de tratamento térmico que empregam a combustão em grelhas operam em depressão, ou seja, com pressão de fornalha levemente inferior à atmosférica. Com isso, simplificam-se os sistemas de alimentação de RSU para o incinerador e retirada de cinzas, bem como se tornam remotas as possibilidades de vazamentos de gases em qualquer ponto da planta, garantindo a exaustão destes somente pela chaminé, após todos os tratamentos necessários à remoção de gases e partículas poluentes.

Por outro lado, plantas que operam segundo o princípio de combustão em leito fluidizado, por trabalhar com pressões positivas (levemente acima da atmosférica), requerem sistemas de alimentação de combustível e retirada de cinzas mais sofisticados, tendo em vista conferir estanqueidade à fornalha e impedir a fuga de gases de combustão, que se trata de um risco inerente a plantas de combustão fluidizada.

Para garantir boa performance destes sistemas de alimentação e/ou retirada de sólidos, o resíduo a ser incinerado requer preparação prévia, tendo em vista controlar natureza e tamanho das partículas de resíduos a serem incinerados e minimizar os riscos operacionais.

Esta diferença entre os dois conceitos de tratamento térmico determina uma maior complexidade das plantas de leito fluidizado e, conseqüentemente, investimentos específicos superiores aos normalmente observados em plantas que empregam princípio de queima em grelhas.

### **Temperatura de combustão**

Enquanto a combustão em grelhas móveis se realiza em temperaturas entre 1200 °C e 1500 °C, as plantas que operam em leito fluidizado promovem a combustão em temperaturas que oscilam entre 800 °C e 1000 °C.

Para resíduos de mesma natureza, a combustão em leito fluidizado tende a ser mais eficiente, por promover um contato mais íntimo e intenso entre combustível (resíduo sólido urbano) e comburente (ar). Por outro lado, a operação em temperaturas de combustão mais baixa produz cinzas que tendem a ser mais agressivas ao meio ambiente, devido ao fato de que a incineração não confere grau de vitrificação às matérias minerais presentes que, somente calcinadas, permanecem com reatividade elevada e mais susceptíveis a processos de lixiviação. Neste aspecto, cinzas resultantes da queima em grelha, embora possam ter um maior teor de incombusto (carbono), apresentam elevado grau de vitrificação das matérias minerais e, portanto, um maior grau de inertização, sendo menos agressivas ao meio ambiente e, por isso, passíveis de disposição mais simples ou até de utilização como base para pavimentação, a exemplo do que é feito em muitos países.

Outra conseqüência operacional importante decorrente das diferenças da temperatura de combustão entre estas duas tecnologias é a formação de NOx. A temperatura mais baixa empregada na combustão em leito fluidizado induz à menor formação de NOx e, conseqüentemente, resultando em menor consumo de reagentes e/ou catalisadores nos sistemas de denitrificação dos gases (DENOX Systems).

Em princípio, plantas baseadas em ambas as tecnologias atendem sem muita dificuldade aos padrões de emissão de NOx consagrados. O maior reflexo desta diferença é de ordem econômica, já que os custos de investimento e operação das plantas de combustão em leito fluidizado em relação a sistemas DENOX são menores do que os verificados em plantas de queima em grelha.

### **Velocidade superficial dos gases na caldeira**

A velocidade superficial é definida pela razão entre a vazão de gases na condição de pressão e temperatura de operação da fornalha e a área seccional desta.

Enquanto a velocidade superficial em fornalhas que empregam grelhas móveis chega a valores máximos da ordem de 3,0 m/s, situando-se em média entre 1,5 e 2,0 m/s, em fornalhas de incineradores que empregam a tecnologia de combustão em leito fluidizado esta velocidade oscila situar-se-á entre 1,5 e 2,0 m/s nos chamados leitos borbulhantes (bubbling beds) – utilizados em incineradores de pequeno porte (até 20MW) - e entre 6,0 e 8,0 m/s nos leitos circulantes (circulating fluidized beds) – adotados em unidades de maior porte (> 30MW).

Os principais reflexos destas diferenças de velocidade superficial ocorrem nas taxas de arrastamento de partículas, significativamente maiores nas unidades que empregam a tecnologia de combustão em leito fluidizado, em função de velocidades superficiais elevadas e da preparação do resíduo sólido urbano para a queima, que promove a redução do tamanho dos materiais alimentados no sistema de tratamento térmico.

Com isso, as plantas de combustão em leito fluidizado devem ter seus sistemas de coleta de particulados (precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas) mais robustos e eficientes em comparação aos empregados para coleta de partículas da queima em grelhas.

Por este motivo há maior risco de emissão de partículas de incineradores que empregam o princípio da combustão fluidizada e que, não esqueçamos, são partículas sólidas que tendem a ser mais reativas em função da temperatura em que foram incineradas (entre 800 °C e 1000 °C).

### **Preparação dos resíduos para o tratamento térmico**

Há diferenças bem significativas entre as necessidades de preparação para o tratamento térmico quando comparados processos que empregam queima em grelhas móveis e leito fluidizado.

A queima em grelhas, por sua maior rusticidade, não exige maiores cuidados com o condicionamento do resíduo sólido urbano, sendo a maior preocupação os teores de matéria orgânica úmida, que reduz o poder

calorífico do resíduo e pode chegar a situações que requeiram o uso de combustível auxiliar para a sustentação da queima. Desta forma, a queima em grelhas se reveste de simplicidade conceptiva e operacional.

Por outro lado, a mecânica da combustão em leito fluidizado e a pressão positiva na fornalha determinam a necessidade de projetos mais sofisticados e dimensionamento mais apurado tendo em vista garantir a confiabilidade operacional dos incineradores.

Para esta garantia, as especificações do resíduo sólido urbano a ser alimentado nos incineradores são mais rígidas em termos de granulometria e composição, tendo em vista ao bom comportamento deste em moegas e alimentadores/extratores da fornalha.

Resumindo, a escolha entre os dois conceitos será determinada pela natureza do resíduo sólido urbano, seu ciclo de tratamento (coleta, triagem e destinação das cinzas) e as restrições locais.

### Conclusão

De um modo geral, todos os fabricantes que ofertam comercialmente plantas de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos são tecnicamente aptos a oferecer garantias de desempenho ambiental, tendo em vista atender à legislação ambiental a que deverá ser submetida a planta ofertada.

A opção por uma ou outra alternativa tecnológica vai depender do ciclo de tratamento, ou seja, do conjunto de informações do cenário final da Usina, incluindo as características finais do resíduo a ser tratado termicamente, em função de seu condicionamento na origem, forma de coleta, sistema de triagem, classificação e outras formas de tratamento, do porte da Usina e o seu número de módulos, assim como do uso final da energia térmica (vapor /energia elétrica), que em conjunto definem a seleção final de tecnologia, assim como da eficiência e custo global das instalações.

## SELEÇÃO DA REGIÃO DE IMPLANTAÇÃO

Com o objetivo de selecionar a região foco do estudo de viabilidade da usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica definiu-se uma série de critérios que utilizados em uma análise multicriterial permitiu a seleção final da região.

### Critérios

Foram elaborados pela ENGEPIO e complementados pela Equipe da FEAM uma série de Critérios abordando os aspectos do Meio Ambiente – Antrópico, Físico e Biótico. A Tabela 2 apresenta o conjunto dos critérios utilizados.

**Tabela 2: Critérios para a seleção da região**

<b>A) ANTRÓPICO</b>	
<b>A.1) SOCIAL</b>	
<b>CRITÉRIO</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>
1.Disponibilidade de mão de obra de operação	A disponibilidade e/ou proximidade de mão de obra qualificada (técnicos em mecânica) é um item necessário para a operação.
2.Sistemas de Coleta / Triagem de resíduos	Nível de coleta existente na região é fundamental para a qualidade dos resíduos (combustível) da Usina Térmica. A existência na região de sistemas de recuperação de recicláveis será, portanto, prejudicial (seja coleta informal, centros de triagem, coleta seletiva municipal, entre outros).
3.Destinação final de resíduos urbanos	Consideração e priorização de regiões onde ainda não haja soluções satisfatórias para destinação dos resíduos urbanos.
4.População	Em regiões onde as condições socioeconômicas são desfavoráveis ou precárias, a implementação do empreendimento pode alavancar melhorias.
5. Saúde Pública	As regiões impactadas por questões de saneamento público insuficiente são prioritárias, pois a solução adequada para a destinação dos Resíduos Sólidos

	Urbanos pode melhorar o índice de salubridade da região.
<b>A.2) ECONÔMICO</b>	
CRITÉRIO	JUSTIFICATIVA
6.População	Densidade populacional intermunicipal com um mínimo de 350 mil habitantes é necessária, pois define o porte / viabilidade da Usina.
7.Nível Socioeconômico	Em uma população com nível socioeconômico mais elevado implica em um maior índice de geração de resíduos de maior poder calorífico.
8.Custo de Transporte (Veículos coletores)	O custo de transporte (km/t) dos veículos coletores deve ser calculado. Deve-se considerar um raio econômico de no máximo 100 km para o transporte de resíduos urbanos.
9.Custo de Transporte (Veículos transbordo)	A existência de estações de transporte e transbordo dentro do raio de 100 km, pois diminui os custos iniciais de investimento. Calcular os custos de R\$ por t/km de veículo de transbordo e veículo coletor.
<b>A.2) ECONÔMICO</b>	
CRITÉRIO	JUSTIFICATIVA
10.Acesso intermunicipal	Regiões onde existe infraestrutura para o acesso intermunicipal com o objetivo de transportar os resíduos até a Usina são essenciais ao custo de transporte.
11.Localização central da Usina	A microlocalização da Usina deve ser central em relação ao acesso aos demais municípios com o objetivo de diminuir custos de transporte.
12.Municípios do Sistema x Localização central da Usina	Municípios que farão parte do Sistema devem estar em um raio máximo de 100 km da Usina.
13.Resíduos da Região	A existência de outros resíduos com poder calorífico na região deve ser estudada, pois pode representar uma melhoria na eficiência global do sistema de tratamento térmico.
<b>A.3) POLÍTICO INSTITUCIONAL</b>	
CRITÉRIO	JUSTIFICATIVA
14.Institucional 1	Região onde eventualmente já exista o conceito de consórcio intermunicipal pode facilitar na implantação do empreendimento.
15.Institucional 2	Efeito de demonstração (existência de região com vocação para um projeto-modelo que sirva como agente promotor) pode ser um critério político.
16.Institucional 3	Variáveis políticas facilitadoras (exemplos: bom relacionamento, pressão do Ministério Público) podem facilitar a implementação de sistemas congênicos.
17.Desapropriação	A existência de áreas viáveis à desapropriação deve ser considerada.
18.Zoneamento municipal e urbano	Devem-se observar as restrições de usos e ocupação de regiões, de acordo com o zoneamento municipal e urbano. Caso exista, deve-se considerar o Plano Diretor Municipal.
<b>B) FÍSICO</b>	
CRITÉRIO	JUSTIFICATIVA
19.Área impactada	Áreas já degradadas ambientalmente podem ser atrativas para utilizar a usina como projeto de recuperação da área. (Ex: na Espanha a usina de tratamento térmico aproveitou área de mineração já prejudicada sob o ponto de vista ambiental).
20.Recursos de água	A disponibilidade de água para processo, em quantidade e qualidade adequadas para plantas de tratamento térmico são fatores importantes.
21.Linhas de transmissão	A existência de linhas de transmissão de energia elétrica é um fator que deve ser considerado.
22.Relevo	O tipo de relevo existente no local deve ser compatível, implicando em mínimo trabalho de terraplanagem.
<b>B) FÍSICO</b>	



<b>CRITÉRIO</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>
23.Situação ambiental	Áreas que se apresentem fragilizadas sob o ponto de vista físico ambiental devem ser desconsideradas.
24.Destinação de resíduos sólidos após a queima (cinzas)	Deve-se observar a disponibilidade de áreas para a destinação final das cinzas resultantes do processo.
25.Destinação final de resíduos urbanos	Devem-se priorizar regiões onde ainda não haja soluções satisfatórias para destinação dos resíduos urbanos gerados.
26.Núcleos populacionais	A FEAM deve avaliar a necessidade de estabelecer regras para a distância do limite da área útil do empreendimento a núcleos populacionais. Na Europa, não existem restrições de localização, pois existe normatização de padrões de emissão adequados.
27.Localização próxima a aterro ou lixão desativado	A localização da Unidade ao lado de um aterro ou lixão desativado, com a captação do biogás e sua utilização como combustível auxiliar no processo ou mesmo na geração de energia adicional, dará margem a créditos de carbono oriundos da redução de emissão do metano (cerca de 50% da composição do biogás de aterro) gerado pelo material ali depositado.
28.Resíduos sólidos	Regiões que geram resíduos sólidos cuja destinação final adequada é um problema ambiental são benéficas, pois esses resíduos tendem a aumentar o poder calorífico do combustível. (Ex: serragem, casca de arroz, moinha de carvão vegetal).
<b>C) BIÓTICO</b>	
<b>CRITÉRIO</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>
29.Existência de Unidades de Conservação (UCs)	Deve-se observar a existência de Unidades de Conservação Estaduais e Federais no entorno do local, assim como suas restrições de usos e zonas tampão.
30.Área de Preservação Permanente (APP)	Deve-se respeitar a ocupação junto à Área de Preservação Permanente - APP (No mínimo de acordo com art. 2º da Lei 4771/65).
31.Espécies endêmicas	Locais onde seja verificada a existência de espécies endêmicas da fauna e/ou flora devem ser evitados ou tomadas medidas efetivas de preservação.
32.Ambientes de relevância ambiental	Ambientes onde sejam diagnosticados fatores ambientais peculiares, de relevância à preservação, ou de aspectos ambientais singulares devem ser desconsiderados, pois a sua preservação é prioritária.

Fonte: Elaboração ENGEBIO

Em uma primeira etapa baseando-se em três critérios especificamente selecionados foram pré-selecionadas 4 (quatro) regiões, centradas nas cidades de Montes Claros (Norte de Minas), Ubá (Zona da Mata), Três Corações (Sul de Minas) e Governador Valadares (Vale do Rio Doce).

Finalmente, para a escolha da região que melhor possui as características para a implantação da usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica, a FEAM efetuou um levantamento detalhado de dados secundários e, estipulou-se uma ponderação e avaliação comparativa dos critérios, tendo sido selecionado a região de Três Corações (Sul de Minas).

#### **Localização da usina**

Conforme a primeira etapa do Projeto, a região escolhida para avaliar a viabilidade da usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos - UAER foi localizada na região do Sul de Minas Gerais. A Figura 13 apresenta a macrolocalização da região selecionada.

O ponto central escolhido na região do Sul de Minas Gerais foi a cidade de Três Corações.



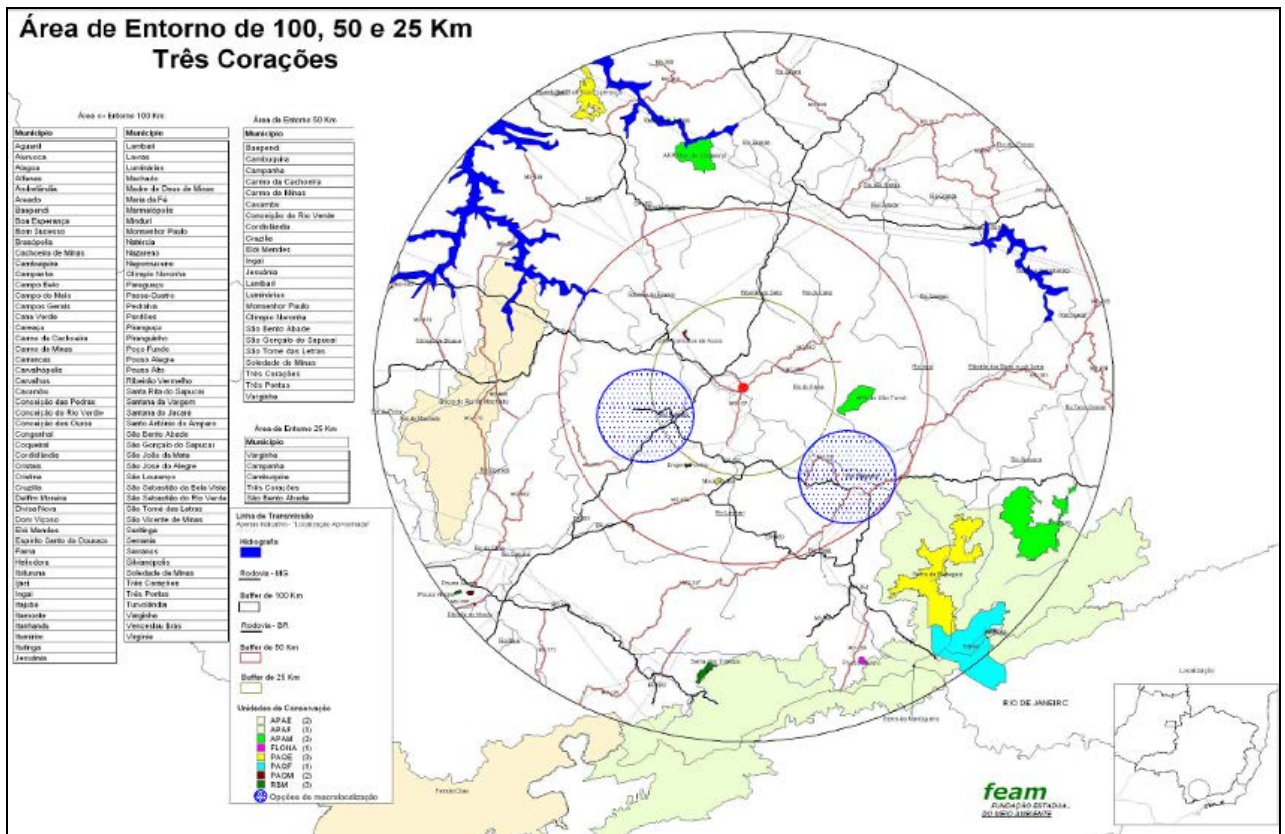
**Figura 13: Macrolocalização da Usina na região do Sul de Minas Gerais**

A Figura 14 destaca com círculos azuis, as alternativas de macrolocalização para a construção da UAER, definidas em função da proximidade com os centros de maior concentração da população alvo do projeto.

Em conjunto com a FEAM, foram definidas duas áreas prioritárias para instalação da UAER, sendo uma delas entre os municípios Campanha, Cordislândia, Monsenhor Paulo e São Gonçalo do Sapucaí, e outra entre os municípios de Caxambu, Soledade de Minas e Conceição do Rio Verde.

As alternativas de localização também consideram a proximidade a duas subestações de baixa tensão da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), conforme (LOPES, 2009a).

E, considerando a proximidade com a Rodovia BR 381 (Fernão Dias), foram estudadas localizações para as Estações de Transbordo, e a capacidade de estações de transbordo compartilhadas entre os municípios.



**Figura 14: Possível localização da planta da UAER**

## Estudo da capacidade da usina

Para definir os cenários do estudo de viabilidade para a usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos (UAER) foi considerado:

- as Metas do Programa “Minas sem Lixões”;
- a região de Três Corações;
- a população a ser atendida e sua evolução ao longo da vida útil da UAER;
- a taxa de geração de resíduos per capita.

## Considerações gerais

Existem três fatores básicos para o dimensionamento e rendimento de uma Usina Termelétrica de RSU:

- composição do resíduo a ser processado (ENGEPIO, 2009);
- quantidade de resíduo a ser processado;
- variação da quantidade e da composição dos resíduos em função da evolução das regiões ao longo dos anos.

A quantidade de geração de resíduos é proporcional à população, porém, não depende somente da população e seu crescimento.

Características de cada região, como por exemplo, o IDH, níveis econômicos, padrões de consumos, clima, características de região predominantemente rural ou urbana, entre outros fatores, refletem na taxa de geração e na composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

As características do RSU como as frações de matéria orgânica, plásticos, metais, vidros e papéis, bem como a umidade do resíduo, entre outras, intervêm diretamente no poder calorífico.

A taxa de geração intervém sobre a quantidade total de RSU gerada.

A quantidade e as características dos RSU são fatores básicos, que influenciam diretamente no porte e eficiência da UAER.

De forma simplificada se pode afirmar que a taxa de geração e a composição dos resíduos pode variar em função de diversos fatores, tais como:

- condições socioeconômicas, políticas e climáticas;
- sistema de coleta e reciclagens existentes;
- hábitos e costumes da população;
- acesso a tecnologias diferenciadas;

- variações sazonais, etc.

Para o Cenário do Brasil não há disponibilidade de informações técnicas e estatísticas confiáveis que possam fundamentar uma projeção da taxa de geração e da composição de Resíduos Sólidos Urbanos ao longo de toda a vida útil da Usina (25 anos).

Portanto, em função das informações disponíveis, foi adotado no estudo uma previsão de geração de resíduos proporcional à variação do crescimento populacional, com uma composição e taxa de geração fixas, sem contemplar suas variações ao longo do tempo.

Visto a quantidade de variáveis que pode intervir em uma projeção para 25 anos (vida útil da UAER), considera-se que esta simplificação dará uma ordem de grandeza de variação de resíduos com precisão suficiente para fundamentar o pré-dimensionamento da UAER.

Uma vez que os resíduos destinados à UAER serão gerados pela população urbana, que evolui ao longo dos anos, é necessário considerar a evolução desta população nos municípios. Neste estudo a população da região foi projetada até 2036. Para tanto, foi empregada, como referência, a metodologia das estimativas das populações residentes nos municípios brasileiros adotada por IBGE (2008b), considerando-se as hipóteses que serão descritas posteriormente.

Essa projeção populacional associada a uma taxa de geração per capita de resíduos e aos objetivos do Programa “Minas sem Lixões”, foram consideradas para estabelecimento dos módulos de capacidade da UAER.

O início de operação da UAER foi estabelecido como dezembro de 2011, considerando a meta do Programa “Minas sem Lixões”, mesmo sabendo que isso exigiria a implantação da Usina em um tempo recorde.

O estudo foi conduzido considerando o atendimento à população urbana dos 73 municípios, atualmente em situação irregular de disposição de resíduos e sem processo formal de regularização, sobre o total de 96 municípios existentes no raio de 100 km da região em estudo apresentada no Relatório 1 (ENGEPIO, 2009).

Quanto aos municípios atendidos, à caracterização e à quantidade de resíduos gerados, o presente estudo de viabilidade considerou:

73 municípios, em uma região com raio de 100 km e centro na cidade de Três Corações, com uma população total atendida em torno de 645.000 habitantes (2007), dentro do cenário da região de Três Corações, teremos uma quantidade de resíduos enviada à UAER de aproximadamente 120.000 tonelada por ano;

- quantidade do resíduo a ser processada proporcional à população urbana dos municípios considerados;
- taxa de geração de RSU per capita constante e igual a 0,8 kg/hab.dia;
- crescimento populacional estimado conforme metodologia empregada pelo IBGE;
- recebimento de resíduos na UAER procedentes de estações de transbordo com um raio máximo de transbordo entre o município e a estação de 30 km de distância;
- queima dos resíduos - conceito de “Mass Burning”.

### **Composição gravimétrica**

A nível nacional não existe uma metodologia de informações confiáveis de caracterização de resíduos sólidos urbanos. Portanto, buscando definir uma caracterização de resíduo a ser utilizada no estudo, inicialmente analisemos a composição gravimétrica em diferentes cidades e estados do Brasil e do Mundo. A Tabela 16 mostra a porcentagem de matéria orgânica encontrada em cada região.

**Tabela 3: Porcentagem de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos**

MUNICÍPIO/REGIÃO	ANO	POPULAÇÃO	IDH	TIPO DE COLETA	MATÉRIA ORGÂNICA (%)
Porto Alegre RS	1997	1.500.000	0,865	seletiva	52,1
Porto Alegre RS	2002	1.330.000	0,865	seletiva	43,83
Canela RS	2005	38.318	0,818	seletiva	42,3
Alvorada RS	2008	207.142	0,768	seletiva	55,5
São Marcos RS (1)	2006	18.961	0,843	seletiva	56,9
Pedras de Fogo PB	2007	25.861	0,568	regular	68
Pernambuco (aterro)	2007	-	0,692	regular	46,3
Recife PE	1999-2002	1.549.980	0,797	regular	63,4
Campo Grande MS (1)	2002	747.189	0,814	regular	64,5
Joinville SC (1)	2002	492.101	0,857	seletiva	49,8
Santa Catarina (1)(2)	2002	1.750.000	0,84	seletiva/regular	45,4
França (1)	2002	64.473.140	0,955	-	28,8
Portugal (1)	2002	10.617.575	0,9	-	45
Usina Elk River - USA (3)	2002	-	-	-	9

(1) O ano se refere à publicação do artigo, não necessariamente à coleta de dados

(2) Média de 47 Municípios

(3) CDR - Combustível Derivado de Resíduo

Observando a Tabela 16 pode-se verificar uma grande diferença entre a Região Sul do Brasil e o restante do país. A fração de matéria orgânica na região sul (Rio Grande do Sul e Santa Catarina) fica na faixa de 40% a 60% enquanto em outros estados esta fração é superior a 60%, com exceção dos dados de Pernambuco no ano de 2007 que possui fração de matéria orgânica de 46,3%, porém esta análise foi realizada em um aterro e não no resíduo coletado diretamente da população urbana, o que pode gerar um erro devido à rápida decomposição da matéria orgânica.

Nos países como França e Portugal a fração de matéria orgânica também é relativamente baixa, porém devido à falta de dados não podemos comparar com a realidade brasileira. A Usina de Elk River, Estados Unidos, tem uma fração de matéria orgânica muito baixa, 9%, devido ao processamento do resíduo sólido urbano em combustível derivado de resíduos. Conforme informado por ELK- RIVER, o resíduo chamado CDR, queimado na Usina, é o resíduo sólido urbano que recebe um tratamento que consiste em moer, peneirar e retirar os não combustíveis (via arraste) obtendo-se no final, papel e plásticos com granulometria controlada (inferior a 15 cm).

No Brasil, a média nacional de matéria orgânica presente nos resíduos de origem urbana está atualmente na ordem de 56%, um histórico dessa média pode ser visto na Tabela 4.

**Tabela 4: Porcentagem de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos**

ANO	MATÉRIA ORGÂNICA (%)
1992	52,5
1999	52,5
2006	52
2007	56,4

Fonte: Pereira Neto e Lelis(1999) ,Elaboração ENGEBIO



Os dados da tabela acima foram retirados de artigos que não citam a fonte de origem, não fornecendo um correto embasamento para que possam ser utilizados neste estudo.

Com base em dados coletados em literatura e artigos publicados podemos estimar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na Região Sul do estado de Minas Gerais.

A Tabela 5 mostra os valores encontrados em porcentagem, em peso úmido, de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos em diferentes regiões do estado.

A quantidade de resíduos sólidos urbanos vem aumentando com o passar dos anos, porém a sua composição tende a permanecer a mesma, como podemos verificar comparando os dados da região da Zona da Mata (1999) e da cidade de Ponte Nova (2008) que está localizada nesta região. Com base nos dados da tabela acima podemos verificar que a análise gravimétrica do Município de Ponte Nova, localizado na Zona da Mata, realizada no ano de 2008 coincide com o valor encontrado para a matéria orgânica na região da Zona da Mata no ano de 1999.

**Tabela 5: Porcentagem (em peso úmido) de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais**

MUNICÍPIO/REGIÃO	ANO	POPULAÇÃO	IDH	TIPO DE COLETA NA REGIÃO	MATÉRIA ORGÂNICA (%)
Sul de Minas	1999	2.463.618	0,757	regular	66,5
Norte de Minas	1999	1.591.507	0,658	regular	66,5
Rio Doce	1999	1.588.122	0,669	regular	67,4
Zona da Mata	1999	2.145.945	0,712	regular	66,3
Alto Paranaíba	1999	2.159.047	0,792	regular	67,1
Triângulo	1999		0,816	regular	66,8
Central	1999	405.143	0,754	regular	65,8
Centro Oeste	1999	922.656	0,789	regular	63,2
Paracatu	1999	82.850	0,76	regular	68,9
Jequitinhonha	1999	24.879	0,65	regular	70,1
Belo Horizonte	2002	2.412.937	0,839	seletiva	52,9
Belo Horizonte (aterro)	2004		0,839	seletiva	61,6
Montes Claros	2004	358.271	0,783	regular	65
Ponte Nova	2008	57.482	0,766	regular	66,3
<b>Média</b>					<b>65,3</b>

O valor médio da porcentagem de matéria orgânica encontrado para as cidades nas quais foram realizadas pesquisas de caracterização dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais foi de 65,3%.

Com base nesses dados podemos considerar que a quantidade, em porcentagem, de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos na região do Sul de Minas permanece a mesma, ou muito próxima do valor encontrado no ano de 1999 para a mesma região, que foi de 66,5%.

Analisando os dados coletados, assume-se como composição gravimétrica média para a fração de matéria orgânica na região Sul de Minas Gerais o valor de 66,5%.

A composição gravimétrica aproximada dos resíduos sólidos urbanos na região Sul de Minas Gerais, adotada no estudo está apresentada na Tabela 6.

**Tabela 6: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Sul de Minas Gerais**

COMPONENTE	COMPOSIÇÃO (%)
Papel	4,2
Papelão	5,9
Vidro	2,2
Matéria Orgânica	66,5
Metais	3,8
Plásticos duros	2,3
Plásticos	6,7
Inertes	8,4
Umidade	47

Fonte: Pereira Neto e Lelis; Elaboração ENGEBIO

### **Poder calorífico**

Poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa (ou volume no caso dos gases) liberada na oxidação de um determinado combustível. O poder calorífico pode ser inferior ou superior. O poder calorífico inferior é a energia liberada na forma de calor e o poder calorífico superior é a soma da energia liberada na forma de calor e da energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação.

A Tabela 7 mostra os valores de poder calorífico inferior em diversas usinas instaladas, na sua maioria, na Europa e na Elk-River situada nos Estados Unidos relacionados com a capacidade de processamento de cada usina.

**Tabela 7: Poder Calorífico Inferior e Capacidade das usinas na Europa e Elk-River (EUA)**

USINA	CAPACIDADE TONELADAS/ANO	PCI (KCAL/KG)
CVE A	46.000	2164
Porto	370.000	2036
CVE G	86.000	2190
Selemap	420.000	2050
CVE H	100.000	2152
Andorre	60.000	2242
CVE B	156.000	1435
CVE F	48.000	2388
CVE Dinamarca	380.000	2011
CVE França	18.700	2014
CVE França	37.500	2009
CVE França	75.000	2009
CVE Avenne	200.000	2004
CVE Irlanda	200.000	2018
CVE Italia	300.000	2009
CVE UK	50.000	2018
CVE UK	100.000	2018
CVE UK	200.000	2152
ELK-RIVER	300.000	2800
LIPOR	380.000	1838

Em levantamento de dados de 18 Usinas termelétricas na Europa, processando resíduos domiciliares constata-se uma variação de PCI do resíduo processado variando entre 1200 kcal/kg a 2089 kcal/kg, com uma média de 1795 kcal/kg.

No caso da região Sul de Minas Gerais pode-se estimar o poder calorífico inferior dos resíduos sólidos gerados por meio de composição média de resíduos e do poder calorífico de seus componentes.

O valor do poder calorífico inferior base úmida encontrado, 1759 kcal/kg, está dentro da faixa de variação do poder calorífico inferior dos resíduos utilizados nas usinas térmicas européias que é de 1200 kcal/kg a 2089 kcal/kg.

### CONCEITUAL DA USINA

Foi utilizado o conceito de “Mass Burning”, que significa que não haverá seleção prévia de materiais recicláveis e na Planta da UAER haverá a destruição térmica de resíduo bruto.

A UAER foi desenvolvida para destruição térmica de 350 toneladas por dia de resíduos brutos (sem nenhum tratamento prévio).

A UAER deverá ser composta das seguintes Unidades:

- Recepção dos resíduos;
- Unidade de queima e recuperação de energia;
- Unidade de valorização de energia;
- Unidade de limpeza de gases de combustão;
- Unidade de tratamento dos resíduos de combustão.

### CENÁRIO ALTERNATIVO PARA SIMULAÇÃO - UAER

Com o objetivo de obter informações para a estimativa dos custos de implantação e operação de uma planta de combustão de RSU para geração de energia elétrica, foram consultados os principais fornecedores detentores das tecnologias aplicáveis. A consulta formal às empresas foi feita por meio do documento chamado Request for Proposals, o qual apresentava as condições da região de implantação do projeto, a disponibilidade de resíduos e sua composição estimada, bem como o escopo de fornecimento da UAER para um contrato de EPC - Engineering, Procurement and Construction (fornecimento total).

Em resposta, as empresas Areva Koblitz e CNIM apresentaram suas propostas para o fornecimento EPC da UAER. A tabela 8 resume as informações obtidas e de uma Usina de fornecimento hipotético, proposta pela consultora que foi denominado de Cenário UAER.

**Tabela 8: Resumo de informações das propostas de fornecimento**

ITEM	CNIM	AREVA KOBLITZ	CENÁRIO UAER	UNIDADE
Investimento total	332.000.000	192.991.080	232.400.000	R\$
Capacidade mínima	300	350	350	t/d
Capacidade máxima	600	640	640	t/d
Eficiência Líquida da Planta Térmica	25	22/24	26	%
Investimento Específico	33.200	12.866	17.877	R\$/kW <sub>el</sub>
Poder Calorífico do RSU	6155	7745	6900	kJ/kg
Potência instalada (Módulo I)	5	8	6,5	MW <sub>el</sub>
Potência instalada (Módulo II)	5	7	6,5	MW <sub>el</sub>
Potência instalada total	10	15	13	MW <sub>el</sub>
Disponibilidade da Planta	8000	7800/8200	8000	horas/ano

Considerando a grande diferença das propostas recebidas e, tomando como base o Relatório 1 - Estado da Arte do Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos com Geração de Energia Elétrica elaborado por ENGEPIO (2009), as proposta da Areva Koblitz e da CNIM, somado a experiência da ENGEPIO acumulada em outros estudos de geração térmica a partir de resíduos, decidiu-se propor uma terceira alternativa que será denominada Cenário UAER.

Cabe destacar que o cenário UAER trata-se de um cenário “hipotético” para fins de simulação. Este cenário foi estabelecido em função das propostas recebidas e da experiência da Engebio em estudos de plantas similares e de outros tipos de instalações industriais, adotando-se as seguintes premissas:

**Processo** – A alternativa desenvolvida para “Cenário UAER” considera um processo similar ao da CNIM, visto que se trata de um processo já consolidado.

**PCI** – O valor do poder calorífico inferior dos resíduos foi calculado por cada fornecedor com base na composição gravimétrica dos resíduos, informada no documento Request For Proposal. Cada empresa possui sua própria metodologia de cálculo do poder calorífico inferior (PCI) dos resíduos, assim como dos demais parâmetros do projeto. Deste modo, existem diferenças no valor do PCI adotado por cada uma.

O valor do PCI calculado é de 1759 kcal/kg, conforme as informações apresentadas nas Tabelas 21 e 22, do Relatório 1 - Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica. A Areva Koblitz apresentou um PCI de 1850 kcal por quilograma de resíduo, a CNIM de aproximadamente 1470 kcal/kg de resíduo.

Entretanto, no cenário UAER esta consultoria, por experiência própria em outros projetos, decidiu arbitrar um valor mais conservador em relação aos valores calculados no Relatório 1 e ao valor proposto pela Areva Koblitz, desconsiderando o valor proposto pela CNIM, adotando para este estudo o valor de 1650 kcal/kg de resíduo.

**Capacidade** – Para o cenário UAER adotaram-se os valores de 350 toneladas/dia e 640 toneladas/dia, operando 8.000 horas anuais, que são aqueles correspondentes para a demanda adotada.

**Investimentos** - Não existem unidades semelhantes operando no Brasil e na América Latina e portanto não existem valores de investimentos como referência. Em visitas a Usinas na França e Portugal e contatos com fornecedores realizados pela ENGE BIO observou que pode chegar a 30% do valor total do investimento na rubrica custo de obras civis (concreto e estruturas metálicas).

Dos itens que compõem a Usina são passíveis de fabricação no Brasil motores, calderaria, silos e equipamentos mecânicos em geral. Necessariamente serão importados a grelha e instrumentação, além da tecnologia e projeto executivo para um fornecimento “turn key”, que normalmente fazem parte dos custos a serem pagos para a instalação de uma Usina.

Portanto, com base na experiência de outros estudos realizados pela Engebio, estimamos um índice de nacionalização de 60% dos equipamentos e, para o cenário teórico da UAER foi assumido para esta opção um valor total de investimentos de R\$ 232.400.000,00.

**Eficiência e Potência** – A CNIM adotou eficiência de 24% e a Areva Koblitz 22/24 %, e esta pode chegar , pela experiência da Engebio, até 30%.

A potência utilizada no Cenário UAER foi estimada para as capacidades definidas para a UAER considerando uma eficiência conservadora de 26% , que com a massa de resíduos e PCI adotados , resulta em dois módulos de 6,5 MWel cada um. Considerou-se que a UAER será implantada em duas etapas, em módulos iguais, sendo o segundo módulo será implantado após os 5 primeiros anos de operação, totalizando uma capacidade final da UAER de 13 MWel.

**Resíduos do processo e insumos** – Foi assumido pela consultoria, em função da experiência acumulada em outros projetos e, com base nos valores estimados pela ENGE BIO constantes no item 3.5 do Relatório 1, como resíduos do processo um total de 10% sobre a massa total de resíduos em cinzas, dos quais, 20% são cinzas volantes e 80% são cinzas de fundo. Os insumos foram considerados em quantidade similares às apresentadas pela CNIM.

## ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Considerando o elevado valor do investimento para a implantação de uma UAER, é necessária a integração e a articulação entre os sistemas de limpeza pública de cada município para minimizar os custos.

Foram feitas simulações variando a cidade sede da usina, distâncias percorridas pelos veículos de coleta, quantidade e capacidade de estações de transbordo, custo de implantação e operação das mesmas.

Foi também realizada a avaliação do projeto como atividade do MDL, identificando o cenário de Linha de Base e sendo estimada a redução de emissões de gases do efeito estufa decorrentes da implantação da atividade de projeto.



A metodologia empregada foi a versão 11 da AM0025 - Avoided emissions from organic waste through alternative waste treatment processes United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Para o cálculo da energia elétrica gerada e estudo da redução das emissões de gases de efeito estufa foram adotadas as seguintes considerações:

- Toda potência disponível convertida em energia elétrica;
- PCI dos RSU igual a 1650 kcal/kg;
- Disponibilidade de capacidade igual a 8.000 horas por ano;
- Fator de conversão de energia de 26%;
- UAER com 25 anos de vida útil.

O total de emissões de gases do efeito estufa evitadas pelo projeto, em tCO<sub>2</sub>e, nos 25 anos de vida útil estimado para a atividade de projeto da UAER, foi de 1.934.372 tCO<sub>2</sub>e.

## RESULTADOS E CONCLUSÕES DO ESTUDO

Os elevados custos de investimentos e operação de uma UAER tornam necessárias a integração e a articulação entre os sistemas de limpeza pública de cada município, na busca de minimização dos custos de implantação e operacionais por economia de escala, podendo ser foco da criação de um consórcio intermunicipal, instituído conforme a Lei Federal 11.107, de 6 de abril de 2005, com a finalidade de organizar e proceder ações e atividades para a gestão do sistema de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos gerados pelos seus municípios integrantes.

Considerando a localização da UAER na macrorregião, cujo centro é o município de Campanha, e avaliando os valores de transbordo de transporte, obtêm-se:

- Um custo médio do total da operação de transbordo e de transporte das ETs até a UAER de R\$ 36,00 (no ano de 2011) a R\$ 20,00 (no ano de 2036) por tonelada transportada;
- Um investimento total de R\$ 3.850.000,00 para a implantação de 16 Unidades de Transbordo, sendo 03 unidades com capacidade de 10 t/dia, 09 unidades com capacidade de 50 t/dia e 04 unidades com capacidade de 100 t/dia.

A redução de emissões de GEE estimada para o período de 25 anos analisados, resultantes da implantação da UAER para combustão dos RSU oriundos dos 73 municípios, atualmente em situação irregular de disposição de resíduos e sem processo formal de regularização será de 2.000.000 tCO<sub>2</sub>e.

A proposta da Areva Koblitz apresentou o menor valor de investimento, ou seja, R\$ 193.000.000,00, para uma capacidade instalada de 15 MW. A simulação com um valor de venda de energia a R\$ 170,00 por kWh, com uma taxa de retorno de 12% a.a e um resultado de investimento igual a zero (R\$00,00), ou seja, lucro zero, resultou em valor de R\$ 90,93 a tonelada para os serviços de destruição térmica de RSU.

Ressalta-se quanto ao sistema de tratamento de gases, que a proposta Areva Koblitz considera o atendimento aos padrões de emissão da Resolução CONAMA 316/2002, mas não especifica o sistema de tratamento. A proposta da CNIM, por sua vez, considera padrões de emissão da Diretiva Européia, os quais são mais restritivos que a CONAMA, e considera nos custos os equipamentos a serem instalados para tal.

Considerando a diferença de valores ofertados pela Areva Koblitz e CNIM, foi desenvolvida uma terceira opção, chamada de Cenário UAER, onde se considerou um investimento de total de R\$ 232.400.00,00 com uma capacidade instalada de 13 MWel, que para as mesmas condições de simulação acima descritas resultou em um valor de serviços de destruição térmica de RSU variando entre de R\$ 120,60 a R\$ 130,61 por tonelada.

A tabela 9 apresenta um resumo das simulações de cenários realizados variando o valor de venda da energia (VE) e o resultado do valor do serviço a ser custeado pelos municípios como receita de destruição térmica para viabilizar os investimentos, a lucro zero.

Tabela 9: Simulação dos valores da implantação da UAER em duas etapas

	<b>CNIM VE R\$170,00</b>	<b>CNIM VE R\$150,00</b>	<b>UAER VE R\$170,00</b>	<b>UAER VE R\$150,00</b>	<b>AREVA KOBLOITZ VE R\$170,00</b>	<b>AREVA KOBLOITZ VE R\$150,00</b>
<b>Custos de Investimentos:</b>						
Investimento Etapa 1 (R\$)	190.000.000	190.000.000	133.000.000	133.000.000	98.995.540	98.995.540
Investimento Etapa 2 (R\$)	142.000.000	142.000.000	99.400.000	99.400.000	93.995.540	93.995.540
<b>Receita de destruição térmica (R\$/t)</b>	<b>186,86</b>	<b>195,69</b>	<b>120,60</b>	<b>130,61</b>	<b>90,93</b>	<b>101,34</b>
Energia _MWh (R\$)	170,00	150,00	170,00	150,00	170,00	150,00
<b>Resultado financeiro:</b>						
VPL do Projeto (R\$)	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,00)
TIR do Projeto (% ao ano)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

\*VE = valor de venda de 1 MWh de energia

## CONCLUSÕES

Dentro dos critérios estabelecidos para a simulação das diferentes opções – CNIM, UAER e Areva Koblitz (TIR 12,00% a.a e VPL = R\$ 00,00), com geração de energia elétrica, os resultados encontrados pela simulação de diferentes cenários são:

- Um capacidade instalada entre 10 MWe a 15 MWe;
- Valor total de investimento, variando segundo o fornecedor, entre R\$ 193.000.000,00 e R\$ 332.000.000,00;
- Um valor de serviço de destruição térmica dos resíduos na faixa de R\$ 90,93 a R\$ 195,69 por tonelada de resíduo processado conforme os investimentos e cenário abordado.

Pelas simulações desenvolvidas neste estudo de viabilidade técnico e econômico, a implantação de uma usina de destruição térmica de RSU por combustão com aproveitamento da energia gerada para a produção de energia elétrica pode ser uma solução viável que:

- Contempla a não disposição desses resíduos no meio ambiente;
- Caracteriza-se como uma solução aceitável para destinação final dos RSU, em conformidade com as metas do programa “Minas sem Lixões”;
- Proporciona uma solução para um conjunto de municípios que possuem um porte populacional para o qual, dificilmente, conseguirão soluções adequadas sem uma ação conjunta, na busca de uma viabilização pela economia de escala que este tipo de ação significa;
- Resultará na geração de energia elétrica a partir de resíduos;
- A obtenção de créditos de carbono resultará em melhoria do resultado econômico e financeiro do empreendimento;
- A operação resultará em uma melhoria Global em função da eliminação do metano gerado pela prática de disposição dos resíduos em aterros e pelo deslocamento da produção de energia em relação à Linha de Base de emissões do Brasil.

Recomenda-se para as próximas etapas desenvolver um estudo de viabilidade técnica mais preciso, considerando:

- Analisar detalhadamente para os municípios que hoje atendem às condições do Programa “Minas sem Lixões” que tipo de solução esses estão praticando para disposição de resíduos e qual é a sustentabilidade destas soluções para um futuro próximo de cinco anos;
- Efetuar um estudo de caracterização de resíduos de maneira a definir com certeza a composição dos resíduos e por consequência o seu poder calorífico médio;
- A partir desta análise, atualizar o estudo de Capacidade da Usina, buscando aumentar a quantidade de resíduos a ser destinada, de maneira a reduzir o valor dos serviços encontrados neste estudo;
- Com este novo cenário definido, elaborar um novo anteprojeto e estudo de viabilidade;
- Rever as solicitações de fornecimento da usina dentro de um cenário de maior perspectiva para os possíveis fornecedores, de maneira a obter propostas mais firmes e provavelmente, com valores melhores que os obtidos durante este estudo.
- Buscar alternativas de valorização dos resíduos sólidos da Usina (cinzas de fundo e cinzas volantes) para baixar os custos de operação e por consequência dos serviços de destruição térmica de RSU.

Finalmente, recomendamos avançar na busca da viabilização de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos para o estado de Minas Gerais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABCR - Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias. Distância entre cidades. Disponível em <www.abcr.org.br/geode/index.php>. Acesso em: 8 set. 2009.
2. AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT E DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE. -. Techniques et recommandations – Connaitre pour Agir, ADEME: 2001.
3. AZEVEDO, J., NASCIMENTO, L. C. A., MENDES, O. F. Panorama dos Problemas Gerados, pelos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. In: IV SIMPÓSIO DE DIREITO AMBIENTAL. 2001, São Gonçalo. Anais. Rio de Janeiro: UNIVERSO, (2001).
4. BRASIL. Lei Federal Nº. 11.107 de 06 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. Diário Oficial da União. de 7 abr. 2005.
5. BRITO, Fausto e HORTA, Cláudia Júlia G.: “Minas Gerais: crescimento demográfico, migrações e distribuição espacial da população”, 2004 Apud IBGE, censos demográficos 1940-2000.
6. CETESB. Programa de gerenciamento de resíduos sólidos domiciliares e de serviço de saúde – Prolixo da CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo, 1992.
7. COUTINHO, José. Lixo urbano: Um indicador de progresso. Química Industrial, Rio de Janeiro: ABQ, n.715, 1999. p. 7-8
8. ENGEBIO Engenharia LTDA. Estudo da arte e de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma unidade de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica em uma região conjunto de municípios no estado de Minas Gerais. Relatório 1: Estado da Arte do Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos com Geração de Energia Elétrica, Porto Alegre, 2009, 276 p.
9. ENGEBIO & BURGEAP. Plano Diretor Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos - PDRS. Santa Catarina, 2003.
10. Engebio Engenharia Ltda, Estudo de Recuperação e Adequação de Área conhecida como “Aterro do Lima” bairro Rondônia em Novo Hamburgo, Novo Hamburgo, 2008.
11. Engebio Engenharia Ltda, Plano Diretor, Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica e Projeto de Gestão – Tractebel Energia – Centrais Geradoras do Sul – Grupo Suez, Santa Catarina, 2002.
12. FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED STATES, Aridity Index. Disponível em <http://www.fao.org/geonetwork/srv/fr/graphover.show?id=12739&fname=aridity\_index.gif&Access=public>. Acesso em: 11 nov. 2009.
13. GEDIF/DPED/FEAM, Ofício Nº 009/2009 de 17 de julho de 2009. Ref. Estudo da Capacidade da Usina – Contrato de Prestação de Serviços Nº 2091010102008. ANEXO ao OFÍCIO Nº 009/2009 GEDIF/DPED/FEAM.
14. IBGE, Censo Demográfico 2000 - Fundação João Pinheiro (FJP), Centro de Estatística e Informações (CEI). População recenseada. Estimativas Anuais de População - UFs - 1980 - 2050, revisão 2004 apud Anexo II do Plano Mineiro de Desenvolvimento Integrado (PMDI) 2007-2023. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/servidor\_arquivos\_est/>. Acesso em: 8 jul. 2009.
15. IBGE- Diretoria de Pesquisas - Coordenação de População e Indicadores Sociais. Gerência de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica. Projeção da População por Sexo e Idade para o Período 1980 - 2050 - Revisão 2008. (2008a). Disponível em

- <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao\\_da\\_populacao/2008/default.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2008/default.shtm)>. Acesso em: 8 jul. 2009.
16. IBGE. Metodologia das estimativas das populações residentes nos municípios brasileiros: Uma abordagem demográfica para estimar o padrão histórico e os níveis de subenumeração de pessoas nos censos demográficos e contagens da população, 2008. Disponível em <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa\\_pop.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa_pop.shtm)>. Acesso em: 10 jul. 2009.
  17. IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
  18. LOPES, Ana Lúcia Bahia. (ana.bahia@meioambiente.mg.gov.br). Versão eletrônica Sede da usina. [ mensagem pessoal] Mensagem recebida por saffer@engebio.net em 24 jul. 2009a.
  19. LOPES, Ana Lúcia Bahia. (ana.bahia@meioambiente.mg.gov.br). Versão eletrônica análise da projeção da população e modulação das unidades de tratamento de RSU. [ mensagem pessoal] Mensagem recebida por saffer@engebio.net em 11 jul. 2009b.
  20. MALTA, Luiz Carlos. (diretoria@usinaverde.com.br). Versão eletrônica ENC: USINA TERMICA EM MINAS GERAIS - revisão Capacidade - USINAVERDE [ mensagem pessoal] Mensagem recebida por saffer@engebio.net em 15 jun. 2009.
  21. MADEIRA, J., L., SIMÕES, C., C. S. Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as unidades da federação, de 1960/1980 por uma nova metodologia. Revista Brasileira de Estatística, v.33, n.129, p.3-11, jan./mar. 1972. Disponível em <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa\\_pop.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa_pop.shtm)>. Acesso em: 10 jul. 2009.
  22. MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. COPPE, Rio de Janeiro. (2006). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/17341.html>>. Acesso em: 13 ago. 2009.
  23. MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil, 2009. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764.html>>. Acesso em: 13 ago. 2009.
  24. MCT - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (trad.), Protocolo de Kyoto. Brasília, 1998. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0012/12425.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0012/12425.pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2009.
  25. MONTEIRO, J. H. P., FIGUEIREDO C. E. M., MAGALHÃES A. F., MELO M. A. F., BRITO J. C. X., ALMEIDA T. P. F., MANSUR G.L., ZVEIBIL, V. Z. (coord.). Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2009.
  26. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, no ano de 1989. Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pnsb/default.asp>>. Acesso em: 10 jun. de 2009.
  27. SISTEMA DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS – SIMGE. Mapas climáticos. Disponível em <[http://www.simge.mg.gov.br/monitoramento/mapas\\_climaticos.html](http://www.simge.mg.gov.br/monitoramento/mapas_climaticos.html)>. Acesso em: 11 out. 2009.
  28. TCMG - Tribunal de Contas do Estado de Minas Gerais. Metodologia para auditoria de serviços de limpeza urbana, com enfoque nos custos de coleta de resíduos sólidos urbanos. Encontro Nacional de Auditoria de Obras Públicas. Belo Horizonte, 2007. Disponível em <<http://www.tcm.ba.gov.br/enaop/download%5CDia-080307%5CMetodologia%20para%20Auditoria%20de%20Servi%C3%A7os%20de%20Limpeza%20Urbana%20com%20Enfoque%20nos%20Custos%20de%20Coleta%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2009.
  29. SNIS-SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES DE SANEAMENTO (2005). Disponível em <<http://www.cidades.pmss.gov.br/snis/faq.php>>. Acesso em: 4 jun. 2009.
  30. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. Global Warming Potentials. Disponível em <[http://unfccc.int/ghg\\_data/items/3825.php?minus=j](http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php?minus=j)>. Acesso em: 18 out. 2009.
  31. UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. AM0025 “Avoided emissions from organic waste through alternative waste treatment processes. Disponível em <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/approved.html>>. Acesso em: 2 dez. 2009.
  32. UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site. Disponível em <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/approved.html>>. Acesso em: 2 dez. 2009.
  33. UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Tool to calculate the emission factor for an electricity system. Disponível em <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/approved.html>>. Acesso em: 2 dez. 2009.