

**TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)
COM VISTAS À GERAÇÃO DE ENERGIA: estudo de caso em usina termoquímica em
fase de implantação em Boa Esperança - MG**

Diogo Alves Cunha¹

Laisa Cristina Carvalho²

RESUMO

Este trabalho aborda o tratamento e destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos em um caso prático, tendo como resultado a geração de energia, a partir de uma planta de Usina Termoquímica de transformação de lixo, em implantação no município de Boa Esperança - MG. Foi levantada a tecnologia empregada, comparando-a com as mais utilizadas ao redor do mundo, verificando assim sua viabilidade. Tal abordagem se faz necessária devido à necessidade de resolução do grave problema de destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil e também da criação de fontes alternativas à matriz energética atual. O objetivo deste trabalho é analisar, mediante estudo prático, se o emprego da técnica de Gaseificação por leito Fluidizado, utilizada na Planta da Usina Termoquímica em implantação no município, é viável quando comparada a algumas tecnologias mais utilizadas, disponíveis para transformação de RSU em energia elétrica. Este intento foi conseguido mediante uma pesquisa exploratória e estudo de caso, realizado na própria planta, a qual abordou a proposta de implantação da usina e entrevista com o responsável técnico. A pesquisa demonstrou que a técnica de gaseificação, eleita para aplicação na planta da Usina Termoquímica de Boa Esperança, torna-se a melhor rota tecnológica para tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) com vistas à geração de energia (*waste-to-energy*) para atender as demandas do município, sendo capaz de resolver o passivo acumulado de Resíduos Sólidos Urbanos, atendendo dessa maneira aos aspectos técnicos, econômicos, ambientais, sociais e legais envolvidos.

Palavras-chave: Destinação. Energia. Resíduos Sólidos Urbanos.

¹ Diogo Alves Cunha (discente do curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas - Grupo Unis). E-mail: diogocunha.eng@gmail.com.

² Prof. Dra. Laisa Cristina Carvalho. Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Minas Gerais, mestre e doutora em Estruturas e Construção Civil pela Universidade Federal de São Carlos.

1 INTRODUÇÃO

Aproximadamente “2,01 bilhões de toneladas de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) são gerados anualmente pelo mundo, e espera-se que em 2050 esse número chegue a 3,40 bilhões de toneladas, um aumento de quase 70%.” (IPEA, 2020). A partir de tal constatação, torna-se premente repensar o impacto desses resíduos, pois o seu tratamento inadequado pode se tornar insustentável ambientalmente, trazendo significativos prejuízos à humanidade.

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, levantado em 2019 e divulgado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), pode-se observar que no país são geradas 216.629 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos (RSU). Esse número vem apresentando constante crescimento com o passar dos anos. A geração per capita (kg/hab/ano) passou de 348,3 em 2010 para 379,2 em 2019.

Atualmente, a destinação final da parte coletada destes resíduos é majoritariamente encaminhada para aterros sanitários, aterros controlados e lixões. Por conseguinte, ainda segundo dados da ABRELPE (2020), 40,5% destes estão destinados a rotas inadequadas, tornando a problemática do lixo inevitável.

Diante desses dados pode-se observar que, em dez anos, a redução da destinação inadequada é quase irrisória em relação ao tempo decorrido, sendo de apenas 2,7 pontos percentuais.

Segundo Barros (2017), cada real investido em saneamento básico, incluso no gerenciamento de resíduos, preserva 9 reais de despesas com a saúde (FUNASA, 2017).

O tratamento adequado de resíduos sólidos urbanos é um processo que traz dificuldade a todos os municípios brasileiros, sendo essa uma tarefa de crítica importância para garantir qualidade de vida aos cidadãos e que deve ser feita em consonância com as devidas medidas de preocupação com a sustentabilidade e contaminação ambiental.

Sabe-se que houve falhas na implantação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). O plano propunha resolver a problemática existente no que se refere a todas as etapas de geração de resíduos, desde o planejamento prévio de manejo até a execução de programas e projetos (VG RESÍDUOS, 2020).

Essas falhas, juntamente com o aumento mundial das práticas sustentáveis e a busca pelas metas ambientais acordadas pelos países em cúpulas ambientais, fizeram com que se demandasse a necessidade de criação de fontes alternativas à matriz energética atual. Tornou-se então um grande desafio aliar o fim deste grande passivo ambiental à eficiência da produção

de energia oriunda de transformações de resíduos, tendo o mínimo impacto possível ao Meio Ambiente.

Considerando a importância desse tema para a sociedade, este trabalho aborda o tratamento e destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Tem como objetivo analisar se o emprego da técnica de Gaseificação por leito Fluidizado, utilizada na Planta da Usina Termoquímica em implantação no município de Boa Esperança é viável quando comparada a algumas tecnologias mais utilizadas, disponíveis para transformação de RSU em energia elétrica.

A pesquisa exploratória e o estudo de caso foram realizados a partir de uma planta de Usina Termoquímica de transformação de lixo, em implantação no município onde foi levantada a tecnologia a ser empregada, comparando-a com as mais utilizadas ao redor do mundo, verificando assim sua viabilidade.

É importante salientar a importância do trabalho para a comunidade local e do projeto da Usina como um todo no âmbito nacional, uma vez que abre portas para possíveis e definitivas soluções para este grave problema nacional: a destinação de RSU.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A criação de mecanismos para correta destinação final de RSU é fundamental. No entanto deve ser escolhida a técnica que melhor se enquadre às necessidades locais e possua menor impacto ambiental possível.

A maioria dos processos conhecidos, que envolvem a recuperação energética dos resíduos, demandam minuciosas providências devido a emissões de substâncias nocivas ao meio ambiente, as quais são rigorosamente fiscalizadas pelos órgãos ambientais, além de exigir a separação dos materiais/compostos aptos a serem aproveitados a respectiva rota.

Dentre os diversos processos, foram analisados os processos mais utilizados ao redor do mundo, sendo eles a incineração, a pirólise e a gaseificação.

2.1 Incineração

Segundo Cheng e Hu. (2010), o processo de incineração consiste na queima direta dos resíduos em altas temperaturas e excesso de oxigênio, promovendo sua destruição térmica em fornalhas tradicionais, com redução substancial de volume e massa do resíduo, acopladas em

caldeiras para geração de vapor de alta pressão. Esse vapor é utilizado posteriormente para a geração de energia elétrica via rota termodinâmica (Ciclo Rankine).

A incineração pode ser dividida em etapas. A primeira etapa consiste na preparação do resíduo, baseada em um plano de queima para evitar a formação demasiada de poluentes, além controlar a temperatura interna da fornalha com base no poder calorífico inferior do material (PCI). (CHENG e HU, 2010)

A segunda etapa consiste na combustão dos resíduos em altas temperaturas, promovendo desta forma sua destruição térmica com grande liberação de calor. Na sequência há o controle de poluentes de forma minuciosa, o controle dos efluentes restantes e por fim o manuseio e o encaminhamento das cinzas para aterro classe I, o qual é específico para este fim. (CHENG e HU, 2010)

A queima ocorre geralmente em dois estágios. O primeiro estágio ocorre na câmara primária, a qual é a receptora direta do resíduo sólido e possui temperatura suficientemente alta para promover a transformação dos compostos em gases e o restante em pequenas partículas (cinzas). Neste primeiro estágio a temperatura de trabalho está em torno de 500 °C a 900°C. (CHENG e HU, 2010)

O segundo estágio consiste no encaminhamento da mistura de gases e material particulado gerados na câmara primária para a câmara secundária para sua completa combustão em alta temperatura em um curto intervalo de tempo. O tempo de residência empírico para resíduos sólidos urbanos é de 30 minutos para o primeiro estágio (câmara primária) e de 2 a 3 segundos para a combustão completa dos gases no segundo estágio (câmara secundária). Nesse caso, a atmosfera é altamente oxidante (20 a 30% de excesso de oxigênio) e a temperatura de trabalho varia normalmente entre 1100°C a 1250°C.

Os poluentes atmosféricos formados nesta etapa são o CO₂, água, alguns compostos denominados dibenzo-p-dioxinas cloradas (CDD) e dibenzofuranos clorados (CDF), conhecidos comumente como dioxinas e furanos, NO_x, SO_x e HCL. (CHENG e HU, 2010)

2.2 Pirólise

A pirólise é um processo físico-químico em que ocorre a decomposição da matéria por meio da exposição do material combustível à média temperatura e ausência de oxigênio. Neste processo, o combustível é confinado em um ambiente hermético de elevada temperatura e, na ausência de oxigênio, o material é destilado, por entrar em combustão. O processo é endotérmico, portanto, requer uma fonte externa de energia térmica para aporte no sistema e

sustentabilidade do meio (FILHO, 2014). Porém, trata-se de uma alternativa mais limpa quando comparada ao tratamento convencional de incineração.

Há algumas décadas esse processo tem sido estudado constantemente por gerar produtos líquidos com uma densidade de energia muito elevada, podendo ser aprimorado para combustíveis limpos e produtos químicos de valores muito altos. (WILLIAMS; BESLER, 1996).

O processo de pirólise conta com diversas etapas. A primeira configura uma zona de secagem onde o resíduo submetido a alta temperatura perde água por evaporação. O calor latente na troca de fase da água absorve muita energia do meio, tornando essa zona com menor temperatura e dependente de uma fonte de calor contínua para garantir a sustentabilidade das reações. O gás exportado muitas vezes necessita retornar ao sistema, para fornecer o aporte térmico externo necessário para manutenção da temperatura. (SANTOS, 2011).

Subsequentemente, o reagente alcança a zona pirolítica, com temperaturas entre 500°C e 900°C, onde em primeiro momento os voláteis são desprendidos e carregados, gerando o gás do processo. (SANTOS, 2011).

Todo oxigênio ainda presente no processo é consumido nessa etapa por oxidação, então a massa sobressalente é destilada formando alcatrão e carbonáceos não convertidos.

Dessa forma, no processo de pirólise ocorre a degradação do combustível por meio do aumento da temperatura, em decorrência da qual, formam-se três produtos, sendo eles: carvão, óleo e gás pirolítico. Pode ocorrer maximização de algum desses produtos a depender das condições do trabalho do reator (SANTOS, 2011).

A depender do combustível de entrada, as condições físico-químicas dos produtos de pirólise variam. A título de exemplo, com a introdução de biomassa o óleo gerado apresenta baixo teor de enxofre (AIRES et al. 2003).

2.3 Gaseificação

O processo de gaseificação consiste na conversão de um combustível sólido em um combustível gasoso sem a ocorrência de queima/chama. A geração do gás advém de reações termoquímicas em altas temperaturas (DIAS, 2006).

Esta rota tecnológica pode ser uma solução definitiva para o RSU, uma vez que garante o aproveitamento energético da fração orgânica, bem como da fração inorgânica do resíduo, portanto independe de sua separação prévia.

Um dos grandes objetivos do processo de gaseificação é maximizar a produção de gases, os quais são compostos principalmente de CO, H₂ e CH₄ (ARENA, 2012). Sendo assim, a gaseificação pode ser vista como uma forma de flexibilização do uso energético do resíduo sólido urbano e apresentar-se como uma tecnologia distinta às fontes tradicionais derivadas de combustível fóssil (FERNANDES, 2004).

O gás oriundo do processo pode ser aplicado para diversas finalidades industriais, como a geração de energia elétrica, através de rotas termodinâmicas (ciclo Otto e ciclo Rankine). A melhor eficiência no aproveitamento energético está no ciclo Otto com 35%, porém sua viabilidade econômica está limitada a 2 MWe devido ao custo de importação das tecnologias adequadas. Para a geração de potências superiores a 2 MWe, a utilização do ciclo Rankine com rendimento de 25%, torna-se a opção mais viável economicamente para a geração elétrica com gaseificadores, tanto pelo ganho de escala tanto pelo menor investimento R\$/MW instalado. (INFIESTA, 2015).

3. METODOLOGIA

Em informações cedidas pela Secretaria de Obras e Serviços Públicos, o município de Boa Esperança gera em torno de 40 toneladas por dia de RSU, que até o momento são depositados a céu aberto. Por este motivo está sendo implantada uma planta de uma Usina Termoquímica de transformação de RSU em energia elétrica.

Uma iniciativa oriunda de um tripartite de Furnas Centrais Elétricas, Município e a Empresa Carbogás Energia (que detém uma tecnologia 100% nacional) está em andamento atualmente e pretende banir a destinação inadequada de RSU no município nos próximos anos. Para que o problema do passivo seja de fato resolvido, deverá ser realizada a escolha adequada da técnica empregada, para que assim seja possível a potencial geração de energia elétrica, tendo como resultado o mínimo passivo ambiental dentre as técnicas.

A fim de analisar, mediante estudo prático, se o emprego da técnica de Gaseificação por leito Fluidizado, utilizada na Planta da Usina Termoquímica em implantação no município de Boa Esperança - MG, é viável quando comparada a algumas tecnologias mais utilizadas, disponíveis para transformação de RSU em energia elétrica, a metodologia de trabalho trata-se de uma pesquisa exploratória, estudo de caso, referente à implantação da usina supracitada, sendo composta pelas seguintes etapas: (i) pesquisa documental específica referente à implantação da usina termoquímica no município de Boa Esperança através de publicações oficiais; (ii) entrevista realizada com o responsável técnico da empresa detentora da tecnologia

que está sendo implantada no município; (iii) Consolidação das informações obtidas e realização de modelo matemático simplificado para a usina de Boa Esperança, com capacidade de transformação de 41,4 ton de RSU com características locais, para obtenção da quantidade de geração de energia e a taxa de geração por tonelada de resíduo; e (iv) avaliação dos resultados. O detalhamento das etapas é apresentado a seguir.

3.1 Proposta de implantação da usina

Uma pesquisa documental foi realizada no intuito de prover embasamento teórico para os estudos das tecnologias existentes. Uma análise macro necessitou ser realizada principalmente com foco nas tecnologias mais utilizadas nesse tipo de processo, bem como qual seria o balanço de viabilidade de utilização de cada uma delas, verificando tanto os passivos gerados pelo processo, como o equilíbrio financeiro entre custos de implantação e operação x resolução do problema ambiental e geração de energia.

A empresa detentora da tecnologia possui em suas dependências uma planta piloto, a qual é utilizada para realização de ensaios diversos em relação à transformação de resíduos sólidos e geração de energia.

Dentre os diversos documentos disponibilizados foram pesquisados: análise química de resíduos sólidos de Boa Esperança - MG, realizada pelo laboratório CTQ Ambiental, análises químicas do gás de síntese produzido por gaseificação em leito fluidizado circulante de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos, realizado pela White Martins; análise das cinzas provenientes do tratamento termoquímico de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos em gaseificador em leito fluidizado circulante, realizado pela Analytical.

3.2 Entrevista com o responsável técnico

Para que os resultados pudessem ter efetividade, após análise documental e levantamento de todos os possíveis questionamentos acerca das tecnologias estudadas, foram realizadas três entrevistas com o Sócio Proprietário e pesquisador da empresa detentora da tecnologia, as quais foram primordiais para levantamento das informações específicas de implantação de cada uma das tecnologias. As respostas foram obtidas através de dados reais de pesquisas conduzidas pelo próprio entrevistado, sendo que ele direcionou o modelo matemático para obtenção da taxa de geração para cada técnica.

A escolha da técnica foi realizada através de um criterioso levantamento de prós e contras, encontrados em cada uma das técnicas, sendo esses tabulados e analisados e demonstradas as respostas a seguir.

4. RESULTADOS

Para a viabilidade técnica do empreendimento é necessário que se tenha um balanço de massa e energia positiva, avaliando assim sua energia de entrada, ou seja, o potencial energético dos RSU gerados e aplicados na planta.

Para tanto, como ainda não foi possível realizar a operação na própria planta, pelo fato de ainda estar em construção, o balanço de massa e energia utilizará uma média dos resultados fornecidos pela empresa detentora da tecnologia, que analisou as características de resíduos coletados em no município de Boa Esperança. A metodologia aplicada para encontrar estes valores consiste na amostragem efetuada pela coleta, trituração, homogeneização, quarteramento (conforme NBR 10.007), visando maior representatividade para análises químicas dos resíduos provenientes destes municípios, tanto in natura (fresco) quanto recuperados do passivo ambiental armazenado. As amostras de resíduos do município de Boa Esperança foram coletadas em 05/08/2016 e analisadas em 08/08/2016.

Com a finalidade de elucidar a respeito de cada tecnologia de forma abrangente, foram considerados conceitos técnicos e práticos, com as considerações condizentes com o tratamento de 41,4 ton/dia de resíduos sólidos urbanos. Este número foi obtido conforme cálculo demonstrado para a geração municipal de uma população de 40.000 habitantes, tendo como base a taxa de geração de RSU por habitante, obtida no Panorama dos Resíduos Sólidos: (ABRELPE, 2017).

$$40.000 \text{ Habitantes} \times \frac{1035 \times \frac{g}{\text{habitante}}}{\text{dia}} \times 10^{-3} \frac{kg}{g} = 41.400 \text{ kg/dia}$$

Através desse índice, foram gerados cálculos matemáticos, detalhados nos itens a seguir, para obtenção da taxa de geração de energia por tonelada de RSU, sendo as características dos resíduos tratadas de maneira uniforme. A taxa de geração de energia é a principal grandeza que afere a eficiência energética da planta, sendo melhor definida como a

quantidade de energia que se consegue gerar no processamento de cada tonelada de RSU, sendo parametrizadas para fins de cálculo.

Para fins de padronização na análise dos resultados, foi considerado o emprego da tecnologia para a geração de energia elétrica em processo de oxidação direta em caldeiras, gerando vapor, e exercendo trabalho em um turbo gerador. O motivo da escolha dessa técnica e padronização é em decorrência de serem os equipamentos rotores mais comuns utilizados para geração de energia de trabalho através de aquecimento sendo de fácil aquisição em âmbito nacional. A caldeira principal, para fins de logística, foi fabricada e fornecida por uma empresa da cidade de Varginha - MG.

4.1 Taxa de geração - Incineração

No processo de Incineração, não há produção de gás de síntese para queima antes da oxidação em caldeira, pois o vapor gerado já faz parte do próprio processo de resfriamento do incinerador.

Segundo EPE (2014), a eficiência energética da incineração é de aproximadamente 22% de transformação do resíduo sólido urbano em MWe. Ainda segundo EPE (2014), temos que o Poder Calorífico Inferior (PCI) do lixo, da maneira como entra no incinerador, observando aos teores de umidade em que são encontrados possui média de 1800 Kcal/Kg. Observando assim, uma geração estimada de 0,816 MWe.

$$\frac{\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}} \times \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}\right) \times 1800 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}}{0,837} \times 0,22 \times \frac{10^{-6}}{\text{Mwe}} = 0,816 \text{ MWe}$$

Logo, podemos prever uma taxa de geração de 0,473 MW por tonelada de RSU.

$$\left(\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}}\right) = 0,473 \text{ MWe}/\text{ton}_{\text{RSU}}$$

Segundo o entrevistado, para o aumento da eficiência, inevitavelmente faz-se necessário o aumento da pressão e da temperatura do vapor da caldeira, o que provoca o aumento da

corrosão nos tubos do superaquecedor, crescendo exponencialmente a partir de 400°C. Desta forma, a resistência à corrosão e o aumento de eficiência só se tornam possíveis de duas maneiras: i. introdução de caldeiras de inonel (aço inoxidável austenítico e as ligas de níquel com elevada resistência à corrosão, devido ao alto teor de cromo – Cr), ou outros materiais nobres, para resistir à corrosão causada pelos gases da queima do RSU como HCl (ácido clorídrico) e H₂SO₄ (ácido sulfúrico); ii. introdução de ciclos combinados utilizando gás natural como combustível suplementar. Porém, esses processos são inviáveis no Brasil devido aos altos custos de importação, visto que os materiais empregados nestas soluções não são encontrados no mercado nacional:

Em relação à umidade e PCI do RSU brasileiro, uma planta de resíduos integralmente urbanos se viabiliza economicamente com, pelo menos, 1000 toneladas por dia (MARTINS, 2014), o que torna a tecnologia inapta para a maioria dos municípios brasileiros, salvo a formação de grandes consórcios.

4.2 Taxa de Geração - Pirólise

Dentre os tipos existentes de Pirólise, a melhor metodologia empregada para priorização de gás combustível corresponde a pirólise ultrarrápida, ou seja, com temperatura de operação de 900°C, cuja formação de gases combustíveis atinge aproximadamente 50% da massa de entrada. Para produção de energia na pirólise, dentre outros produtos, é gerado um gás combustível, conhecido como Gás de Síntese (Syngas), que por sua vez deverá ser queimado em uma caldeira para movimentação de um gerador a vapor. A composição molecular do gás combustível produzido nestas temperaturas é de majoritariamente hidrogênio (49,1%), seguido de monóxido de carbono (22,37%) e metano (16,34%), os gases combustíveis são diluídos em CO₂ sobressalente (12,19%). (FIGUEROA, 2015).

Ao explorarmos sua composição química, e, dentro dos percentuais de PCI e densidades de cada componente, chegaremos ao PCI do resultante do gás de síntese.

$$H_{2_{PCI}} = 2385 \text{ kcal}/Nm^3; CO_{2_{PCI}} = 0 \text{ kcal}/Nm^3;$$

$$CH_{4_{PCI}} = 8550 \text{ kcal}/Nm^3; CO_{PCI} = 2750 \text{ kcal}/Nm^3$$

$$Syngas_{PCI} = (0,491 \times 2385) + (0,1219 \times 0) + (0,1634 \times 8550) + (0,2237 \times 2750) = 3183 \text{ kcal}/Nm^3$$

$$H_{2_{densidade}} = 0,09 \text{ kg}/Nm^3; CO_{2_{densidade}} = 1,98 \text{ kg}/Nm^3;$$

$$CH_{4_{densidade}} = 0,66 \text{ kg}/Nm^3; CO_{densidade} = 1,14 \text{ kg}/Nm^3$$

$$Syngas_d = (0,491 \times 0,09) + (0,1219 \times 1,98) + (0,1634 \times 0,66) + (0,2237 \times 1,14) = 0,65 \text{ kg}/Nm^3$$

$$Syngas_{PCI} = \frac{3183 \text{ kcal}/Nm^3}{0,65 \text{ kg}/Nm^3} = 4897 \text{ kcal}/kg$$

Estudos conduzidos pelo entrevistado na planta piloto, apontaram que após transformação do RSU em CDR, há perda de aproximadamente 54% da massa do resíduo sólido *in natura*. Assim, a energia da planta, que se depreende do potencial térmico inerente ao gás produzido corresponde a 2,28 Gcal/h.

$$\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}} \times 0,54 \text{ (transf. em CDR)} \times \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}\right) \times 0,5 (\eta) \times 4897 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times \frac{10^{-6} \text{Gcal}}{\text{kcal}} = 2,28 \text{ Gcal/h}$$

Entretanto, para a própria manutenção da temperatura da planta, alcançando 900°C, será necessário o aporte térmico referente ao calor sensível do combustível e o calor latente de evaporação da umidade, adentrando em temperatura ambiente na alimentação, remanescentes no CDR de aproximadamente 15%.

Portanto, o aporte térmico para atingir as temperaturas de reação no combustível é de 0,28 Gcal/h e para evaporação da umidade mais 0,075 Gcal/h que deverão ser provenientes de alguma fonte de calor, resultando do balanço 8,05 Gcal/h;

$$\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}} \times 0,54 (\text{transf. em CDR}) \times \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}\right) \times 0,28 (\text{calor específico CDR}) \times (900 - 25^\circ\text{C})/0,8 = 0,28 \text{ Gcal/h}$$

$$\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}} \times 0,54 (\text{transf. em CDR}) \times \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}\right) \times 0,15 (\text{calor específico CDR}) \times 540 = 0,075 \text{ Gcal/h}$$

$$2,28 \frac{\text{Gcal}}{\text{h}} - 0,28 \frac{\text{Gcal}}{\text{h}} - 0,075 \frac{\text{Gcal}}{\text{h}} = 1,925 \frac{\text{Gcal}}{\text{h}} \text{ ou } \left(\times 4,184 \frac{\text{GJ}}{\text{Gcal}}\right) = 8,05 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}$$

Com esta energia disponível, é possível oxidar o produto do processo em caldeiras para geração de 2.573,07 kg de vapor por hora.

$$\frac{8,05 \frac{\text{GJ}}{\text{h}} \times 0,9 (\text{rendim. caldeira})}{0,00281570 \frac{\text{GJ}}{\text{kg}} (\text{entalpia de formação})} = 2.573,07 \text{ Kg de vapor}$$

O vapor, por sua vez, deverá exercer trabalho em uma turbina acoplada a um gerador. Para esta média de geração com os equipamentos disponíveis de mercado, o rendimento do equipamento é de 1 MWh por 4,6 toneladas de vapor.

$$\frac{2.573,07 \text{ Kg de vapor}}{4600 \frac{\text{kg}}{\text{MW}} (\text{entalpia de formação})} = 0,56 \text{ MWe}$$

Logo podemos prever um potencial de geração elétrica de 0,32 MW de energia por tonelada de resíduo sólido urbano.

$$\frac{0,56 \text{ MWe}}{\left(\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}}\right)} = 0,32 \text{ MWe/ton}_{\text{RSU}}$$

Nestes cálculos não foram considerados os consumos de energia para o processamento dos resíduos sólidos urbanos, nem o consumo parasita da própria planta, como motores, esteiras transportadoras e etc.

4.3 Taxa de Geração - Gaseificação

Como o processo de gaseificação é autossuficiente, não se faz necessário aporte externo de energia térmica para a manutenção das temperaturas. Segundo Wu (2008), o rendimento do gás de saída, em relação à energia disponível é de 75%. A gaseificação depende da confecção do CDR apto ao processo termoquímico. Para tanto, considerando as condições do RSU nacional com base em estudo gravimétrico dos resíduos provenientes da região sul de MG, obtidos em ensaios laboratoriais da detentora da tecnologia, podemos estimar que 155 toneladas de resíduo por dia geram 54% da massa de entrada de RSU em CDR com 15% de umidade e livre de inertes, apresentando um PCI de 4000 kcal/kg. Assim, a energia disponível no gás de síntese originado é de 11,67 GJ/h.

$$\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}} \times 0,54 \text{ (transf. em CDR)} \times \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}\right) \times 0,75 (\eta) \times 4000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \times \frac{10^{-6} \text{Gcal}}{\text{kcal}} = 2,79 \frac{\text{Gcal}}{\text{h}} \text{ ou } \left(\times 4,184 \frac{\text{GJ}}{\text{Gcal}}\right) = 11,67 \frac{\text{GJ}}{\text{h}}$$

Com esta energia disponível, é possível oxidar o produto do processo em caldeiras para geração de 4.144,62 kg de vapor por hora.

$$\frac{11,67 \frac{\text{GJ}}{\text{h}} \times 0,9 \text{ (rendim. caldeira)}}{0,00281570 \frac{\text{GJ}}{\text{kg}} \text{ (entalpia de formação)}} = 4.144,62 \text{ Kg de vapor}$$

O vapor, por sua vez, deverá exercer trabalho em uma turbina acoplada a um gerador. Para esta média de geração com os equipamentos disponíveis de mercado, o rendimento do equipamento é de 1 MWh por 4,6 toneladas de vapor.

$$\frac{4.144,62 \text{ Kg de vapor}}{4600 \frac{\text{kg}}{\text{MWh}} \text{ (entalpia de formação)}} = 0,90 \text{ MWe}$$

Logo podemos prever uma geração de 0,52 MW de energia por tonelada de RSU.

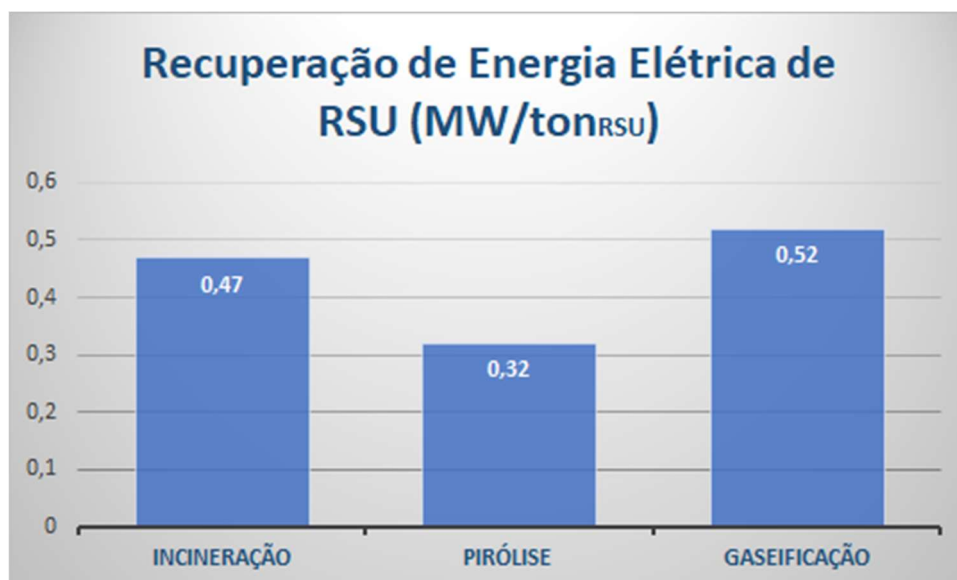
$$\frac{0,90 \text{ MWe}}{\left(\frac{41,4 \frac{\text{ton}}{\text{dia}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{dia}}}\right)} = 0,52 \text{ MWe/ton}_{\text{RSU}}$$

Nestes cálculos não estão sendo considerados os consumos de energia para o processamento dos resíduos sólidos urbanos, nem o consumo parasita da própria planta, como motores, esteiras transportadoras e etc.

4.4 Análise e comparação dos processos

O gráfico a seguir sintetiza os resultados encontrados de recuperação de energia, ora calculados.

Figura 01 – Gráfico comparativo de recuperação energética



Fonte: o Autor

Nota-se que o processo de Gaseificação apresenta, além de vantagens ambientais, com a eliminação dos aterros, maior potencial de recuperação de energia.

Do ponto de vista geral, será apresentado a seguir uma tabela comparativa que ilustra, primeiramente a taxa de geração de energia encontrada acima (primeira linha), bem como

outros quesitos importantes que devem ser analisados quando da implantação desse tipo de empreendimento. Os dados qualitativos foram obtidos através de entrevista com o responsável técnico da empresa detentora da tecnologia.

Quadro 01 – Análise comparativa de prós e contras das técnicas de transformação de energia

	Incineração	Pirólise	Gaseificação
Geração de Energia Elétrica (MW/Ton)	0,47	0,32	0,52
Balanco Energético	Positivo	Negativo	Positivo
Alto Custo de Implantação	Sim	Não	Não
Necessidade de processamento de RSU em CDR	Não	Sim	Sim
Viabilidade econômica para pequenos e médios municípios	Não	Não	Sim
Elimina a necessidade de aterros sanitários	Sim	Não	Sim
Atendimento às leis estaduais e federais regentes em MG	Não	Sim	Sim
Atendimento à políticas sociais	Não	Sim	Sim
Risco de contaminação ambiental	Alto	Médio	Baixo
Atendimento ao projeto da ABNT-NBR 16849 - Dez 2019	Não	Não	Sim
Solução definitiva para destinação final de RSU	Sim	Não	Sim

Fonte: o Autor

Como podemos observar, destacado pela cor azul, o processo de gaseificação, quando comparado aos outros, propicia número consideravelmente maior de pontos positivos, justificando assim sua escolha.

Pelas presentes linhas, buscou-se trazer o embasamento necessário acerca de alguma das mais utilizadas tecnologias comerciais disponíveis para a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos com vistas à geração de energia elétrica. As rotas foram avaliadas sob as condições do próprio município (40.000 habitantes), fundamentadas no desenvolvimento tecnológico nacional, aspectos físico-químicos do resíduo local e nos cenários políticos sociais atuais, sendo que, no caso de Boa Esperança – MG, o RSU gerado no próprio município teve seu potencial energético avaliado.

Dentre os estudos, a pirólise foi considerada ineficiente diante das outras rotas com recuperação em vistas de geração de energia elétrica, visto que seu balanço energético é negativo por consequência das reações endotérmicas, tendo seu nicho de aplicação na produção de coprodutos a partir de biomassa e outros combustíveis.

Na análise técnica de todas as rotas de recuperação energética apresentadas, a gaseificação e incineração apresentaram um rendimento termodinâmico superior às demais tecnologias, além de promover rotas definitivas que inibem a necessidade de manter aterros

sanitários, coadunando-se com a política nacional dos resíduos sólidos e a portaria interministerial nº 274.

Contudo, no caso da incineração, projetos com volumes baixos de resíduo como o empregado em pequenos e médios municípios não se viabilizam economicamente, como no caso de Boa Esperança. Neste âmbito, a gaseificação é vantajosa, conforme também ilustram as pesquisas comparativas alhures indicadas, que demonstram investimentos substancialmente menores e salvagam a possibilidade de financiamento via BNDES, com equipamento de desenvolvimento nacional já inscritos no FINAME sob o número 03412895.

De forma complementar, a utilização de gaseificação no plano de gestão de resíduos dos pequenos e médios municípios ocasiona a geração de energia de modo descentralizado, o que favorece a diversificação da matriz energética nacional, acarretando uma maior segurança ao sistema atual. A propósito de remate, a incineração também se encontra em discordância com as leis estaduais de Minas Gerais no Plano Estadual de Resíduos Sólidos.

De mais a mais, o sistema de gaseificação não acarreta prejuízos na cadeia político-social estabelecida pelos catadores e cooperativas, ao passo de que a gaseificação abrange a parcela indesejada ou não utilizada por estas instituições que, segundo ABRELPE, configuram 94% dos resíduos sólidos urbanos. Colabora-se, assim, com as cooperativas pois, na geração do CDR, os metais de grande interesse são separados de forma automática e podem ser encaminhados para estes grupos, assim como possibilita a recuperação energética do resíduo que já está enterrado e acumulado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi analisar, mediante estudo prático, o processo de Gaseificação, utilizado na Planta da Usina Termoquímica em implantação no município de Boa Esperança, realizando assim um estudo comparativo com as principais técnicas existentes (Incineração e Pirólise), verificando assim sua viabilidade de utilização no município.

Para fins de melhor embasamento, o primeiro passo do trabalho foi analisar o panorama atual da destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), e, em seguida aprofundar o conhecimento nas técnicas mais utilizadas de transformação de RSU com vistas a geração de energia: Gaseificação, Incineração e Pirólise.

Paralelamente, foram buscadas em diversas literaturas, bem como em entrevistas com o pesquisador e responsável técnico da empresa detentora da tecnologia implantada em Boa

Esperança, fatores importantes da técnica utilizada e quais os principais critérios poderiam ter levado à escolha.

Dentre esses fatores, partiu-se do princípio de que, para ser viável, uma usina, claro, além de diversos fatores, necessita apresentar uma taxa elevada de geração de energia por tonelada de RSU, que justifique sua operação e que, a energia produzida não fosse demandada completamente no processo.

Através de equações matemáticas e dados parametrizados, foi possível observar que, o processo de gaseificação, com uma taxa de 0,52 MW/Ton, apesar muito próxima dos 0,47 MW/Ton apresentados na incineração, quando analisado conjuntamente a balanço energético, custo de implantação, viabilidade para pequenos e médios municípios, eliminação de aterros sanitários, atendimento à legislação, riscos de contaminação ambiental, atendimento à NBR 16849 e solução definitiva para RSU, apresentou resultados extremamente favoráveis em relação aos demais.

Com esses resultados, a conclusão final é que a técnica de gaseificação, eleita para aplicação na planta da Usina Termoquímica de Boa Esperança, torna-se a melhor rota tecnológica para tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) com vistas à geração de energia (*waste-to-energy*) para atender as demandas do município, sendo capaz de resolver definitivamente o passivo acumulado de Resíduos Sólidos Urbanos, atendendo dessa maneira aos aspectos técnicos, econômicos, ambientais, sociais e legais envolvidos.

4.2 Trabalhos futuros

Com relação à continuidade da pesquisa e trabalhos futuros, poderemos evidenciar o tema **Melhoria de eficiência de geração energética em Gaseificador por Leito Fluidizado**, com objetivo de aprofundar o conhecimento nessa técnica e até mesmo contribuir para melhorias em sua eficiência ou processo.

TREATMENT AND FINAL DISPOSAL OF URBAN SOLID WASTES (USW) FOR ENERGY GENERATION: a case study in a thermochemical plant under implementation in Boa Esperança - MG

ABSTRACT

This work approaches the treatment and final destination of Urban Solid Waste in a practical case, resulting in the generation of energy from a thermochemical plant for the transformation of waste, being implemented in the municipality of Boa Esperança - MG. The technology used was surveyed, comparing it with the most used around the world, thus verifying its viability. Such an approach is necessary due to the need to solve the serious problem of final disposal of Urban Solid Waste in Brazil and also the creation of alternative sources to the current energy matrix. The objective of this work is to analyze, through a practical study, if the use of the Fluidized Bed Gasification technique, used in the Thermochemical Plant Plant being implemented in the city, is viable when compared to some more used technologies, available for transforming MSW into energy electric. This intent was achieved through an exploratory research and case study, carried out at the plant itself, which addressed the proposal for the implementation of the plant and an interview with the technical manager. The research showed that the gasification technique, chosen for application at the Boa Esperança Thermochemical Plant, becomes the best technological route for the treatment and final disposal of urban solid waste (MSW) with a view to energy generation (waste-to -energy) to meet the demands of the municipality, being able to resolve the accumulated liabilities of Solid Urban Waste, thus meeting the technical, economic, environmental, social and legal aspects involved.

Keywords: Disposal. Energy. Urban Solid Waste.

REFERÊNCIAS

AIRES, RAQUEL DIAS; Thiago Araújo Lopes, Rodrigo de Moraes Barros, Cassiana M. R. Coneglian; Geraldo Dragoni Sobrinho; Sandro Tonso e Ronaldo Pelegrini. **“Pirólise”**; Observatório Ambiental, 2003.

ARENA, Umberto. **Process and technological aspects of municipal solid waste gasification**. A review. Waste management, v. 32, n. 4, p. 625-639, 2012.

BRASIL. Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos (2020)**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos#:~:text=RSU%20no%20mundo%20e%20no,um%20aumento%20de%20quase%2070%25.21/02>. Acesso em: 21 fev. 21.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **"Cada real gasto em saneamento economiza nove em saúde", disse ministro da Saúde (2017)**. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/todas-as-noticias/-/asset_publisher/lpnzx3bJYv7G/content/-cada-real-gasto-em-saneamento-economiza-nove-em-saude-disse-ministro-da-saude?inheritRedirect=false#:~:text=%22Cada%20real%20investido%20em%20saneamento,Funasa%22%2C%20disse%20o%20ministro. Acesso em: 21 fev. 21.

CHENG, Hefa; HU, Yuanan. **Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China**. Bioresource technology, v. 101, n. 11, p. 3816-3824, 2010.

DIAS, Susete Martins et al. **Avaliação do Potencial de Produção e Utilização de CDR em Portugal Continental**. Estudos Base, Instituto Superior Técnico, CEBQ—Centro de Engenharia Biológica e Química, 2006.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Nota Técnica DEA 18/14**. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20Invent%20A%20rio%20Energ%20A%20tico%20de%20Res%20A%20duos%20S%20C%20B%20lidos%20Urbanos%20B%201%205D.pdf>>. 2004. Acesso em: 15 maio 21.

FERNANDES, Marcelo Cortes. **Investigação experimental de gaseificação de biomassa em leite fluidizado. 2004**. 115p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264139>. Acesso em: 28 Mar. 2021.

FILHO, A. T. **Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos**. 173f. Tese (Doutorado). Programa de Pós. Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, Minas Gerais, 2014.

FURNAS. **Energia que impulsiona o Brasil - Inovação. (2021)**. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/inovacao/?culture=pt#:~:text=Res%20A%20duos%20S%20C%20B%20lidos>

dos%20Urbanos%20%E2%80%93%20RSU,-
Implanta%C3%A7%C3%A3o%20de%20planta&text=Os%20res%C3%ADduos%20s%C3%
B3lidos%20urbanos%20possuem,o%20desenvolvimento%20populacional%20das%20cidade
s. Acesso em: 28 mar. 21.

INFIESTA, Luciano. **Gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) no vale do Paranapanema** – PROJETO CIVAP. USP, 2015;

MARTINS, Guilherme Guimarães; STEIN, Raphael Duarte. **Panorama setorial 2015-2018: resíduos sólidos urbanos**. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2842>, 2014. Acesso em: 06 maio 21.

SANTOS, K. G. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo**. 2011. 261 f. Tese (Doutorado em engenharia química) - Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2011.

VG RESÍDUOS SÓLIDOS. **Entenda a situação atual do Plano Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) (2020)**. Disponível em: <https://www.vgresiduos.com.br/blog/entenda-a-situacao-atual-do-plano-nacional-dos-residuos-solidos-pnrs/>. Acesso em: 28 mar. 21.

WILLIAMS, Paul T. and BESLER, Serpil, (1996), **The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass**, *Renewable Energy*, 7, (3), 233-250

WU, C.; YIN, X.; MA, L.; ZHOU, Z.; CHEN, H. **Design and operation of a 5.5 MWe biomass integrated gasification combined cycle demonstration plant**. *Energy & Fuels*, v. 22, n. 6, p. 4259-4264, out. 2008.