



ARA 7394 – Trabalho de Conclusão de Engenharia
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Araranguá
Curso de Engenharia de Energia

POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA REGIÃO DA AMESC

CATHERINE DA ROSA ROSSI

Artigo científico apresentado ao Curso de Engenharia de Energia como requisito para aprovação na Disciplina ARA7394 – Trabalho de Conclusão de Engenharia, sob supervisão da Prof^ª. Dr^ª. Elise Meister Sommer, orientação da Prof^ª. Dr^ª. Elaine Virmond, coorientação da Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Weber Corseuil e avaliação dos seguintes docentes:

Prof^ª. Dr^ª. Elaine Virmond
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Weber Corseuil
Universidade Federal de Santa Catarina
Coorientadora

Prof^ª. Dr^ª. Maria Ángeles Lobo Recio
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Thiago Fernandes de Aquino
Faculdade SATC

Prof. Dr. Reginaldo Geremias
Universidade Federal de Santa Catarina
(Suplente)

Araranguá, 04 de dezembro de 2014.

RESUMO

O crescimento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), impulsionado pelo aumento da densidade populacional, aliado à alta demanda por energia elétrica, está gerando impactos negativos ao meio ambiente natural, social e econômico nos municípios brasileiros. Diante dessa problemática, alternativas de gerenciamentos adequados dos resíduos estão sendo elaboradas em conjunto com a geração de energia, nas quais o processo de incineração surge como uma alternativa que reduz o volume dos resíduos e permite a recuperação energética. Em Santa Catarina, os municípios da região da AMESC (Associação de Municípios do Extremo Sul Catarinense) estão presenciando o mesmo desafio, tornando atrativa a alternativa de recuperação energética a partir da incineração dos RSU gerados nessa região. Em vista disso, o potencial de recuperação energética dos RSU da região da AMESC foi estimado com base nos dados obtidos a partir da composição dos resíduos, utilizando-se equações que descrevem a potência total teórica, a energia total teórica, a população atendida e a economia de energia em três cenários, considerando-se a incineração dos RSU sem segregação dos materiais recicláveis no Cenário 1, incineração dos RSU com segregação prévia dos materiais recicláveis em 50% no Cenário 2 e incineração dos RSU com segregação prévia dos materiais recicláveis em 100% no Cenário 3. Como resultados do potencial de recuperação energética foram obtidos valores de 2,2 MW, 1,9 MW e 1,7 MW de potência total teórica; 19,37 GWh/ano, 17,14 GWh/ano e 14,91 GWh/ano de energia total teórica anual; 17,9%, 15,9% e 13,8% da população atendida; e 5.272, 4.666 e 4.059 salários mínimos equivalentes de economia de energia no Cenário 1, Cenário 2 e Cenário 3, respectivamente. Com isso, conclui-se que o potencial de recuperação energética, quando comparado com os resultados da literatura, é pequeno em todos os cenários considerados. Entretanto, os benefícios gerados nesse processo ainda podem ser alcançados mesmo com o pequeno potencial apresentado, tornando realidade o desenvolvimento sustentável nos municípios brasileiros.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Recuperação Energética. AMESC.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), impulsionado pelo aumento da densidade populacional, aliado ao uso intensivo dos recursos naturais para geração de energia, causa impactos negativos ao meio ambiente natural, social e econômico, levando a um desequilíbrio na sociedade atual.

De acordo com Gouveia (2012), o aumento na geração de resíduos sólidos está associado ao desenvolvimento econômico, ao crescimento populacional, à urbanização e à revolução tecnológica, passando a abrigar ao longo do tempo em suas composições elementos sintéticos e perigosos aos ecossistemas e à saúde humana quando não dispostos ou tratados adequadamente.

No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), a quantidade de resíduos gerados por dia aumentou 4,1% entre os anos de 2012 e 2013, dos quais 10% não eram coletados ou possuíam destino adequado, com geração média de 1,041 kg por habitante ao dia. Porém, os municípios brasileiros geram e coletam quantidades diferenciadas de RSU devido ao porte ou região de localização dos mesmos, o que traz impactos à decisão de gerenciamento e tratamento dos resíduos.

A região sul está entre as regiões que mais geram resíduos no país, ficando atrás apenas das regiões sudeste e nordeste (ABRELPE, 2013). Dentre os estados pertencentes a essa região, Santa Catarina possui uma geração de resíduos proporcional ao crescimento populacional, o qual foi de 16,8% (IBGE, 2010), tendo uma geração média de 0,768 kg por habitante ao dia, aumentando a demanda por destinação adequada dos RSU e também por consumo de energia elétrica nas residências, que teve um aumento de 18,3% no primeiro trimestre de 2014, em comparação com o mesmo período do ano de 2013 (CELESC, 2014), demonstrando a necessidade da contínua diversificação da matriz de energia elétrica com outras fontes de energia, a fim de garantir a segurança energética da população.

Diante dessas problemáticas, diversas pesquisas foram realizadas visando o melhor gerenciamento dos RSU, buscando alternativas energéticas envolvendo esses resíduos a fim de colocar em prática o desenvolvimento sustentável nos municípios brasileiros. Uma dessas alternativas, inserida em diversos países, é a incineração dos RSU com recuperação de energia como forma de tratamento dos mesmos, utilizando resíduos apropriados como combustível em caldeiras para geração de calor ou

eletricidade, podendo ser consorciado com aterros sanitários em funcionamento. Como consequência, há a redução do volume de resíduos em conjunto com a recuperação energética, podendo ainda estar aliada à segregação dos RSU para a reciclagem, ao tratamento de resíduos perigosos, ao aumento da vida útil dos aterros sanitários, à geração de empregos e ao desenvolvimento tecnológico.

Dessa forma, a recuperação energética de RSU pode ser uma solução potencial para diversos municípios brasileiros, bem como para os municípios localizados no extremo sul do estado de Santa Catarina, que fazem parte da Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense (AMESC) e que presenciam esse crescimento populacional, apresentando um aumento de 6% em comparação com o Censo de 2010 (IBGE, 2014; IBGE, 2010), e, conseqüentemente, um aumento na geração de RSU e no consumo de energia elétrica. Além do crescimento da população local, o número de habitantes da região da AMESC tende a aumentar a cada ano devido à presença de instituições federais de ensino, as quais recebem estudantes de várias partes do país a cada ano, contribuindo para o aumento da geração de resíduos na região.

Em vista disso, há possibilidade de recuperação energética dos RSU da região da AMESC com conseqüente diminuição do volume dos resíduos e geração de energia elétrica. Porém, para comprovar essa possibilidade, é necessário que se avalie o potencial de recuperação energética dos resíduos por meio da descrição da situação atual do gerenciamento dos RSU na região da AMESC, incluindo os tratamentos atuais e a disposição final dos mesmos, a fim de caracterizar os resíduos da região e dessa forma realizar uma estimativa desse potencial.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o potencial de recuperação energética dos RSU na região da AMESC por meio do processo de incineração, e como objetivos específicos: (a) verificar a situação atual do gerenciamento dos RSU da região da AMESC, incluindo os tratamentos atuais e a disposição final; (b) caracterizar os RSU da região da AMESC por meio dos dados coletados na literatura e no local de disposição atual dos RSU da região; e (c) estimar o potencial de recuperação energética dos RSU da região da AMESC por meio do processo de incineração associado à geração de energia elétrica.

Em vista disso, espera-se demonstrar à população local que é possível gerar energia por meio de um recurso que geralmente é considerado sem valor ou utilidade, além de passivo ambiental, possibilitando a promoção do desenvolvimento sustentável nos municípios da região da AMESC.

1.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Os resíduos sólidos são definidos pela NBR 10004 – Norma Brasileira de Resíduos Sólidos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como “resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (...)” (ABNT, 2004). Essa definição torna evidente a diversidade e a complexidade dos resíduos sólidos, os quais ainda são classificados nessa mesma norma em resíduos perigosos, resíduos não inertes e resíduos inertes, necessitando de um gerenciamento adequado para que não afetem a população e o meio ambiente.

De acordo com Soares (2011), as características dos resíduos sólidos urbanos variam de município para município em função de diversos fatores, como o porte do município, as atividades empregatícias, os hábitos da população, o clima e o nível educacional, além de se modificarem no decorrer dos anos. Essas características ainda podem ser reunidas em diferentes grupos: biológicas, químicas e físicas.

A degradação da matéria orgânica consiste em uma das características biológicas dos resíduos sólidos, os quais são transformados em líquidos (chorume) e gases (metano) nos aterros, acarretando na redução do volume dos RSU depositados. Já algumas das características químicas consistem no poder calorífico, na composição química e no teor de sólidos totais voláteis, os quais possibilitam a seleção de processos de tratamento e técnicas de disposição final. Por fim, algumas das características físicas consistem na composição gravimétrica, no tamanho de partículas, no teor de umidade, no peso específico e na temperatura, sendo o grupo que mais interfere no dimensionamento do sistema de gerenciamento desses resíduos (SOARES, 2011).

Na Tabela 1.1 pode-se visualizar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil (IPEA, 2012), em Santa Catarina (SANTA CATARINA, 2012) e em alguns municípios catarinenses (COMCAP, 2002; GUADAGNIN et al., 2014), sendo uma das características físicas dos resíduos sólidos que interfere no gerenciamento adequado dos RSU nos municípios brasileiros.

Segundo Oliveira (1997), é fundamental o conhecimento e o planejamento dos processos e das tecnologias para a adequada implantação ou melhoria do gerenciamento de RSU. A coleta e o transporte são ações sanitárias inclusas nesse gerenciamento, visando o afastamento dos mesmos do local onde são gerados. A etapa seguinte consiste na destinação final dos resíduos, a qual inclui tratamentos prévios como a reciclagem de

plásticos, papéis, metais e vidros segregados, a compostagem da matéria orgânica para sua utilização como adubo e a recuperação energética por meio do biogás ou incineração dos RSU.

Tabela 1.1 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil, em Santa Catarina e em alguns municípios catarinenses

| Componente | Brasil¹ (%) | Santa Catarina² (%) | Florianópolis³ (%) | Criciúma⁴ (%) | Nova Veneza⁴ (%) |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Matéria orgânica | 51,4 | 37 | 46 | 28 | 40 |
| Plásticos | 13,5 | 15 | 15 | 23 | 21 |
| Papel e Papelão | 13,1 | 12 | 14 | 15 | 13 |
| Vidro | 2,4 | 3,4 | 4 | 2,6 | 2,3 |
| Metais | 5,8 | 2,6 | 3 | 2,1 | 2,8 |
| Têxteis e couro | - | - | 4 | 10 | 6,4 |
| Outros | 16,7 | 30 | 14 | 19,3 | 14,5 |

Fonte: ¹IPEA (2012), ²Santa Catarina (2012), ³COMCAP (2002) e ⁴Guadagnin et al. (2014).

Porém, geralmente nem todos esses tratamentos são utilizados no gerenciamento de RSU, o qual pode partir diretamente para a disposição final, que consiste na distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários, observando normas operacionais específicas, os quais representavam 58,3% do destino final dos RSU no Brasil em 2013 (ABRELPE, 2013). Porém, segundo Medeiros (2012), dificilmente o tratamento vai constituir um sistema de destinação final completo ou definitivo, pois sempre haverá um restante inaproveitável, o qual deve ser disposto em um aterro sanitário adequado.

Entretanto, atualmente, a maioria dos municípios do Brasil não possui um gerenciamento de RSU integrado, eficiente e com valorização física, biológica e energética dos materiais (BNDES, 2013). Dessa forma, para que haja um gerenciamento de RSU mais adequado nos municípios do país, Medeiros (2012) afirma que uma fundamentação legal adequada se torna necessária, incluindo leis, decretos, regulamentos e procedimentos, definida nas três esferas (federal, estadual e municipal).

Contudo, desde 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), presente na Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), já é existente no Brasil, a qual surgiu como um novo marco na gestão dos resíduos sólidos no país. Essa Lei estabeleceu obrigatoriedades fundamentais aos municípios, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, para que o Brasil deixe de ser um país onde prevalecem os lixões, o desperdício e a falta de dignidade aos cidadãos que trabalham com os materiais recicláveis.

O Art. 7º dessa Lei dita os objetivos da PNRS, sendo um deles a gestão integrada de resíduos sólidos, incumbida ao Distrito Federal e aos municípios brasileiros no Art. 10º. Além disso, o Parágrafo único do Art. 11º determina o apoio e a priorização das iniciativas de soluções consorciadas ou compartilhadas entre dois ou mais municípios, por meio dos planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos, presente no Art. 14º da referida Lei. Dessa forma, os municípios que elaborarem o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos terão acesso a recursos da União destinados a empreendimentos e serviços relacionados à limpeza pública e ao manejo de resíduos sólidos ou para serem beneficiados por incentivos ou financiamentos para tal finalidade, sendo priorizados aqueles que optarem por soluções consorciadas intermunicipais e implantarem a coleta seletiva.

Ainda nessa Lei, no Art. 9º do Capítulo 1, consta que o gerenciamento de RSU deve seguir uma ordem de prioridade, consistindo em não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Também há o pronunciamento de que poderão ser utilizadas tecnologias e tratamento visando à recuperação energética dos RSU, desde que comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e acompanhada da implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental. Portanto, os RSU podem ser utilizados como combustível em usinas de recuperação energética, desde que sigam a ordem de prioridade determinada pela PNRS.

1.2 Recuperação energética de RSU

A matriz elétrica brasileira é composta por mais de 79% de fonte renováveis de energia, segundo o BEN 2014 (EPE, 2014), sendo ainda prevista uma expansão da geração de energia elétrica a partir de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) e de centrais eólicas, à biomassa e de resíduos sólidos. Entretanto, algumas dessas fontes de energia, como as PCH's e as centrais eólicas, possuem caráter difuso ou intermitente, isto é, a geração depende das condições atmosféricas e climáticas da região para atender à crescente demanda da população por energia elétrica.

Dessa forma, a recuperação energética de RSU surge como uma alternativa na oferta de energia elétrica, já que consiste em uma das formas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos largamente disponíveis, podendo ser empregada por meio da combustão do biogás dos aterros sanitários, gerado a partir da degradação dos resíduos ao longo do tempo, ou pela combustão direta dos resíduos em incineradores, produzindo vapor para

a geração de energia elétrica ou térmica, sendo semelhante ao processo utilizado em usinas térmicas convencionais de ciclo Rankine (PAVAN, 2010).

Porém, segundo o Plano Nacional de Energia 2030, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o potencial de recuperação energética de resíduos sólidos por meio da incineração no Brasil é superior à recuperação energética por meio do biogás de aterros, possuindo potencial de geração de 5.280 MW até 2030, estando previsto um acréscimo de 300 MW, no período de 2015 a 2030, na expansão de geração de energia elétrica a partir das centrais de resíduos sólidos somente na região sul do país (EPE, 2007).

De acordo com Santos (2011), a incineração é um processo para tratamento térmico de resíduos que envolve a combustão em alta temperatura das substâncias orgânicas que compõem os resíduos, levando à redução de volume e de massa, entre 85% e 90% do volume original. Adicionalmente, reduz possíveis características perigosas dos resíduos, podendo ainda ser considerado um processo de reciclagem energética já que a energia contida nos resíduos é liberada na queima e pode ser reaproveitada para outros processos.

Conforme Caixeta (2005), a recuperação energética dos RSU a partir da incineração inicia pela segregação dos materiais recicláveis, realizando em seguida a caracterização da composição gravimétrica e energética dos resíduos. Após essas etapas, os resíduos seguem direto para o incinerador, o qual deve ser analisado previamente à implantação em busca do melhor sistema de conversão térmica de RSU, levando em conta todos os parâmetros de operação, dentre esses a temperatura de queima, a relação ar-combustível e a umidade dos resíduos. Por último, as emissões sólidas (cinzas), gasosas (gases de exaustão) e líquidas (sistemas de limpeza dos gases de exaustão, por exemplo) geradas no processo devem ser controladas.

Quanto ao processo de queima dos RSU, conforme Morgado e Ferreira (2006) mencionam, geralmente há dois estágios de incineração: o primeiro refere-se à incineração dos resíduos em uma temperatura inicial na câmara primária de incineração, que varia tipicamente entre 500°C e 900°C, com alimentação de oxigênio sub-estequiométrica a fim de evitar gradientes elevados de temperatura e a formação de gases poluentes; já o segundo refere-se à pós-queima dos resíduos, que atingem uma temperatura de 1.200°C em uma atmosfera altamente oxidante (excesso de oxigênio), ocorrendo a conversão total dos gases na câmara secundária (monóxido de carbono é convertido em dióxido de carbono), necessitando de um combustível auxiliar, como gás

natural ou carvão, dependendo dos RSU utilizados. Na etapa de recuperação e consequente geração de energia, os gases quentes que saem do forno de incineração passam por uma caldeira de recuperação de calor, onde ocorrerá a geração de vapor que será utilizado na movimentação do conjunto turbina/gerador. Por fim, todos os gases provenientes da queima passam por um processo de lavagem e resfriamento, sendo que as cinzas resultantes da incineração no forno podem ter utilidade na construção civil ou serem levadas para aterros sanitários, podendo variar de 5% a 10% em volume dos RSU processados inicialmente.

De acordo com Lima (1994), os sistemas de incineração de resíduos sólidos urbanos podem ser classificados segundo o modo de queima e segundo o formato da câmara de combustão. Segundo o modo de queima, existem os incineradores de ar subestequiométrico ou pirolíticos, de excesso de ar ou convencionais, e de destruição química ou sem chama. Já de acordo com o formato da câmara de combustão, existem os incineradores de forno calcinador ou rotatórios, de grelha mecânica (movimento alternativo e rolante), de leito fluidizado (borbulhante e circulante) e de leito de arraste.

Os sistemas de incineração também podem ser classificados de acordo com o tipo de incineração empregada, sendo definidos em função do tratamento prévio ou não. Segundo Gripp (1998), há dois tipos de incineração: incineração de queima direta (*Mass Burn*), na qual não existe separação prévia dos resíduos anteriormente ao encaminhamento para a alimentação da câmara de combustão, e incineração com Combustível Derivado de Resíduo (CDR ou RDF – *Refused Derived Fuel*), na qual os resíduos a serem incinerados passam por uma separação prévia e o restante é transformado em resíduos com menor tamanho de partícula.

A eficiência desse processo de recuperação energética de RSU por meio da incineração irá depender da composição dos resíduos, já que essa é bastante variável e está atrelada ao nível de desenvolvimento econômico do gerador. Além disso, a eficiência do processo é fortemente dependente do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos materiais a serem incinerados, isto é, a quantidade líquida de energia que se pode obter dos resíduos (PAVAN, 2010).

Conforme os estudos da EPE, alguns dos materiais presentes nos RSU apresentam PCI acima de 6.000 kcal/kg, como pode ser visto na Tabela 1.2, equiparando-se aos valores de PCI de alguns combustíveis fósseis, enquanto que os resíduos sólidos municipais misturados, segundo os estudos da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA – *United States Environmental Protection*

Agency), apresentam PCI em torno de 2.700 kcal/kg, evidenciando que a recuperação energética dos RSU dependerá do local de geração e da composição dos resíduos (EPE, 2008; US EPA, 2014).

Tabela 1.2 – Poder calorífico inferior de alguns dos materiais encontrados nos RSU

| Material | Poder Calorífico Inferior* (kcal/kg) |
|-----------|--------------------------------------|
| Plásticos | 6.300 |
| Borracha | 6.780 |
| Couro | 3.630 |
| Têxteis | 3.480 |
| Madeira | 2.520 |
| Alimentos | 1.310 |
| Papel | 4.030 |

*Base úmida

Fonte: EPE (2008).

Do ponto de vista mundial, os incineradores de RSU vêm sendo utilizados há vários anos, existindo atualmente mais de 900 usinas de incineração em operação, chamadas de usinas WTE, sigla para o termo em inglês *Waste-to-Energy* (resíduos-energia no Brasil), com uma geração de aproximadamente 130 TWh (LUCKE, 2012). Na Europa, por exemplo, as tecnologias de incineração são utilizadas há décadas, possuindo 455 plantas WTE em 18 países no ano de 2012, segundo a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA – *International Solid Waste Association*) (ISWA, 2012). De acordo com Lima (1994), o primeiro incinerador de RSU entrou em operação na Inglaterra em 1875 e, desde então, as tecnologias de incineração foram evoluindo na busca de uma melhor eficiência na degradação dos resíduos e na minimização dos poluentes emitidos.

Já no Brasil, a recuperação de energia dos RSU é recente. Segundo Morgado e Ferreira (2006), os incineradores são usados na maior parte para tratamento de resíduos especiais ou nocivos, como resíduos aeroportuários, hospitalares, industriais e outros considerados perigosos, além da utilização em indústrias químicas. Porém, conforme Uieda (2009), a maioria dos incineradores do país consiste em equipamentos muito simples, com capacidades de processamento inferiores a 100 kg/h de resíduos, sendo muitos deles desativados devido às emissões de gases poluentes bastante elevadas, originadas de má operação e manutenção.

Entretanto, de acordo com Poletto (2011), se a incineração fizer parte do gerenciamento de RSU, o Brasil poderá gerar uma receita de R\$ 9 bilhões por ano, oriundos da conservação e aproveitamento de energia. Além disso, segundo Morgado e Ferreira (2006), a geração de energia elétrica poderia chegar a 45,44 TWh/ano,

considerando a geração diária de 160.000 toneladas de RSU e uma eficiência de 523 Wh/t. Isso demonstra que o processo de recuperação energética por meio da incineração deve ser bem planejado e projetado, a fim de obter a redução na utilização dos recursos naturais e dos custos para o país e, conseqüentemente, para a população brasileira, além de se evitar impactos ambientais referentes às emissões de poluentes.

Segundo Hauser *apud* Maranhão (2006), a utilização de 200 t/dia da fração orgânica dos RSU já permite a implantação de uma usina com capacidade de 2 MW de potência, suscetível a atender uma população de 20 mil habitantes. Já de acordo com Menezes e colaboradores (2000), a geração de energia elétrica se torna viável em instalações com capacidades de processamento acima de 250 t/dia, sendo que abaixo dessa capacidade a energia é aproveitada apenas para uso próprio da usina. Porém, segundo Borowski e Silveira (2003), o transporte e a centralização da incineração dos resíduos de todo um conjunto de municípios se torna uma alternativa para a viabilização técnica e econômica do processo, considerando-se os custos envolvidos.

Os impactos gerados pela incineração dos RSU também devem ser considerados, como a poluição atmosférica gerada pelo tratamento inadequado dos gases provenientes da incineração e a contaminação dos trabalhadores que manipulam os RSU, caso não exista um controle rígido com relação a medidas de proteção, além da geração de odores desagradáveis devido à operação inadequada dos mesmos, dependendo, dessa forma, da composição dos resíduos e das características da combustão, bem como da operação do processo de incineração.

Os principais poluentes da incineração dos RSU são materiais particulados, dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), cloreto de hidrogênio (HCl), hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH), dioxinas e furanos (PCDD/PCDF). Entretanto, as emissões da combustão, prejudiciais ao ambiente e à saúde humana, devem ser devidamente tratadas antes de serem lançadas na atmosfera por meio de tecnologias, tais como lavadores de gases, filtros de manga, precipitadores eletrostáticos e alguns tipos de catalisadores, a fim de satisfazer limites determinados por órgãos de proteção ambiental. Outros resíduos do processo, como as cinzas, as escórias e líquidos provenientes da limpeza dos gases, também devem ser retidos, tratados e destinados adequadamente em um aterro sanitário.

No Brasil, os limites máximos encontrados para a emissão de poluentes estão presentes na Resolução nº 316 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que dita sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de

tratamento térmico de resíduos (CONAMA, 2002). Os padrões de qualidade de ar, previstos no Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), também podem ser encontrados na Resolução nº 03 do CONAMA (CONAMA, 1990). Além disso, também há os limites de emissão por capacidade do sistema de incineração apresentados na Norma Técnica nº 01 da Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (FATMA), que dita sobre os sistemas de incineração de resíduos de serviço da saúde (FATMA, 1999). Já o lançamento de efluentes líquidos em corpos de água deve atender os limites de emissão e aos padrões de qualidade estabelecidos na Resolução nº 357 do CONAMA (CONAMA, 2005) e demais exigências estabelecidas por órgãos ambientais.

Segundo Poletto (2011), os gases emitidos do incinerador com temperaturas próximas a 1.000°C devem ser resfriados antes de sua liberação na atmosfera, o que geralmente é realizado por meio de trocadores de calor que permitem o aproveitamento energético, transformando o calor dos gases em energia ou vapor. Esse autor menciona ainda que para minimizar a quantidade de poluentes gerada durante o processo de incineração é necessária uma decomposição completa dos resíduos, por meio de condições adequadamente controladas de temperatura, turbulência, tempo de permanência e concentração de oxigênio, aumentando dessa forma a eficiência energética e diminuindo os impactos ambientais.

Após a regulamentação quanto aos componentes e aos limites de emissões de poluentes no projeto de uma planta de incineração, deve ser requerido um licenciamento ambiental, composto por licenças ambientais prévia, de instalação e de operação, juntamente com um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), cujas informações necessárias para obtenção dos mesmos estão presentes na Instrução Normativa nº 09 da FATMA, específica para incineradores de resíduos sólidos (FATMA, 2012).

Por fim, de acordo com Maranhão (2008), a incineração dos RSU também realiza a mitigação de impactos ambientais, se enquadrando no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), pois evita emissões de gases responsáveis pelo agravamento do efeito estufa, já que não haverá emissão de metano, gerado pela degradação dos resíduos nos aterros, ou de dióxido de carbono em excesso, decorrente da queima de combustíveis fósseis, fato que pode ser revertido em créditos de carbono, de acordo com o protocolo de Quioto, e dessa forma aumentar a viabilidade econômica do sistema.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a região da AMESC (Associação de Municípios do Extremo Sul Catarinense), a qual é localizada no extremo sul do estado de Santa Catarina e é constituída por 15 municípios, sendo eles Araranguá, Balneário Arroio do Silva, Balneário Gaivota, Ermo, Jacinto Machado, Maracajá, Meleiro, Morro Grande, Passo de Torres, Praia Grande, Santa Rosa do Sul, São João do Sul, Sombrio, Timbé do Sul e Turvo, que em conjunto representam 2.969,4 km² (AMESC, 2014).

2.2 Levantamento da situação atual dos RSU na região da AMESC

A caracterização da situação atual do gerenciamento de RSU na região da AMESC foi realizada por meio de visitas ao local de disposição final dos RSU da região e por meio de participação em reuniões e audiências públicas relacionadas ao desenvolvimento do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) da região da AMESC. Adicionalmente, foram utilizados os dados do Plano Estadual de Gestão Integrada de Resíduos (PEGIRS) do estado de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 2012), o qual contém dados sobre a geração de RSU e sua relação com a população total e urbana nos municípios do estado.

2.3 Caracterização dos RSU da região da AMESC

A caracterização dos RSU coletados na região da AMESC foi realizada a partir da análise e comparação dos dados reunidos do local de disposição final dos RSU da região com dados da literatura, presentes no estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) e no Plano Estadual de Gestão Integrada de Resíduos (PEGIRS) do estado de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 2012).

2.4 Estimativa do potencial de recuperação energética dos RSU da região da AMESC

O potencial de recuperação energética dos RSU da região da AMESC foi estimado por meio da energia total teórica, da potência total teórica, da população atendida e da economia gerada, avaliadas em três cenários, nos quais diferentes alternativas de recuperação energética foram consideradas, a fim de comparar a influência dos materiais recicláveis presentes nos RSU na geração de energia mediante a

incineração: **Cenário 1** – Incineração sem segregação prévia dos materiais recicláveis presentes no RSU; **Cenário 2** – Incineração com segregação prévia parcial de 50% dos materiais recicláveis presentes no RSU; e **Cenário 3** – Incineração com segregação prévia total de 100% dos materiais recicláveis presentes no RSU.

Para a determinação das quantidades de resíduos a serem incineradas diariamente foi considerada apenas a quantidade de RSU que é transportada até o local de disposição final dos RSU da região da AMESC. Também foram utilizados os valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) das frações de materiais comumente encontradas nos RSU, tal como apresentado em publicação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008), para a determinação dos conteúdos energéticos teóricos, proporcionais à composição gravimétrica dos RSU da região da AMESC, nos diferentes cenários considerados.

Já para a geração de energia elétrica, considerou-se que há perdas entre 60% e 80% no processo de incineração, dependendo de diversos fatores relacionados ao combustível utilizado, ao tipo de incinerador utilizado e à rotina operacional, influenciando na eficiência eletromecânica de uma planta incineradora. Em vista disso, foi utilizada nesse trabalho a eficiência eletromecânica de 35% geralmente encontrada para plantas de até 20 MW (tipo de combustor não especificado), onde o processo de cogeração para geração de energia elétrica simultaneamente à geração de calor é desconsiderado (BARJA, 2006).

Dessa forma, para a determinação da energia total teórica em kWh/dia, que pode ser obtida a partir dos RSU gerados na região da AMESC nos cenários considerados, utilizou-se a Equação 1, adaptada de Poletto (2008):

$$E_T = PCI_T \cdot K \cdot \eta_e \cdot m_{RSU} \quad (1)$$

Onde PCI_T é o somatório do conteúdo energético dos RSU em base úmida em kcal/kg, K é o fator de conversão de kcal para kWh ($K = 0,001163$), η_e é a eficiência eletromecânica da planta incineradora e m_{RSU} é a quantidade de RSU a ser incinerada diariamente em kg. Para a determinação da energia total teórica anual, a energia total teórica foi multiplicada por 365 dias, isto é, por um período equivalente a um ano.

Já para a determinação da potência total teórica em MW utilizou-se a Equação 2, onde t é o tempo em horas de utilização diária da planta incineradora, o qual foi estabelecido em 24 horas.

$$P_T = \frac{E_T}{t} \quad (2)$$

Além disso, também foi considerada a média anual de consumo residencial de energia elétrica no estado de Santa Catarina, onde a região da AMESC está situada, para a determinação da população atendida, e o preço médio de venda de energia elétrica do Leilão de Geração nº 10/2014 para a determinação da economia gerada, os quais foram de, respectivamente, 2.388,6 kWh por habitante no ano de 2012 e 197,09 R\$/MWh no ano de 2014 (EPE, 2013; ANEEL, 2014), a fim de constatar a viabilidade econômica com a energia gerada na recuperação energética dos RSU da região, considerando ainda a média de 4 habitantes por residência de acordo com o Censo de 2010 (IBGE, 2010).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Levantamento da situação atual dos RSU na região da AMESC

A região da AMESC possui municípios com características sociais, econômicas e culturais variadas, influenciando na geração de resíduos sólidos urbanos e consequentemente no seu gerenciamento.

Na Tabela 3.1 pode-se verificar a quantidade de resíduos gerada por dia em cada município, além do número de habitantes total e urbano, constatando uma geração média diária de 0,563 kg por habitante, 26% inferior à geração média diária de Santa Catarina. Observa-se também que Araranguá é o município com maior número de habitantes e, consequentemente, com maior geração de RSU da região.

Tabela 3.1 – Geração de RSU e população total e urbana dos municípios na região da AMESC

| Município | População Total ¹ | População Urbana ¹ | Quantidade de Resíduos ² (t/dia) |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| Araranguá | 61.310 | 50.526 | 49,05 |
| Balneário Arroio do Silva | 9.586 | 9.391 | 3,83 |
| Balneário Gaivota | 8.234 | 6.363 | 3,29 |
| Ermo | 2.050 | 619 | 0,82 |
| Jacinto Machado | 10.609 | 5.133 | 5,30 |
| Maracajá | 6.404 | 4.256 | 2,56 |
| Meleiro | 7.000 | 3.649 | 2,80 |
| Morro Grande | 2.890 | 756 | 1,16 |
| Passo de Torres | 6.627 | 5.873 | 2,65 |
| Praia Grande | 7.267 | 4.297 | 2,91 |
| Santa Rosa do Sul | 8.054 | 3.746 | 3,22 |
| São João do Sul | 7.002 | 1.572 | 2,80 |
| Sombrio | 26.613 | 19.638 | 13,31 |
| Timbé do Sul | 5.308 | 1.845 | 2,12 |
| Turvo | 11.854 | 7.915 | 5,93 |
| Total | 180.808 | 125.579 | 101,75 |

Fonte: ¹IBGE (2014) e ²Santa Catarina (2012).

A situação atual do gerenciamento dos RSU na região da AMESC é a individualidade municipal no transbordo, coleta e transporte dos resíduos, porém, com destino final semelhante, não possuindo gerenciamento integrado. A disposição final dos resíduos da maioria dos municípios da região da AMESC é realizada no aterro sanitário Preservale da empresa Preservale Saneamento Ambiental Ltda. (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Aterro sanitário Preservale

O aterro sanitário Preservale foi inaugurado no ano de 2011 no município de Araranguá e já possui 2 ha ocupados de um total de 18 ha, recebendo cerca de 45 toneladas de resíduos por dia atualmente, oriundos de 17 municípios catarinenses da região sul, sendo que dentre esses 13 são associados à AMESC. Dessa forma, foi constatado que apenas 44,2% do total de RSU gerados na região da AMESC estão disponíveis para serem incinerados, o que influencia na estimativa do potencial de recuperação energética.

Por fim, também foi levantado que o sistema atual de gerenciamento dos RSU presente no aterro sanitário Preservale consiste em: (a) triagem parcial dos resíduos transportados até o aterro, onde os materiais recicláveis são segregados em uma esteira por funcionários e detentos do Presídio Regional de Araranguá; (b) compostagem parcial de resíduos orgânicos variados; (c) disposição final em local adequadamente impermeabilizado, com sistema de drenagem e queima dos gases; e (d) estação de tratamento de efluentes (chorume). As etapas de triagem, compostagem, disposição final e tratamento de efluentes dos RSU no aterro sanitário Preservale podem ser vistas na Figura 3.2.

A única ação relacionada a tratamento de resíduos realizada no aterro sanitário Preservale é a de compostagem de resíduos orgânicos variados, como restos de alimentos, cascas de ovos e animais mortos. No entanto, esse tratamento encontra-se em

fase de teste. Atualmente, não há recuperação energética dos gases drenados do aterro ou dos RSU por meio de incineradores.



Figura 3.2 – Sistema atual de gerenciamento dos RSU no aterro Preservale: a) Triagem, b) Compostagem, c) Disposição dos resíduos no solo impermeabilizado e d) Tratamento dos efluentes

Por fim, também foi levantado que, em vista da ausência de um gerenciamento integrado na região, a AMESC contratou a equipe técnica da empresa Ambiental Consultoria Ambiental Ltda. para elaborar o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) para 12 dos 15 municípios associados, ficando de fora os municípios de Araranguá, Sombrio e Jacinto Machado, uma vez que esses possuem um PMGIRS finalizado ou em fase de finalização (AMESC, 2014). A partir desse plano, o gerenciamento integrado dos RSU nos municípios poderá ser implementado, além de possibilitar a proposição de alternativas de tratamento e de disposição final dos mesmos.

3.2 Caracterização dos RSU da região da AMESC

A composição gravimétrica dos resíduos do aterro sanitário Preservale é bastante diversificada e influenciada pela sazonalidade, já que alguns municípios da região da AMESC abrigam turistas na temporada de verão, como Balneário Arroio do Silva e Balneário Gaivota, e de inverno, como Praia Grande e Timbé do Sul, aumentando

também a geração de RSU e a complexidade do seu gerenciamento. Na Tabela 3.2 pode ser vista a composição gravimétrica dos RSU no aterro sanitário Preservale, a qual foi determinada em 2011 a partir de resíduos coletados nos municípios da região da AMESC, representando os RSU gerados na região em virtude do aterro sanitário ser o local de disposição final dos resíduos da maioria dos municípios associados.

Tabela 3.2 – Composição gravimétrica dos RSU no aterro sanitário Preservale

| Componente | Aterro Sanitário Preservale (%) |
|--------------------------|--|
| Matéria orgânica | 60 |
| Papel e papelão | 9,5 |
| Plásticos | 4,5 |
| Vidro | 2,7 |
| Metais | 3,3 |
| Têxteis, couro e madeira | 15 |
| Outros | 5 |

Fonte: Preservale (2014), dados referentes a 2011.

A partir da Tabela 3.2, pode-se observar que as maiores frações são as de matéria orgânica (60%), têxteis, couro e madeira (15%), papel e papelão (9,5%), e plásticos (4,5%). A quantidade de matéria orgânica encontrada nos RSU da região da AMESC é superior em comparação com as composições gravimétricas do país (8,6% maior), de Santa Catarina (23% maior) e de alguns municípios catarinenses (Tabela 1.1), demonstrando que essa característica física dos RSU varia geralmente em função do local e do nível econômico em que os mesmos são gerados. Analogamente, observa-se tal influência sobre os percentuais de papel e papelão e de plásticos no RSU da região, que são menores comparados aos percentuais encontrados na composição gravimétrica dos RSU do Brasil (3,6% e 9% menor, respectivamente), do estado de Santa Catarina (2,5% e 10,5% menor, respectivamente) e de alguns de seus outros municípios. Disso pode-se inferir, por exemplo, que o consumo de bens industrializados na região é relativamente baixo.

Dentre todas as frações consideradas, matéria orgânica, papéis, plásticos, têxteis, couro e madeira contribuem majoritariamente para o valor energético dos RSU.

3.3 Estimativa do potencial de recuperação energética dos RSU da região da AMESC

Para a realização da estimativa do potencial de recuperação energética dos RSU na região da AMESC, os conteúdos energéticos teóricos das frações e do total de RSU do aterro sanitário Preservale foram determinados e reunidos na Tabela 3.3,

considerando os valores de PCI de alguns materiais presentes nos RSU (Tabela 1.3) e as frações dos materiais encontrados no aterro sanitário Preservale (Tabela 3.2).

Tabela 3.3 – Conteúdo energético teórico das frações e do total de RSU do aterro sanitário Preservale

| Componentes | Conteúdo energético dos RSU no aterro sanitário Preservale (kcal/kg) |
|---|--|
| Matéria orgânica | 786 |
| Papéis | 382,9 |
| Plásticos | 283,5 |
| Têxteis, couro e madeira | 1.444,5 |
| Conteúdo energético total (kcal/kg de RSU, b.u.) | 2.896,9 |

Como já mencionado, três cenários com diferentes alternativas de recuperação energética dos RSU da região da AMESC foram considerados, com o intuito de comparar a influência dos materiais recicláveis presentes nos RSU na geração de energia por meio da incineração. Os conteúdos energéticos do **Cenário 1**, do **Cenário 2** e do **Cenário 3** estão demonstrados na Tabela 3.4 e comparados na Figura 3.2, cujos valores foram determinados levando-se em conta a composição de resíduos em cada cenário. Dessa forma, pode-se constatar que os materiais recicláveis influenciam no conteúdo energético total, já que no **Cenário 2** e no **Cenário 3** há uma diminuição do mesmo em comparação ao **Cenário 1**. Porém, essa diminuição não é tão drástica devido ao baixo percentual de materiais recicláveis encontrado nos RSU do aterro sanitário Preservale.

Tabela 3.4 – Conteúdo energético das frações de materiais presentes no RSU do aterro sanitário Preservale em diferentes cenários de recuperação energética na região da AMESC

| Componente | Conteúdo energético dos RSU no aterro sanitário Preservale (kcal/kg) | | |
|--|--|-------------------------------|--------------------------------|
| | Cenário 1 (sem segregação) | Cenário 2 (50% de segregação) | Cenário 3 (100% de segregação) |
| Matéria orgânica | 786 | 786 | 786 |
| Papéis | 382,9 | 191,4 | 0 |
| Plásticos | 283,5 | 141,8 | 0 |
| Têxteis, couro e madeira | 1.444,5 | 1.444,5 | 1.444,5 |
| Conteúdo energético total (kcal/kg de RSU*) | 2.896,9 | 2.563,7 | 2.230,5 |

*Base úmida

Portanto, considerando os cenários definidos anteriormente e os dados apresentados nos procedimentos metodológicos, a energia total teórica anual que pode ser recuperada a partir da incineração dos RSU gerados na região da AMESC, bem como a potência total teórica, puderam ser determinadas por meio da Eq. 1 e da Eq. 2, cujos resultados foram reunidos na Tabela 3.5 juntamente com os resultados da população atendida e da economia de energia com a possível venda da energia elétrica

gerada na recuperação energética dos RSU da região da AMESC, não sendo consideradas demandas econômicas nos cálculos, como juros, inflação e depreciação.

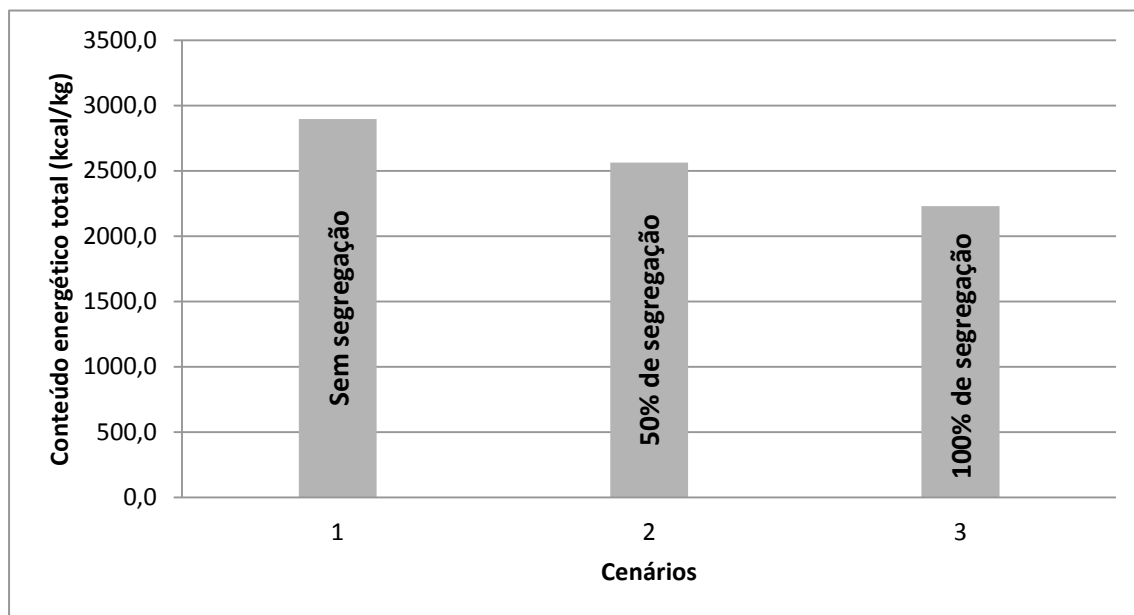


Figura 3.2 – Comparação do conteúdo energético total nos três cenários considerados na recuperação energética dos RSU na região da AMESC

Tabela 3.5 – Potência total teórica, energia total teórica anual, população atendida e economia de energia no processo de incineração dos RSU da região da AMESC nos três cenários considerados

| Cenários | Potência total teórica (MW) | Energia total teórica anual (GWh/ano) | População atendida (habitantes) | Economia de energia (R\$/ano) |
|----------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2,2 | 19,37 | 32.433 | 3.817.189,6 |
| 2 | 1,9 | 17,14 | 28.703 | 3.378.196,7 |
| 3 | 1,7 | 14,91 | 24.973 | 2.939.137,8 |

A partir dos cálculos realizados pode-se constatar maiores valores de potência total teórica, energia total teórica anual, população atendida e economia de energia para o **Cenário 1**, com uma máxima potência total teórica superior em 0,2 MW à potência de 2 MW indicada para a planta de incineração de RSU se tornar técnica e economicamente viável. Entretanto, no **Cenário 2** e no **Cenário 3** a potência total teórica não alcançou esse limite, sendo 0,1 MW e 0,3 MW inferior à potência indicada, respectivamente. Além disso, também se pode constatar que a população atendida com a energia total teórica que pode ser gerada ao longo do ano consiste em 17,9% do total de habitantes da região da AMESC no **Cenário 1**, 15,9% no **Cenário 2** e 13,8% no **Cenário 3**. Por fim, a economia de energia gerada equivale a 5.272 salários mínimos no **Cenário 1**, 4.666 no **Cenário 2** e 4.059 no **Cenário 3**, baseado no valor de R\$ 724,00 válido no ano de 2014 (MTE, 2014).

Após a incineração dos RSU na planta incineradora, em todos os cenários considerados, haverá a emissão de poluentes sólidos, líquidos e gasosos, que devem ser controlados e tratados, para que a viabilidade técnica e ambiental possa ser alcançada. Dessa forma, os RSU são transformados em cinzas, escórias e lodo (tratamento do chorume), sendo reduzidos a 5% do total processado na incineração, os quais, juntamente com a fração inaproveitável resultante da reciclagem, que apresentam outros 5%, devem ser depositados adequadamente no aterro sanitário, levando à redução de até 90% dos RSU iniciais.

Uma possibilidade para a implantação da planta de recuperação energética por meio da incineração dos RSU na região da AMESC seria o próprio aterro sanitário Preservale, apresentando-se como uma boa alternativa devido ao transporte e disposição final dos resíduos coletados nos municípios da região já ocorrerem nesse local, otimizando a logística do envio dos RSU para esse fim, além do aterro possuir espaço e potencial equipe de trabalho.

Já um modelo de planta de incineração que poderia ser seguido é o da Usina de Recuperação de Energia de Barueri (URE Barueri), cujo projeto visa o tratamento dos resíduos sólidos urbanos de três municípios do estado de São Paulo que elaboraram um consórcio para a geração de energia e totalizam mais de 739 mil habitantes (FOXX, 2014). A mesma está em fase de implantação, a qual terá 2 anos de duração e envolvimento de 276 pessoas, conforme o Estudo de Impacto Ambiental da URE Barueri. Após a finalização das obras, a URE Barueri operará 24 horas por dia a partir da incineração de 825 t/dia de RSU, os quais passarão por uma grelha a 850 °C desenvolvida exclusivamente para tratar RSU brasileiro (alto teor de umidade e grande heterogeneidade), tendo uma potência nominal de 17 MW para a geração de energia elétrica, sendo 13% utilizada na própria usina e 87% exportada para o SIN, por meio de uma linha de transmissão de 88/138 kV.

Portanto, como pode ser observado, a elaboração de um projeto para implantação de uma usina de incineração de RSU demanda o estabelecimento de ações efetivas e otimizadas relacionadas ao gerenciamento de RSU da região, as quais possam servir de base para estudos adicionais a fim de se definir layout e equipamentos de processo, custos de implantação e demais variáveis, necessitando-se ainda, posteriormente, de licenciamento ambiental para instalação e operação da usina de incineração, a fim de se alcançar todos os benefícios possíveis em termos técnicos, econômicos e ambientais.

4 CONCLUSÃO

A partir das informações obtidas com o presente trabalho, foi constatado que a região da AMESC possui um gerenciamento de RSU individualizado para cada município, com ausência de planos de gestão integrada, sendo que até a data da finalização desse trabalho o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) da região da AMESC não havia sido divulgado. Também foi constatado que o local de triagem, tratamento e disposição final dos RSU da região é o aterro sanitário Preservale da empresa Preservale Saneamento Ambiental Ltda., no qual pretendem ampliar o tratamento da fração orgânica dos RSU por compostagem. Quanto ao tratamento térmico dos RSU, ainda há ausência da quantificação do biogás gerado ou do seu aproveitamento energético, bem como do processo de incineração dos resíduos para recuperação energética no aterro sanitário.

Por meio dos cálculos realizados para estimar o potencial de recuperação energética, isto é, da potência total teórica, energia total teórica anual, população atendida e economia de energia, e a seguinte comparação com os resultados apresentados no trabalho de Klaus (2014) sobre o Potencial de Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos na Mesorregião Oeste do Paraná para Geração de Energia Elétrica, pode-se concluir que o potencial energético para geração de energia elétrica a partir do processo de incineração dos RSU da região da AMESC é tecnicamente viável no **Cenário 1**, porém é pequeno em todos os cenários considerados, já que a potência total teórica e a energia total teórica anual do processo de incineração com baixa taxa de produção de energia elétrica a partir dos RSU da Mesorregião Oeste do Paraná são, respectivamente, 72,7% e 70% maiores que o melhor cenário considerado no presente trabalho (**Cenário 1**).

Também se pode notar a influência da segregação parcial ou total dos materiais recicláveis na geração de energia elétrica nos dois últimos cenários considerados, comprovando que a segregação dos materiais recicláveis presentes nos RSU influencia no volume de resíduos e no conteúdo energético total disponível para o processo de incineração. Entretanto, atualmente, a opção mais viável de tratamento dos RSU na região da AMESC e que ainda está de acordo com a ordem de prioridade prevista na Política Nacional dos Resíduos Sólidos, é a reciclagem dos materiais recicláveis aliada à incineração dos RSU, já que a diferença dos resultados obtidos nos cenários considerados no trabalho foi pequena, além de alguns dos benefícios da reciclagem se

equivalerem ao do tratamento térmico, como o aumento da vida útil do aterro sanitário devido à diminuição de volume dos resíduos, a geração de empregos e a economia de energia elétrica.

Por fim, o pequeno potencial de recuperação energética pode ter ocorrido devido à baixa geração de RSU na região da AMESC, particularidade que está aliada ao porte dos municípios dessa região e às suas características socioeconômicas, já que a mesma comporta em sua maioria municípios de pequeno porte e com baixa densidade populacional. Outros fatores também podem ter contribuído para o pequeno potencial de recuperação energética, como as considerações apresentadas para a elaboração dos cálculos, principalmente a reduzida fração de resíduos que é transportada até o aterro sanitário Preservale, diminuindo a quantidade de energia que pode ser obtida com a incineração dos RSU.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O potencial de recuperação energética por meio da incineração dos RSU da região da AMESC poderia ser ampliado com a utilização de resíduos agroindustriais gerados na região, como por exemplo de arroz, e de outros combustíveis auxiliares no processo de incineração, como gás natural e carvão mineral disponíveis na região, ou ainda com o aumento constante da geração de RSU devido ao crescimento populacional e o consórcio com outras regiões próximas, como a região da AMREC (Associação dos Municípios da Região Carbonífera), podendo dessa forma ampliar a viabilidade técnica e econômica do processo de incineração de RSU na região.

Além disso, o presente estudo poderia ser prosseguido por meio da utilização dos dados que estarão presentes no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) da região da AMESC ou ainda por meio da realização da caracterização físico-química dos RSU gerados em cada município da região, efetivando uma composição gravimétrica própria dos mesmos, com amostras frequentes, e uma determinação do conteúdo energético, a fim de constatar a influência dos períodos sazonais no conteúdo energético e, conseqüentemente, na geração de energia elétrica por meio da incineração dos RSU, definindo dessa forma o potencial real de recuperação energética dos RSU gerados nos municípios da região da AMESC.

Todavia, apresentando pequeno ou grande potencial de recuperação energética, a implantação do processo de recuperação energética dos RSU na região da AMESC continuaria proporcionando os benefícios apresentados nesse trabalho, como a

diminuição significativa no volume dos RSU, o aumento da vida útil do aterro sanitário Preservale, o tratamento de resíduos perigosos e a geração de energia.

Portanto, dentro do quadro atual de crescimento populacional e consequente aumento da geração de RSU e da demanda por energia elétrica, o processo de recuperação energética por meio da incineração de RSU torna-se atrativo, transformando em realidade o desenvolvimento sustentável nos municípios brasileiros.

POTENTIAL ENERGY RECOVERY OF MUNICIPAL SOLID WASTE IN AMESC REGION

ABSTRACT

The growth in the generation of municipal solid waste (MSW), driven by the rising of the population density and allied to the high electricity demand, is generating negative impacts to the environment, society and economy of Brazilian cities. Faced with this problem, alternatives for appropriate waste management have been developed in conjunction with energy generation, in which the combustion process is an alternative that reduces the volume of waste and allows for energy recovery. In Santa Catarina State, the cities in the AMESC region (Association of Municipalities of the Extreme South of Santa Catarina) are witnessing the same challenge, making attractive the alternative of energy recovery from MSW generated in this region. Thus, the potential for energy recovery from MSW of AMESC region was estimated based on data obtained from the composition of waste, using equations that describe the theoretical total power, theoretical total energy, population served and the energy savings in three scenarios, considering in two of those the separation of 50% and 100% of recyclable material previous to incineration. The results for energy recovery potential were 2.2 MW, 1.9 MW and 1.7 MW of theoretical total power; 19.37 GWh/year, 17.14 GWh/year and 14.91 GWh/year of theoretical total energy; 17.9%, 15.9% and 13.8% of the population served; and 5,272, 4,666 and 4,059 minimum wages equivalent of energy saving in the three scenarios considered. Therefore, it has been concluded that the potential energy recovery is small for all the scenarios when compared with the literature results. However, the benefits generated in this process can still be achieved even with small potential presented, making sustainable development a reality in Brazilian cities.

Keywords: Municipal Solid Waste. Energy Recovery. AMESC.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**. Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2013**. São Paulo: Grappa, 2013.

AMESC - Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense. **Municípios da associação**. Disponível em: <<http://www.amesc.com.br/municipios/index.php#>>. Acesso em: 12 set. 2014.

_____. **Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos – PMGIRS**. Disponível em: <<http://www.pmgirs-amesc.com.br>>. Acesso em: 18 set. 2014

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Leilão A-1 registra R\$ 197,09 por MWh para preço médio de venda de energia**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8287&id_area=90>. Acesso em: 11 dez. 2014.

BARJA, G. J. **A Cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 157 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão – Relatório final**. Brasília: FADE, 2013.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos; alteração da Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010.

BOROWSKI, H. C.; SILVEIRA, J. L. Análise termoeconômica de um sistema de geração de energia por queima de resíduos sólidos urbanos. In: V Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission, 2003, São Pedro. **Proceedings of the 5th Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission**. Guaratingetá: UNESP, 2003, v. 1, p. 27-35.

CAIXETA, D. M. **Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: o caso de Campo Grande/MS**. 86 p. Monografia (Especialização em Resíduos Sólidos) – Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina. **Resultados 1T14**. Florianópolis: IGC/ITAG, 2014.

COMCAP - Companhia de Melhoramentos da Capital. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis**. Florianópolis: COMCAP/UFSC/CEFET, 2002.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 03, de 22 de agosto de 1990. Padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**, seção 1, p.15937-15939, Brasília, DF, 1990.

_____. Resolução nº 316, de 20 de novembro de 2002. Procedimentos e Critérios para o Funcionamento de Sistemas de Tratamento Térmico de Resíduos. **Diário Oficial da União**, seção 1, p.92-95, Brasília, DF, 2002.

_____. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação de corpos de água e estabelecimento das condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 58-63, Brasília, DF, 2005.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2007.

_____. **Série recursos energéticos: avaliação preliminar do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande**. Rio de Janeiro: EPE, 2008.

_____. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

_____. **Balanco energético nacional 2014: ano base 2013**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FATMA - Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina. **Norma técnica nº 01: Sistema de incineração de resíduos de serviço de saúde - procedimentos para licenciamento ambiental**. Florianópolis: FATMA, 1999.

_____. **Instrução normativa nº 09: Incineradores – Informações para obtenção de licenças ambientais**. Florianópolis: FATMA, 2012.

FOXX. **Usina de Recuperação de Energia de Barueri**. Disponível em: <<http://www.urebarueri.com.br/>>. Acesso em: 19 nov. 2014.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

GRIPP, W. G. **Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo**. 208 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

GUADAGNIN, M. R. et al. Estudo da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos em municípios do sul catarinense. In: IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 2014, Porto Alegre. **Anais...** Criciúma: UNESC, 2014.

HAUSER, P. D. **Criação de valor e desenvolvimento sustentável: uma avaliação da incineração de resíduos sólidos municipais em projetos enquadráveis no mecanismo de desenvolvimento limpo do Protocolo de Quioto**. 155 p. Dissertação (Mestrado em Administração) – Instituto COPPEAD de Pós-Graduação em Administração, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico do Brasil de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

_____. **Cidades@**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 11 set. 2014.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. Brasília: IPEA/MMA, 2012.

ISWA - International Solid Waste Association. **Waste-to-energy: State-of-the-art report statistics 6th edition**. Denmark: Ramboll, 2012.

KLAUS, O. L. **Potencial de aproveitamento de resíduos sólidos urbanos da Mesorregião Oeste do Paraná para geração de energia elétrica**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

LIMA, A. X. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de uma usina de incineração de resíduos sólidos urbanos no ABCD**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia (IEE/EP/IF/FEA), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

LUCKE, S. A. **O resíduo sólido urbano como fonte renovável para geração de energia elétrica: aspectos econômicos e sócio-ambientais**. 437 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MARANHO, A. S. **Potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos para Bauru e região**. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

MEDEIROS, J. H. D. **Gestão dos resíduos sólidos para municípios de pequeno e médio porte à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 65 p. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Curso de Ciência e Tecnologia, Campus Angicos, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2012.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio atual da incineração no Brasil. In: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABLP - Associação Brasileira de Limpeza Pública, 2000.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego. **Valor atual do salário mínimo**. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/sal_min/>. Acesso em: 24 nov. 2014.

MORGADO, T. C.; FERREIRA, O. M. **Incineração de resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na co-geração de energia: estudo para a região metropolitana de Goiânia**. Departamento de Engenharia, Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2006.

OLIVEIRA, S. **Gestão dos resíduos sólidos urbanos na microrregião homogênea Serra de Botucatu: caracterização física dos resíduos sólidos domésticos na cidade de Botucatu/SP**. 127 p. Dissertação (Mestrado em Concentração em Energia na

Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Campus Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. 186 p. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, EP/FEA/IEE/IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

POLETTO, J. A. F. **Viabilidade energética e econômica da incineração de resíduo sólido urbano considerando a segregação para reciclagem**. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

_____. Gestão do resíduo sólido urbano – Incineração: uma alternativa. **RETEC**, v. 4, n. 1, p. 142-162, 2011.

PRESERVALE. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário Preservale**. Araranguá: PRESERVALE, 2014.

SANTA CATARINA (Estado). **Plano estadual de gestão integrada de resíduos - PEGIRS**. Florianópolis: DRZ Geotecnologia e Consultoria, 2012.

SANTOS, G. G. D. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso de incineração e da disposição em aterros**. 193 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SOARES, E. L. S. F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

UIEDA, F. A. **Projeto básico de central termelétrica com incineração de resíduos sólidos urbanos**. 93 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

US EPA – United States Environmental Protection Agency. **Decision makers' guide to solid waste management**. Washington DC: EPA, 2007. Disponível em: <<http://www.epa.gov/garbage/dmg2.htm>> Acesso em: 13 set. 2014.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que a conclusão desse trabalho se tornasse possível, em especial à professora e orientadora Elaine Virmond e ao Andrey Eduardo Marques Castro, responsável técnico do aterro sanitário Preservale.