

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**MAIARA LUIZA NOVELLO GLUZEZAK**

**OPORTUNIDADES E DESAFIOS NA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA  
DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – O CASO DE  
ARARANGUÁ/SC**

Araranguá, SC

2019


MAIARA LUIZA NOVELLO GLUZEZAK

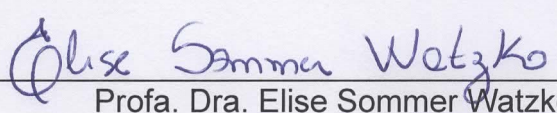
**OPORTUNIDADES E DESAFIOS NA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA  
DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS –  
O CASO DE ARARANGUÁ/SC**

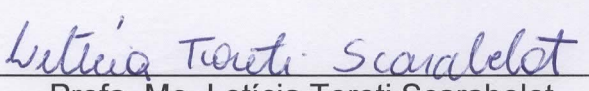
Trabalho de Conclusão de Curso,  
apresentado à Universidade Federal de  
Santa Catarina, como parte das  
exigências para a obtenção do título de  
Engenheiro(a) de Energia.

Araranguá, 06 de dezembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Elaine Virmond (Orientadora)  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Elise Sommer Watzko  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Me. Leticia Toret Scarabelot  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **OPORTUNIDADES E DESAFIOS NA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – O CASO DE ARARANGUÁ/SC**

Maiara Luiza Novello Gluzezak<sup>1</sup>

### **RESUMO**

A falta de gerenciamento adequado em relação aos resíduos sólidos urbanos (RSU), apesar da crescente conscientização populacional sobre a importância de uma destinação correta de RSU, ainda é um assunto importante a ser tratado pela sociedade, principalmente por estar relacionado à qualidade do saneamento de uma cidade. A recuperação energética de RSU é uma oportunidade ainda pouco aplicada para uma melhor destinação final, sendo uma saída ambiental, econômica e socialmente viável. A partir do cenário atual, o presente trabalho teve como objetivo analisar o potencial energético dos RSU no município de Araranguá/SC a fim de avaliar seu uso como fonte de energia elétrica na geração distribuída em quatro cenários: RSU bruto e RSU segregado do município de Araranguá/SC (Cenários 1 e 2, respectivamente), e RSU bruto e RSU segregado considerando a média brasileira (Cenários 3 e 4, respectivamente). Para isso, foram avaliados os montantes de RSU coletados durante maio/2018 a abril/2019 em Araranguá/SC e com base em cálculos que descrevem a transformação do potencial químico para o potencial elétrico e térmico, obteve-se para o Cenário 1 conteúdo energético do biogás de 1,14 MW; para o Cenário, 2 1,39 MW; para os Cenários 3 e 4 obtiveram-se 1,99 MW e 2,43 MW, respectivamente. Também se obteve o potencial elétrico de geração desses cenários: 16.442,13 kWh/dia, 21.780,48 kWh/dia, 28.670,30 kWh/dia e 39.798,84 kWh/dia, respectivamente. Após análise dos resultados, pode-se concluir que a recuperação energética de RSU pelo processo de biodigestão possui vários benefícios potenciais, sendo uma oportunidade para melhorar o gerenciamento de resíduos orgânicos em Araranguá/SC.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos, Recuperação Energética, Geração Distribuída.

---

<sup>1</sup> Graduanda do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde – CTS, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3210, Jardim das Avenidas, Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88906-072. E-mail: novellomaiara@gmail.com.

**OPPORTUNITIES AND CHALLENGE IN THE ENERGY RECOVERY  
FROM THE ORGANIC FRACTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE -  
THE CASE OF ARARANGUÁ/SC**

Maiara Luiza Novello Gluzezak<sup>2</sup>

**ABSTRACT**

The lack of proper management regarding municipal solid waste (MSW), despite of increasing awareness of the population about the importance of proper destination of MSW, is still an important issue to be addressed by the society, mainly because it is related to the quality of the sanitation of a city. The energy recovery of MSW is an opportunity still almost little applied for a better final destination, being a feasible option both environmentally, economically and socially. From the current scenario, the present work aims to analyse the energy potential of MSW in the city of Araranguá/SC in order to analyse its use as a source of electricity in distributed generation in four scenarios: raw and segregated MSW from the city of Araranguá/SC (Scenarios 1 and 2, respectively), raw and segregated MSW considering the Brazilian average SC (Scenarios 3 and 4, respectively). For this, it was evaluated the amount of MSW collected from May/2018 to April/2019 and based on the calculations that describe the transformations of chemical potential to electrical and thermal potential, it was obtained for Scenario 1 an energy content of 1.14 MW for the biogas; for Scenario 2, 1.39 MW; for Scenarios 3 and 4, 1.99 MW and 2.43 MW, respectively. The electricity potential for these scenarios was also obtained: 16,442.13 kWh/day, 21,780.48 kWh/day, 28,670.30 kWh/day and 39,798.84 kWh/day respectively. Thus, it could be concluded that the energy recovery from MSW through the biodigestion process has several potential benefits, being an opportunity to improve the organic waste management in Araranguá/SC.

Key words: Municipal Solid Waste, Energy Recovery, Distributed Generation.

---

<sup>2</sup> Undergraduate student of the Energy Engineering Course at Federal University of Santa Catarina, Center for Science, Technology and Health - CTH, Araranguá Campus, 3210, Governador Jorge Lacerda Highway, Jardim das avenidas, Araranguá, Santa Catarina, Brazil, CEP 88906-072. Email: novellomaiara@gmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar da crescente conscientização populacional em relação à importância da destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ainda não se conhece seus verdadeiros potenciais de aproveitamento pela falta de políticas públicas, além de investimentos em iniciativas públicas, privadas ou conjuntas, de estudos, e dentre outros.

Os resíduos sólidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), são definidos como resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos. Segundo a mesma fonte, os resíduos são classificados como resíduos perigosos, não inertes e inertes, precisando assim de um gerenciamento adequado e diferenciado para que não sejam dispostos de maneira equivocada, provocando efeitos negativos no meio ambiente e na população.

Desde 1988, com a promulgação da Constituição Federal, definiu-se que o município era responsável pelos serviços de limpeza urbana e toda a gestão e manejo dos RSU, desde a coleta até a sua destinação final. Em 02 de agosto de 2010, a Lei 12.305 (BRASIL, 2010) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) representando um grande passo para a melhoria da gestão dos resíduos sólidos no Brasil. Entre outros princípios e instrumentos introduzidos pela PNRS destacam-se a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa.

A responsabilidade compartilhada é o conjunto de atribuições para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados. Já a logística reversa é caracterizada por um conjunto de ações destinadas a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Na campanha mundial da Organização das Nações Unidas, denominada “17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)”, mais conhecida como “Objetivos do Milênio”, percebe-se o desinteresse geral de governantes em relação a vários objetivos, como por exemplo, o saneamento e tratamento de água, consumo sustentável, além de preservação do ecossistema terrestre, lembrando que o gerenciamento dos RSU está ligado diretamente ao saneamento básico de um município e à qualidade da água dos mesmos, além de que o atual método de destinação final incorre em risco considerável para a qualidade do solo e dos aquíferos se não for gerido de forma correta (ONU, 2019).

A gestão dos RSU não tem recebido a atenção necessária por grande parte das administrações municipais do país. A maioria dos municípios brasileiros ainda não possui mecanismos de gerenciamento dos RSU, sendo que cerca de 18% dos municípios dispõe seus resíduos em lixões, 23% em aterros controlados e um pouco mais da metade, 60%, utilizam aterros sanitários (FIGUEIREDO, 2012; ABRELPE, 2015).

Em abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, ficou definido que o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada. Essa ação ficou conhecida como micro e minigeração distribuídas de energia elétrica, que além de possuir estímulos inovadores, aliam economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade (ANEEL, 2018).

O município de Araranguá também precisou se adequar às condições previstas por lei em relação aos RSU. Para isso, o município instituiu a Política Ambiental Municipal e também possui o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos (PGIRS). Ambos os documentos preveem ações que tenham por metas a redução, a reutilização e reciclagem, a coleta e transporte, o tratamento e a disposição final dos resíduos (ARARANGUÁ, 2012).

### **1.1 Sistemas de coleta e disposição de RSU**

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), anualmente, 1,3 bilhão de toneladas de alimentos são desperdiçadas ou se perdem ao longo das cadeias produtivas, representando 30% de todo o alimento produzido por ano no planeta. As pesquisas indicam que o desperdício responde por 46% da quantidade, e que as perdas, que ocorrem na sua maioria na fase de produção, armazenamento e transporte correspondem a 54% do total (BRASIL, 2017). Quanto mais tarde na cadeia de fornecimento um produto é desperdiçado, maiores são os seus impactos ambientais, uma vez que todo o processamento de emissões e transporte estão inclusos no impacto geral do material (SCHERHAUFER *et al.*, 2018).

De acordo com os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2017, a geração de RSU totalizou 78,4 milhões de toneladas, com índice de cobertura de coleta de 91,2% para o país, o que evidencia que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e,

consequentemente, tiveram destino impróprio. A pesquisa ainda revelou que o sul do país é responsável por 11% na geração de RSU do país, e desses apenas 28% são dispostos em aterros sanitários (ABRELPE, 2017).

No Estado de Santa Catarina, existem basicamente dois tipos de coleta, a convencional e a seletiva. A coleta convencional representa aproximadamente 94% de cobertura sobre a população do estado, já a coleta seletiva abrange cerca de 60% da população total do Estado (SANTA CATARINA, 2018). Para a execução dos serviços de coleta, diversos tipos de veículos são utilizados em Santa Catarina, com destaque para o caminhão do tipo compactador, usado por 74,58% dos municípios do estado. Do restante dos municípios catarinenses (15,59%) não se tem informação quanto ao prestador de serviço.

Conforme levantamento realizado pelo estado de Santa Catarina, em 2016, existiam 34 aterros sanitários que recebiam resíduos sólidos de 295 municípios do estado (SANTA CATARINA, 2018). O Aterro Sanitário de Içara, que é o destino dos RSU gerados em Araranguá, recebe resíduos de 20 cidades do sul do estado, e possui uma capacidade de 2.500 t/dia com 20 anos de estimativa de vida, sendo desconhecido o ano limite de operação.

Os aterros sanitários, apesar de constituírem a principal solução sanitária aplicada atualmente no Brasil, geram impactos negativos a curto, médio e longo prazos, como emissões difusas de gases de efeito estufa (GEE), produção de chorume (lixiviado, que percola através dos resíduos depositados e que efluem de um aterro ou neles são contidos), desvalorização de zonas urbanas, contínua demanda por novas áreas, entre outros fatores, que resultam em significativos impactos econômicos para os municípios (ABRELPE, 2012).

De acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 1998), são quatro as principais formas de relação entre os RSU e o efeito estufa: emissão de CO<sub>2</sub> decorrente do consumo de energia para extração e produção dos bens de consumo, emissão de CO<sub>2</sub> oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção dos bens, emissão de metano dos aterros sanitários e a fixação de carbono das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018), uma quinta relação seria a emissão de CO<sub>2</sub> devida ao transporte dos resíduos, desde a coleta até a destinação final.

A coleta e o transporte são ações sanitárias inclusas no gerenciamento, visando

o afastamento deles do local onde são gerados. A etapa seguinte consiste tradicionalmente na destinação dos resíduos, a qual pode incluir tratamentos prévios como a reciclagem, a compostagem da matéria orgânica para sua utilização como adubo e a recuperação energética por meio de processos de produção de biogás ou de incineração dos RSU (ROSSI, 2014).

## 1.2 Potencial dos RSU na geração distribuída

A Política Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) determinam que o tratamento do resíduo deve ser adequado e, havendo viabilidade técnica, econômica e ambiental em seu aproveitamento, o tratamento deve ser realizado. Como o principal componente dos resíduos é a fração orgânica (biomassa), o aproveitamento dessa fração por meio de processos de conversão possibilita a produção de bioenergia (EPE, 2018).

O aproveitamento energético dos RSU tem potencial para ampliar a segurança do sistema elétrico nacional, na medida em que pode ofertar bioeletricidade de maneira distribuída em virtude de os RSU estarem disponíveis próximos aos centros consumidores. A redução da quantidade de RSU a ser depositada em aterros sanitários amplia sua vida útil e soluciona um dos grandes problemas da atualidade, a escassez de áreas para novos depósitos de RSU (SOARES, 2011).

Segundo a ANEEL, pode-se caracterizar geração distribuída como aquela que está localizada próxima aos centros de carga, conectada ao sistema de distribuição ou na própria unidade consumidora (ANEEL, 2012). Conforme regulamentação da ANEEL, atualizada em novembro de 2015, é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além de cogeração qualificada, denominando-se de microgeração distribuída a unidade geradora que possui potência instalada de até 75 kW e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW conectadas na rede de distribuição (ANEEL, 2015; ANEEL, 2018). Além de ser ambientalmente correta, essa nova regulamentação traz um sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2014). A Figura 1 ilustra como a energia gerada pode atender à unidade geradora e também ser injetada na rede de distribuição, conhecido como sistema *net metering*.



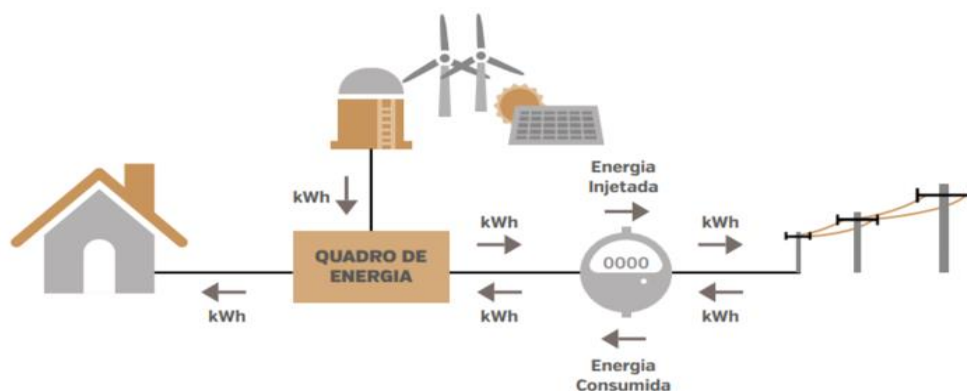


Figura 1: Funcionamento do sistema de compensação de energia elétrica. Fonte: Brasil (2017).

Segundo Henriques (2004), no Brasil o aproveitamento do biogás de aterro é o uso energético mais usual dos RSU. No entanto, as oportunidades de recuperação energética de resíduos a serem priorizadas se concentram no nível quatro da hierarquia dos resíduos (recuperação) ilustrada na Figura 2, podendo-se aplicar processos termoquímicos, processos bioquímicos, ou ainda combinações desses juntamente com processos físico-químicos visando adequar a qualidade dos resíduos previamente ao processamento pretendido ou visando adequar a qualidade dos produtos (como o biogás) para dada aplicação energética (TCHOUBANOGLIOUS, 1993). A escolha dos processos e das tecnologias a serem empregadas deve considerar a caracterização das fontes geradoras e das práticas empregadas nas etapas de coleta (segregada ou não), a caracterização dos resíduos, dentre outros fatores.

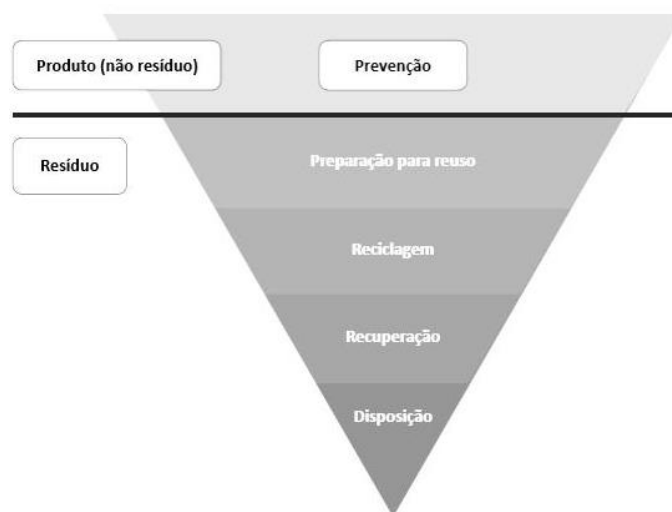


Figura 2: Hierarquia de gerenciamento de resíduos. Fonte: adaptado de EC (2016).

A implantação de um sistema de biodigestão implica em condições fundamentais para sua efetividade, como uma coleta regular, um sistema de triagem para separação dos recicláveis e dos materiais impróprios, a necessidade de disposição adequada do material que não se enquadra como orgânico nem como reciclável, direcionada a aterros ou tratamentos térmicos e por fim, uma unidade de pós-tratamento (BRASIL, 2015).

### **1.3 Recuperação energética da fração orgânica de RSU por meio da biodigestão**

O processo de biodigestão é um processo metabólico complexo que requer condições anaeróbias e depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos para transformar material orgânico em dióxido de carbono e metano. O processo pode ser dividido em quatro fases, sendo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos, em simbiose, e podem requerer diferentes condições ambientais (KUNZ *et al.*, 2019).

A etapa da hidrólise degrada compostos de maior massa molecular em substâncias orgânicas mais simples e solúveis. Esse processo ocorre pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas. A importância dessa etapa na velocidade de degradação é dependente da característica do substrato envolvido, podendo ser considerada como etapa limitante da velocidade da digestão anaeróbia. Na acidogênese, os carboidratos, como glicose, são degradados em piruvato, que é convertido em etanol pela ação de leveduras. Os ácidos graxos são degradados resultando na formação de acetato, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio. A terceira etapa é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas. Nessa etapa os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono, com a produção de hidrogênio e dióxido de carbono. A etapa final, metanogênese, ocorre em condições estritamente anaeróbias. Desse modo, o carbono contido na biomassa é convertido a dióxido de carbono e metano pela ação das arqueas metanogênicas (KUNZ *et al.*, 2019).

Os resíduos urbanos de interesse para a digestão anaeróbia podem ser classificados, quanto à sua origem, em três grupos principais:

- Resíduos sólidos urbanos não segregados na fonte (RSU bruto);

- Fração orgânica dos resíduos domiciliares, quando segregados na fonte e coletados separadamente (RSU segregado);
- Resíduos orgânicos de grandes geradores privados coletados separadamente (ROP).

O processo de biodigestão ocorre em um biodigestor, um reator que fornece condições adequadas para o desenvolvimento das etapas previamente descritas (KUNZ et al., 2019). Segundo Mello (2017), existem diversas variações e modelos de biodigestores, devendo-se considerar os aspectos operacionais da aplicação específica, fazendo com que o sistema atenda ao conjunto de condições e necessidades.

A composição e as características físico-químicas do resíduo orgânico a ser tratado por via anaeróbia variam, principalmente, em função de sua origem, seja esse misturado (RSU bruto), seja segregado na fonte (RSU segregado). As tabelas a seguir evidenciam dados encontrados na literatura sobre a composição gravimétrica dos RSU nacional e no município de Araranguá/SC.

Tabela 1: Composição gravimétrica média brasileira de resíduos sólidos urbanos.

Ano	Produção de RSU (1.000 t)	Produção diária per capita (kg/hab.dia)	(%)				
			Fração Orgânica	Papéis	Plásticos	Vidros	Metais
2013	73.300	0,99	56	20	13	3,3	2,2
2014	74.579	1	56	20	13	3,4	2,2
2015	75.855	1,01	55	20	14	3,4	2,3
2020	82.188	1,06	52	22	15	3,7	2,4
2025	88.380	1,11	49	24	16	3,9	2,6

Fonte: EPE (2018), adaptado pela autora.

No caso do RSU bruto, outros fatores também interferem em sua composição, refletindo diretamente no percentual de matéria orgânica degradável presente nos resíduos, tais como localização geográfica, nível de renda da população, grau de industrialização da região, entre outros.

Tabela 2: Composição gravimétrica do RSU bruto de Araranguá/SC.

<b>Componentes</b>	<b>Percentual em massa (%)</b>
Fração 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 *apud* Rossi (2014), dados referentes a 2011.

Já os resíduos orgânicos segregados na fonte, sejam domésticos, sejam provenientes de grandes geradores, são substratos ricos em matéria orgânica e com reduzida concentração de impurezas. Observam-se na Tabela 3 algumas diferenças entre as características dos resíduos sem segregação e os segregados na fonte.

Tabela 3: Composição média de RSU bruto, RSU segregado e respectivo potencial de produção de biogás (PPB).

<b>Parâmetro</b>	<b>RSU bruto</b>	<b>Fração orgânica (RSU segregado)</b>
<b>Sólidos Totais (ST)</b>	(30-40)%	(15-20)%
<b>Sólidos Voláteis (SV)</b>	(50-60)%	(85-95)%
<b>Impurezas (sem sedimentos) *</b>	(10-20)%	(5-10)%
<b>Potencial de produção de biogás/t<sub>sv</sub>* (PPB<sub>sv</sub>)</b>	(450-600) Nm <sup>3</sup> /t <sub>sv</sub>	850 Nm <sup>3</sup> /t <sub>sv</sub>
<b>Porcentagem de metano no biogás*</b>	(60-65)%	(55-60)%

\*Os valores correspondem a estimativas adaptadas à realidade no Brasil por BN Umwelt GmbH, com base no RSU da região de Blumenau (SC).

Fonte: Arquivo Tekoha Engenharia e Consultoria LTDA; BN Umwelt GmbH (2013) *apud* BRASIL (2016).

A produtividade média de biogás para o RSU é variável e essa variação está relacionada intimamente à razão Sólidos Totais (ST)/ Sólidos Voláteis (SV), sendo esse um dos parâmetros mais importantes a ser levado em consideração nos métodos de biodigestão. O fluxograma apresentado na Figura 3 mostra as etapas típicas de uma planta de produção de biogás a partir da fração orgânica de RSU.

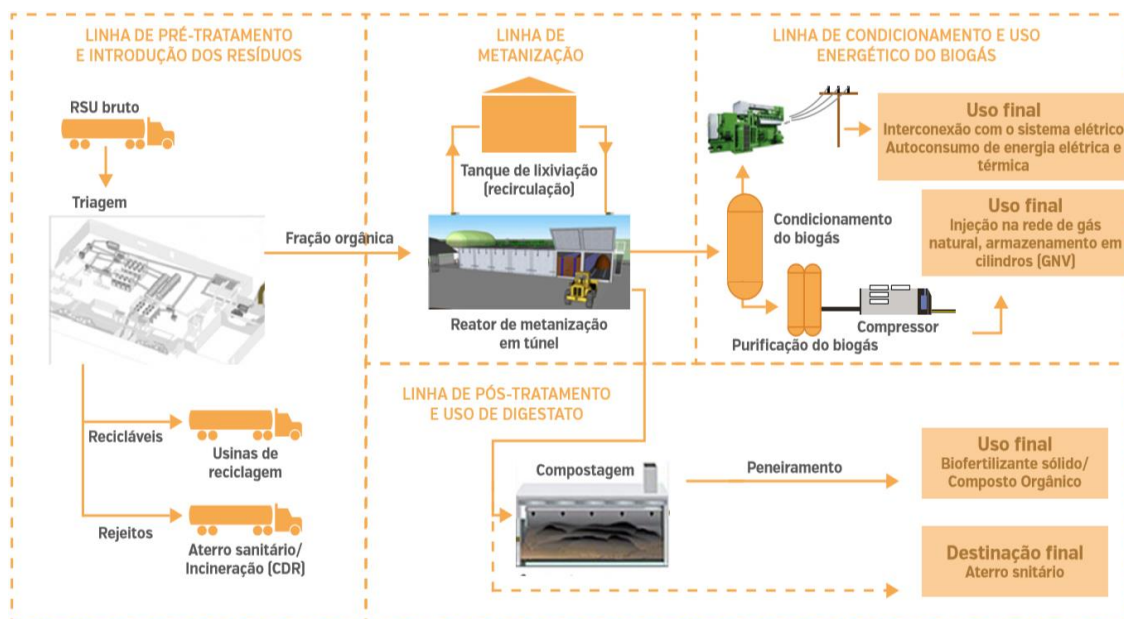


Figura 3: Fluxograma típico de uma planta de biodigestão para produção de biogás a partir de RSU. Fonte: Methanum apud Brasil (2016).

A planta apresenta desde o processo de pré-tratamento, a linha de biodigestão, uso final do biogás (térmico e elétrico) e também compostagem e a destinação final dos resíduos (BRASIL, 2016).

O sistema de recepção e pré-tratamento do substrato é a primeira etapa da planta, sendo assim bastante complexo, principalmente quando se trata de RSU bruto, e se configura como uma etapa de triagem com o objetivo de recuperar os materiais recicláveis e promover a separação da matéria orgânica a ser destinada ao tratamento anaeróbio (BRASIL, 2015). A fração de rejeitos gerada no processo deve ser direcionada à disposição final em aterros sanitários ou utilizada como combustível derivado de resíduos (CDR) em sistemas de tratamento térmico, por exemplo, incineração (BRASIL, 2016).

Após a triagem, o resíduo orgânico é destinado à linha de biodigestão (ou metanização na Figura 3). A quantidade de fração orgânica a ser processada, bem como o conhecimento de suas características físico-químicas, é o ponto de partida para o dimensionamento de sistemas de biodigestão. Usualmente, a quantidade de fração orgânica é dada em termos de vazão volumétrica, ou vazão mássica e concentração de matéria orgânica ( $SV$ ,  $DQO$ ,  $DBO$ ,  $COT$ ) (BRASIL, 2016). Diferente dos substratos da agropecuária e indústria de alimentos, os RSU se caracterizam pela sua composição complexa, que varia de acordo com os serviços de coleta e de variação de locais públicos,

as atividades comerciais e industriais desenvolvidas, o nível econômico e educacional da sociedade (BRASIL, 2015).

De acordo com Brasil (2015), empregam-se usualmente três processos para o tratamento anaeróbio de RSU:

- Digestão anaeróbia seca descontínua (DASD);
- Digestão anaeróbia seca contínua (DASC);
- Digestão anaeróbia úmida (DAU).

A tecnologia aplicada sempre deve ser escolhida a partir das características do substrato e dos objetivos do tratamento. No Brasil, devido à quase inexistência de coleta seletiva dos RSU, as tecnologias de digestão seca são mais apropriadas, pois são menos sensíveis à presença de impurezas (BRASIL, 2015).

A Digestão Anaeróbia Seca Descontínua (DASD) possui menor grau mistura do substrato e a necessidade de abertura do contêiner após o ciclo da digestão. Por ser um processo descontínuo, apresenta uma menor eficiência na produção de biogás, obtendo um volume de biogás de 20% a 30% menor do que no processo contínuo. O processo de Digestão Anaeróbia Seca Contínua DASC consiste em uma técnica mais estável para digestão de resíduos em relação à eficiência energética, eficiência de processo e diminuição de emissões, sendo o equilíbrio entre uma boa produção de biogás, mínima liberação de gases e qualidade de material digerido. Já a Digestão Anaeróbia Úmida (DAU), apesar de apresentar as maiores produções de biogás e vantagem econômica, apenas é eficiente para processamento de resíduos previamente úmidos e livres de impurezas, pois há alto investimento no processamento, na operação e o desgaste dos equipamentos (BRASIL, 2015; BRASIL, 2016).

Não havendo possibilidade de aproveitamento do material sólido final, esse deve ser direcionado a aterro sanitário e/ou incineração para produção de energia térmica. Já a fração líquida, em caso de não haver escoamento como fertilizante orgânico (insumo agrícola), deve ser direcionada a um sistema de pós-tratamento ou, então, descartada na rede coletora de esgoto, mediante o pagamento do serviço de coleta e tratamento à companhia local (BRASIL, 2015).

Devem ser observados composição do biogás (contaminantes, tais como gases inertes e ácidos  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ , siloxanos, etc), umidade, pressão, vazão, além do

poder calorífico para a seleção da tecnologia de condicionamento do biogás (BRASIL, 2015; BRASIL, 2016).

Para a geração de energia elétrica a partir do biogás, são três as principais tecnologias: (i) motores a gás estacionários (Combined Heat and Power - CHP) para gerar energia elétrica e térmica, (ii) caldeiras a gás para gerar energia térmica, e (iii) purificação do biogás a biometano e injeção na rede de gás natural, possibilitando posterior aproveitamento como energia elétrica, térmica e veicular (BRASIL, 2015).

A maneira mais comum para a conversão do biogás em energia é por meio da utilização de grupos geradores, que são compostos por um motor a combustão juntamente a um gerador elétrico, conhecido como CHP (Combined Heat and Power). Devido à produção de calor na queima do biogás, esses equipamentos podem ser utilizados em sistemas de cogeração.

A Figura 4 a seguir exemplifica o funcionamento de uma planta CHP. Geralmente se utilizam motores à combustão com gerador de eletricidade que, devido à produção de calor, podem ser utilizados como CHP, com motores do tipo Otto/Gasolina (a gás) e diesel (bicombustíveis). Os motores a gás têm sido mais procurados atualmente devido às menores emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), que nesses motores representam cerca de 20% das emissões dos motores bicombustíveis, além da redução na emissão de material particulado.

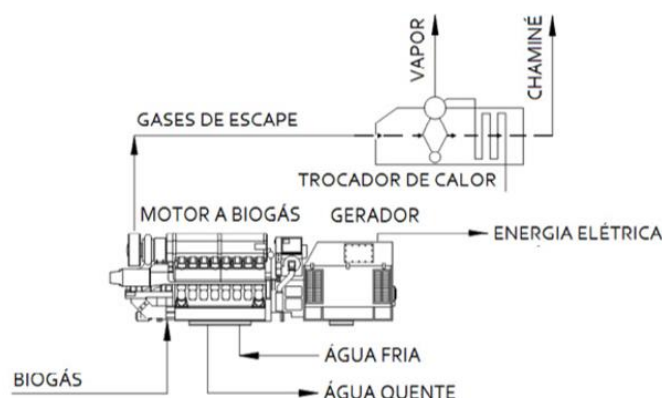


Figura 4: Esquema de funcionamento de um CHP. Fonte: COGERAR *apud* Brasil (2016)

Na utilização de um CHP, é possível explorar 90% da energia contida no gás. A separação do calor acontece em quatro lugares, como mostra a Figura 5, que apresenta a transformação da energia química contida em um gás, em energia térmica e energia

elétrica, levando em consideração as perdas existentes nessas conversões (BRASIL, 2015; BRASIL, 2016).

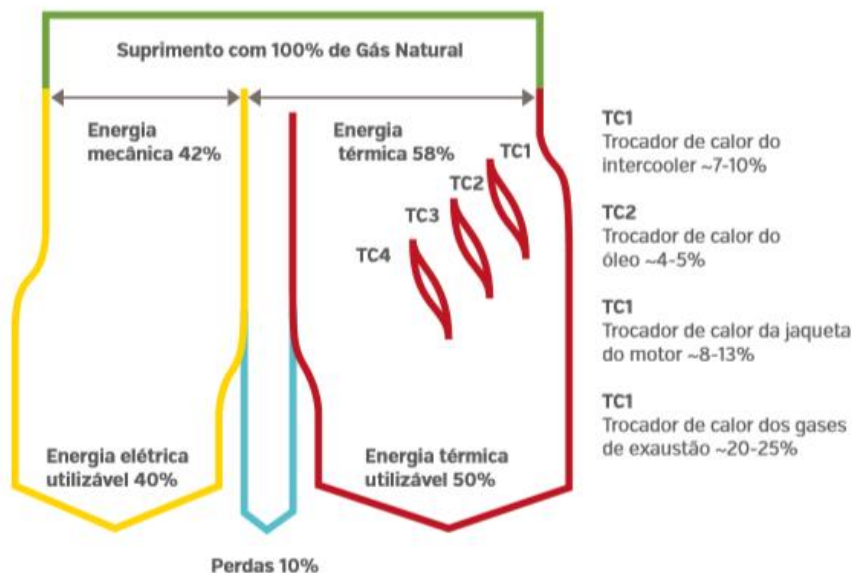


Figura 5: Esquema Sankey da aplicação típica de cogeração com motor alternativo a gás. Fonte: GE Energy (2009) apud Brasil (2016).

Nesse caso, os grupos geradores permitem que cerca de 40% do total de energia contido no combustível seja aproveitado em forma de eletricidade, havendo 2% de perdas no gerador e 58% de perdas por calor (50% recuperável e 8% irre recuperável) (BRASIL, 2016).

As aplicações do calor reaproveitado variam. Apesar da possibilidade da reutilização da energia térmica gerada durante a produção de eletricidade, nem sempre há aplicação para tal energia (BRASIL, 2016; BRASIL, 2015).

Os geradores empregados em um CHP podem ser de corrente alternada, podendo ser síncronos, mais complexos, apresentando autoignição e também assíncronos, equipamentos mais simples e mais econômicos, recebendo tensão de ignição da rede. A eficiência elétrica dos motores que funcionam exclusivamente com gás varia de 34% a 45%, enquanto os motores bicom bustíveis (diesel e biogás) variam de 30% a 45%. A eficiência térmica varia de 40% a 55% em ambos os motores. O teor de metano no biogás deve ser, no mínimo, de 45% em motores exclusivamente a gás, sendo que os motores bicom bustíveis trabalham com teores inferiores (BRASIL, 2016; BRASIL, 2015).



As principais vantagens dos motores que funcionam somente com biogás são: menores emissões de gases poluentes comparativamente ao uso de diesel e menores custos de manutenção. Uma desvantagem, no entanto, são os maiores investimentos. Já os motores bicompostíveis são mais baratos, apresentam alta eficiência mesmo na faixa inferior, são de fácil operação e não necessitam de tratamento complexo para a utilização do gás. Em contrapartida, têm maiores custos de manutenção, necessitam de óleo adicional para a ignição e são mais poluentes (BRASIL, 2016; BRASIL, 2015).

Dados de caracterização quantitativa e qualitativa do substrato obtidos da literatura subsidiaram as demais etapas de estimativa, possibilitando inferir sobre os requisitos de processo. Conforme descrito por Brasil (2016), a Carga Orgânica Aplicada (*COA*) corresponde à massa de matéria orgânica (*SV* ou *DQO*) disponível para o sistema de biodigestão, por unidade de tempo. A *COA* é obtida por meio do produto entre a vazão mássica ou volumétrica de substrato (*Q*) e a concentração de matéria orgânica no substrato afluente ao sistema de biodigestão, dada em *DQO* ou *SV*, conforme pode ser verificado na equação a seguir:

$$COA = Q \times S_o \quad (1)$$

Em que:

- *COA* = carga orgânica (kg/dia);
- *Q* = vazão volumétrica ou mássica de substrato afluente ao reator de biodigestão (m<sup>3</sup>/dia ou kg/dia);
- *S<sub>o</sub>* = concentração de matéria orgânica (*DQO*, *SV*) no substrato afluente (kg/m<sup>3</sup> ou kg/kg).

A estimativa da produção de biogás, segundo Brasil (2016), pode ser feita com base na taxa de degradação do substrato pela equação 2.

$$Q_{biogás} = Q_{RSU} \times PPB \quad (2)$$

Em que:

- *Q<sub>biogás</sub>* = Vazão volumétrica de biogás (Nm<sup>3</sup>/dia);
- *Q<sub>RSU</sub>* = Vazão mássica de RSU (t/dia);

- $PPB_{biogás}$  = Potencial de produção de biogás ( $Nm^3/t$ );

Para estimar a geração de energia térmica e elétrica de uma planta de biogás, deve-se levar em conta a vazão de biogás, a concentração de  $CH_4$  e as eficiências elétrica e térmica do sistema de aproveitamento energético de biogás. A eficiência total de uma usina de biogás deve ser calculada somando-se as eficiências térmica e elétrica. A potência disponível é calculada com base na seguinte equação, tal como proposto por Brasil (2016):

$$P_d = Q_{biogás} \times C_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \quad (3)$$

Onde,

- $P_d$  = Potência disponível (W);
- $Q_{biogás}$  = Vazão de biogás ( $Nm^3/s$ );
- $C_{CH_4}$  = Concentração de  $CH_4$  no biogás (%);
- $PCI_{CH_4}$  = Poder Calorífico Inferior do  $CH_4$  ( $kJ/m^3$ ).

Com base na  $P_d$ , calcula-se, então, a potência térmica e a potência elétrica instaladas na usina, a qual considera a eficiência de conversão de energia do grupo gerador. Destaca-se que as energias térmica e elétrica devem ser calculadas separadamente, tendo em vista que os sistemas de valorização energética expressam eficiências diferentes para cada tipo de energia (BRASIL, 2016).

$$P_i = P_d \times \emptyset \quad (4)$$

Onde,

- $P_i$  = Potência instalada (W);
- $P_d$  = Potência disponível (W);
- $\emptyset$  = Eficiência na recuperação de energia térmica ou elétrica do grupo gerador (%).

Utilizando os dados de produção de biogás, tem-se o volume de combustível disponível para geração de energia elétrica. A potência instalada do grupo moto-gerador deve ser definida a partir do volume médio diário de biogás produzido (BRASIL, 2017).

$$PE_{(REAL-CH_4)} = Q_{(N-REAL-CH_4)} \times E_{(CH_4)} \times 0,2778 \times N \quad (5)$$

Onde,

- $PE_{(REAL-CH_4)}$  = Potencial elétrico (kWh.d<sup>-1</sup>);
- $Q_{(N-REAL-CH_4)}$  = Produção real normalizada de metano (Nm<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>);
- $E_{(CH_4)}$  = Poder calorífico Inferior do metano (MJ.Nm<sup>-3</sup>);
- $N$  = Rendimento do grupo moto-gerador;
- 0,2778 = Conversão de 1 MJ em 1kWh

## 1.4 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar as oportunidades e os desafios para o município de Araranguá/SC em relação à disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), mais precisamente, para a biodigestão de resíduos sólidos urbanos brutos e da fração orgânica segregada de RSU a partir da comparação entre os cenários propostos e o atual.

Para isso, foram definidos como objetivos específicos: caracterizar o gerenciamento atual de RSU realizado pela Prefeitura Municipal de Araranguá/SC; propor e analisar cenários incluindo recuperação energética de RSU bruto e da fração orgânica de RSU por meio da biodigestão; estimar o potencial de produção de biogás para recuperação energética e por fim, estimar o potencial de geração de bioeletricidade a partir da conversão do biogás nos cenários propostos.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo compreende os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados no município de Araranguá/SC pela Prefeitura Municipal e pela empresa terceirizada

atualmente responsável pela coleta e destinação dos RSU do município visto que a coleta é dividida entre as mesmas. Considerou-se uma população de 61.310 habitantes e um território de 303,160 km<sup>2</sup> segundo dados do último censo realizado pelo IBGE, em 2010 (IBGE, 2010).

## **2.2 Estimativa da produção de RSU em Araranguá/SC**

A descrição da situação atual do gerenciamento de RSU de Araranguá/SC bem como a quantificação e a caracterização de RSU coletados nesse município foi realizada a partir de dados fornecidos pela equipe da Secretaria de Obras da Prefeitura Municipal (responsável pelo gerenciamento e coleta da cidade) e pela empresa terceirizada de coleta e destinação, por meio de reuniões presenciais, contatos telefônicos e eletrônicos. Esses dados foram associados a dados obtidos da literatura, conforme citado na seção 1.3 da introdução (Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3) e dados divulgados pelos Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) (ARARANGUÁ, 2015) e de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) (ARARANGUÁ, 2015).

Os dados fornecidos pela empresa terceirizada de coleta e destinação são repassados à Prefeitura Municipal ao final de cada mês, neles constam informações sobre a quantidade de RSU coletada por cada caminhão, o peso bruto de RSU e o valor pago por tonelada disposta no aterro.

Para a determinação da quantidade de resíduo utilizada em cada cenário proposto conforme descrito no item 2.4, foram considerados os números divulgados pelos relatórios da empresa terceirizada, destacando que o município de Araranguá sofre com a sazonalidade de população nos meses de novembro a março, devido à influência de turistas na temporada de verão. Como consequência, há variação na produção de RSU ao longo do ano.

Os relatórios fornecidos pela empresa terceirizada e pela Prefeitura Municipal são referentes ao período de abril de 2018 até abril de 2019, possibilitando a análise do sistema atual de gerenciamento de RSU em um ano completo.

Para os cálculos de gasto que a Prefeitura Municipal possui com disposição e coleta, foram considerados: valor pago por tonelada entregue no aterro sanitário, preço médio do combustível do caminhão de coleta (neste caso óleo diesel) obtido da base de dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP, 2019).

Foram desconsiderados gastos com manutenção dos caminhões (lavagens, lubrificações, peças e consertos), visto que esses ainda continuarão realizando a coleta, apenas o local de disposição seria alterado para implementação dos cenários propostos, diminuindo cerca de 76 km percorridos por entrega na destinação final, visto que essa não é realizada todos os dias da semana. Segundo responsáveis, os dias em que são realizadas as destinações finais são nas segundas-feiras, terças-feiras e sextas-feiras devido à logística de coleta dividida entre a Prefeitura Municipal e a empresa terceirizada coresponsável pela coleta.

### **2.3 Cenários propostos**

Diante da situação atual da destinação dos RSU foram considerados quatro cenários para uma destinação final mais adequada e ambientalmente correta, visando à recuperação energética por meio da biodigestão. Nesses cenários realizou-se estimativa do valor a ser economizado pela Prefeitura Municipal com a produção e a conversão do biogás em bioeletricidade comparativamente à situação atual, valor esse a ser considerado como disponível para investimento em um sistema de recuperação energética, além dos potenciais benefícios para a comunidade.

Os cenários tiveram como base a situação atual do município, em que a coleta dos resíduos não segregados (RSU bruto) é dividida entre prefeitura e empresa terceirizada, com destino ao aterro sanitário localizado na cidade de Içara/SC, localizado a cerca de 38 km de distância de Araranguá/SC. Os cenários propostos foram:

- Cenários 1: Biodigestão de RSU sem segregação, Araranguá (RSU bruto Araranguá);
- Cenário 2: Biodigestão com segregação da fração orgânica de RSU, Araranguá (RSU segregado Araranguá);
- Cenário 3: Biodigestão sem segregação de RSU, média brasileira (RSU bruto média brasileira);
- Cenário 4: Biodigestão com segregação da fração orgânica de RSU, média brasileira (RSU segregado média brasileira).

Para a realização dos cálculos dos Cenários 3 e 4 foram utilizados dados apresentados na Tabela 1 referentes ao ano de 2015. Também foi considerado, para alguns cálculos no cenário 2 e 4, que existirá a segregação prévia dos materiais que podem ser reciclados, esses sendo destinados a um outro tipo de recuperação.

A intenção de comparar os resultados do município de Araranguá/SC com os resultados da média brasileira foi estimar o potencial de recuperação energética de RSU por meio da biodigestão a nível nacional.

## **2.4 Estimativas da produção de biogás e bioeletricidade**

A estimativa da produção de biogás e da geração térmica e elétrica a partir do biogás foi realizada seguindo metodologia descrita no documento disponibilizado pelo Ministério das Cidades em parceria com o governo alemão por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ) (BRASIL, 2016).

Para estimativa da produção de biogás utilizou-se a Equação 2 e a Equação 3 foi utilizada para estimar o potencial de produção de energia térmica a partir da combustão do biogás e também de energia elétrica. A Equação 5 possibilitou analisar o potencial elétrico disponível em kWh/dia a partir de resultados obtidos nas equações anteriores.

Para cálculos por meio dessas equações foram consideradas as eficiências médias descritas no item 1.3 de conversão térmica e elétrica, de 47,5% e 37,5% respectivamente. A estimativa da produção de biogás foi realizada considerando o teor de sólidos voláteis (SV) do substrato como equivalente a  $S_0$  = concentração de matéria orgânica de RSU bruto e RSU segregado, tal como descrito na Tabela 3, que apresenta dados de caracterização considerados para as estimativas.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados foram apresentados em três subseções. A subseção 3.1 apresenta a estimativa da produção de biogás na biodigestão para os quatro cenários considerados. A subseção 3.2 analisa os investimentos em uma planta geradora a partir da fração orgânica de RSU, visto que foi estimado o custo que o município possui com o atual método de descarte dos RSU, que poderia ser investido em métodos mais eficientes e ambientalmente corretos de gerenciamento. A terceira subseção (3.3) compreende a

análise dos desafios e das oportunidades relacionados à utilização de RSU na geração distribuída de energia e, também, na gestão municipal dos mesmos.

### **3.1 Produção de RSU em Araranguá/SC e estimativa da produção de biogás e de bioeletricidade nos cenários propostos**

Conforme descrito no item 2.2, dados de coleta de RSU foram fornecidos pela equipe da Secretaria de Obras da Prefeitura Municipal (responsável pelo gerenciamento e coleta) e esses foram apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Quantidade coletada de RSU em Araranguá/SC no período de maio de 2018 a abril de 2019.

<b>Mês</b>	<b>Toneladas</b>	<b>Dias</b>
<b>Maio 2018</b>	1132,19	27
<b>Junho 2018</b>	1134,69	27
<b>Julho 2018</b>	1114,34	26
<b>Agosto 2018</b>	1123,17	27
<b>Setembro 2018</b>	1140,82	25
<b>Outubro 2018</b>	1345,75	27
<b>Novembro 2018</b>	1151,23	26
<b>Dezembro 2018</b>	457,32	25
<b>Janeiro 2019</b>	1458,69	26
<b>Fevereiro 2019</b>	1085,29	24
<b>Março 2019</b>	1209,26	26
<b>Abril 2019</b>	1219,9	26
<b>Total</b>	13572,65	312

Fonte: Prefeitura Municipal de Araranguá/SC (2019).

A produção média mensal de RSU no período de maio de 2018 a abril de 2019 em Araranguá/SC foi de 1.100 t/mês e cerca de 43,5 t/dia.

A Prefeitura Municipal é responsável pela coleta de 30-35% dos RSU do município e a empresa terceirizada atualmente é responsável pela coleta e destinação dos RSU no município detém 65-70% da cobertura da cidade.

Durante a coleta, não há segregação dos resíduos, ou seja, resíduos provenientes do setor comercial (com destaque para grandes geradores como supermercados, restaurantes e feiras) e doméstico são coletados em conjunto e destinados ao mesmo ponto de disposição, localizado em Içara/SC, onde também não existe a segregação dos resíduos que chegam ao aterro. Nesse aterro sanitário há sistema de drenagem do biogás produzido

nas condições de aterramento e de recuperação energética do mesmo, no entanto, não foi possível obter maiores informações sobre essa prática durante a realização deste trabalho.

Como descrito no item 2.3, para a realização das estimativas da produção de biogás dos cenários 2 e 4, foi considerado que existiria a segregação prévia dos materiais que possuam condições de reciclagem, tais como papel, plástico e metais, de acordo com a porcentagem descrita anteriormente na Tabela 2.

Os valores obtidos considerando-se os RSU produzidos em Araranguá/SC são uma estimativa da produção de biogás, primeiro sendo apresentado o seu conteúdo energético e após sua conversão em potência elétrica e potência térmica, considerando as respectivas eficiências de conversão, que foram previamente citadas no item 2.4. Os resultados foram apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Estimativa da produção de biogás nos cenários propostos.

	Araranguá/SC		Média brasileira	
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
<b>COA (tsv/d)</b>	8,37	6,85	14,60	11,95
<b>Produção estimada de biogás (Nm<sup>3</sup>/d)</b>	4.396,43	5.823,84	7.666,10	10.155,09
<b>Conteúdo energético do biogás (MW)</b>	1,14	1,39	1,99	2,43
<b>Potência elétrica estimada na conversão do biogás (kW)</b>	4,28	5,22	7,47	9,10
<b>Potência térmica estimada na conversão do biogás (kW)</b>	5,42	6,61	9,46	11,52
<b>Potencial elétrico (kWh/d)</b>	16.442,13	21.780,48	28.670,30	37.978,84

Conforme apresentado na Tabela 5, percebe-se o que já havia sido mencionado durante o trabalho, a importância da segregação dos RSU, não só para recuperação energética que é o caso em estudo, mas como benefício para a saúde pública e para o meio ambiente. Pode-se perceber o elevado potencial de produção de biogás, mesmo com a diferença de vazão mássica apresentada nas Tabelas 1 e 2 o conteúdo energético do RSU segregado chega a ser cerca de 22% maior que o RSU bruto. Isso se deve ao fato de que o RSU segregado possui maior potencial de produção de biogás (PPB) comparando ao RSU bruto, sendo os valores aproximados de 850 Nm<sup>3</sup>/tsv e 525 Nm<sup>3</sup>/tsv, respectivamente, conforme dados da Tabela 1.



Para melhor entendimento dos resultados, potência pode ser entendido como a capacidade que um equipamento tem de realizar o papel dele, tendo como unidade o Watt (W), já a energia é a quantidade de potência que foi entregue para um equipamento funcionar, durante um período determinado, é a energia que contabiliza o consumo de cada equipamento elétrico, medido em watt-hora (Wh).

Pode-se observar também a diferença entre os Cenários 1 e 2 entre os Cenários 3 e 4, isso se deve ao fato de que são RSU de localização geográfica diferente, nível de renda da população distintos, grau de industrialização da região que varia, pois estamos tratando de uma região específica, nesse caso a cidade de Araranguá e um valor obtido pela média brasileira, onde essa média leva em consideração que muitas regiões do Brasil possuem a agricultura e pecuária como fonte de renda de várias cidades, influenciando diretamente na quantidade de FO no RSU, fazendo com que a média nacional se destaque mais que os valores obtidos para a região de Araranguá, que também obteve-se resultados relevantes na geração de energia.

A Figura 6 ilustra graficamente a diferença apresentada na tabela anterior. É de suma importância lembrar que a quantidade de resíduos analisada em cada situação é diferente devido ao fator segregação. RSU segregado refere-se cerca de 60% do resíduo total coletado, denominado de RSU bruto.

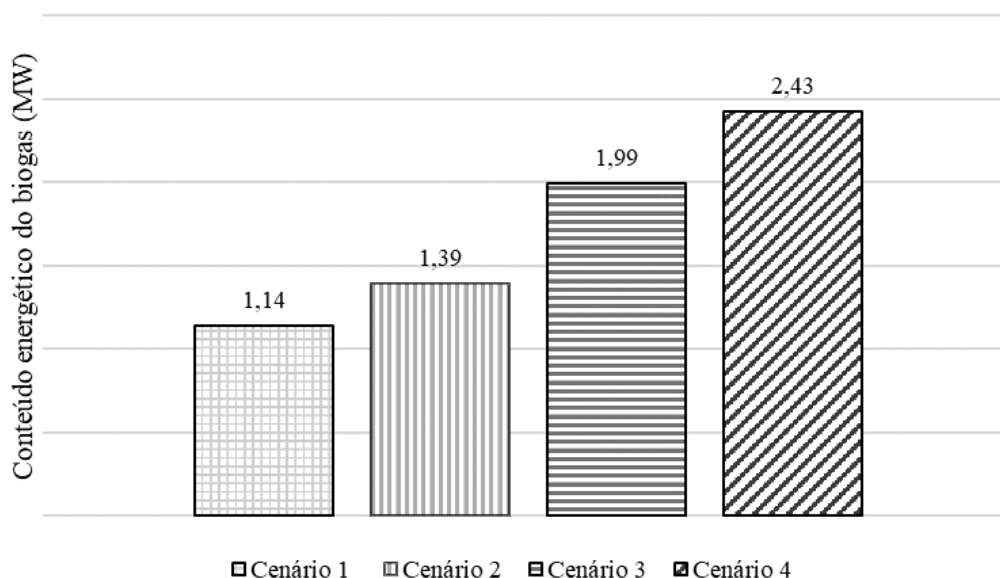


Figura 6: Conteúdo energético (MW) da produção de biogás estimado para os cenários propostos.

Também é possível analisar o potencial elétrico após a sua conversão em kWh/dia, o que em termos energéticos é a unidade utilizada para medir o consumo de uma unidade, sendo ela residencial, comercial ou até mesmo industrial. Os resultados apresentados indicam bom potencial, que foi discutido na seção seguir 3.2, juntamente com uma comparação com outra forma de geração de energia elétrica distribuída.

Quando se analisa essa conversão para kWh/dia, chega-se a uma diferença de 32% entre os cenários 1 e 2, e entre os cenários 3 e 4, evidenciando, mais uma vez, a potencial contribuição que a segregação de RSU causa em processos de aproveitamento energético.

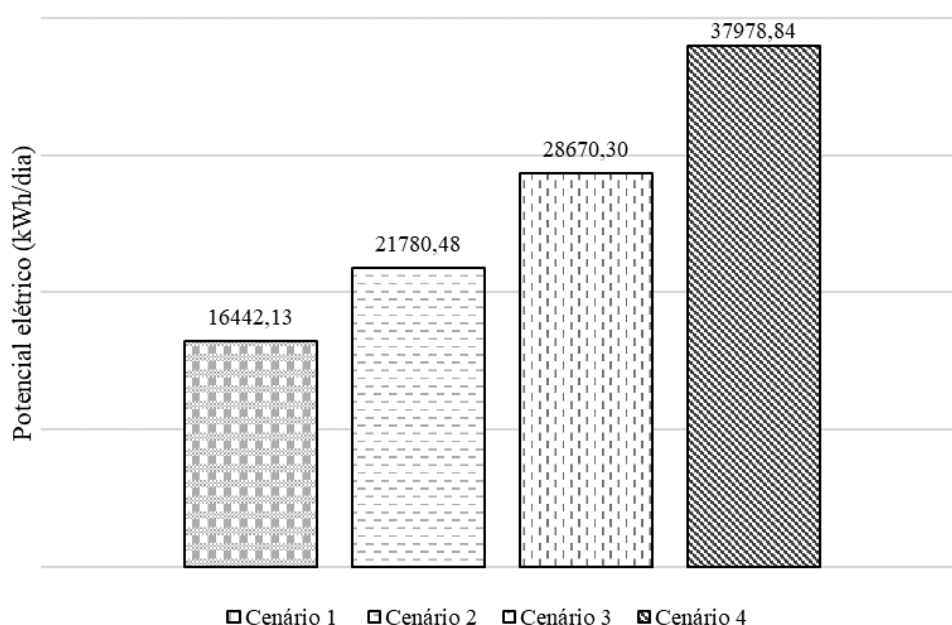


Figura 7: Potencial elétrico (kWh/dia) da produção de biogás estimada para os cenários propostos.

Analisando-se os valores estimados de potência elétrica gerada pela conversão do biogás, incluindo as perdas (8%) e a eficiência assumida para o gerador (37,5%), consegue-se, utilizando-se a média de consumo brasileiro de uma residência em Florianópolis/SC, de aproximadamente 214 kWh/mês (SCARABELOT, RAMPINELLI, RAMBO, 2018) e considerando uma média de 3 habitantes por residência, os seguintes valores apresentados na Tabela 6 foram obtidos.

Tabela 6: Potencial elétrico da produção de biogás estimada para os cenários propostos.

	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>
<b>Produção de metano (Nm<sup>3</sup>/dia)</b>	4.396,43	5.823,84	7.666,10	10.155,09
<b>Poder calorífico inferior do metano (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	35,90	35,90	35,90	35,90
<b>Rendimento do grupo gerador</b>	0,3750	0,3750	0,3750	0,3750
<b>Conversão de 1 MJ para 1 kWh</b>	0,2778	0,2778	0,2778	0,2778
<b>Potencial elétrico disponível (kWh/dia)</b>	16.442,13	21.780,48	28.670,30	37.978,84
<b>Potencial elétrico disponível (kWh/ano)</b>	6.001.377,04	7.949.876,07	10.464.658,78	13.862.275,27
<b>Consumo anual médio de uma residência (kWh/ano)</b>	2568	2568	2568	2568
<b>Residências beneficiadas</b>	2337	3096	4075	5398

Ao analisar-se os valores apresentados na tabela anterior foi possível verificar o grande potencial existente na conversão de RSU em energia elétrica, sendo possível, no pior dos casos (Cenário 1), abastecer cerca de 11% das residências de Araranguá/SC, dentro dos parâmetros considerados. Quando analisamos os resultados com o RSU segregado (Cenário 2), essa porcentagem aumenta, chegando a 15% de residências, exemplificando o potencial que existe na conversão química do biogás para energia elétrica.

Realizando-se uma comparação com os resultados do trabalho de Rossi (2014), que estudou a utilização da incineração como método de recuperação energética de RSU para a região da Associação dos Municípios do Extremos Sul Catarinense (AMESC), à qual pertence Araranguá/SC, pode-se realizar alguns pontos sobre os resultados. Importante ressaltar que a região estudada por Rossi (2014) inclui 15 municípios, com produção considerada de 101,75 t/dia de RSU, sendo Araranguá/SC responsável por 49,05 t/dia. Os cenários considerados pela autora foram: 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.

Comparando-se os resultados entre incineração e biodigestão, é comprovada a eficácia da biodigestão como forma de recuperação energética. Pode-se verificar, no

cenário mais otimista de Rossi (2014), uma potência total teórica de 2,2 MW, enquanto que os resultados obtidos neste trabalho, em média, resultaram em 1,14 MW, porém a quantidade de RSU no caso deste trabalho é cerca de 43% da quantidade utilizada na proposta de Rossi (2014). Empregando-se a mesma quantidade de RSU na biodigestão, os valores de potência total teórica seriam de 2,67 MW (biodigestão sem segregação) e 3,25 MW (biodigestão com segregação). É importante ressaltar que não foi utilizada a mesma base de cálculo, por isso, foram apresentados os valores de potência total teórica e apenas feitas as comparações em termos da quantidade de RSU utilizada e os métodos de conversão energética. A incineração tem como princípio a combustão da matéria-prima, diferente de um processo biológico em que consiste a biodigestão. Há que se destacar ainda que além do tratamento de RSU e da produção de biogás e energias derivadas, a biodigestão resulta em outra fração de produto com elevado valor agregado, um biofertilizante sólido rico em nutrientes com aplicação agrícola, podendo esse ser aplicado pela Prefeitura Municipal nas práticas de jardinagem, hortas comunitárias, ou doado para agricultores do município.

Sobre a potência térmica produzida, a análise teria que ser feita em relação aos processos térmicos em seu ciclo produtivo. O método utilizado para cálculo dos parâmetros levou em consideração a cogeração, onde o uso da energia térmica não seria para conversão em energia elétrica e sim para processos internos, como geração de potência extra e de água aquecida, para o aquecimento de ambientes, resfriamento de água (com uso de resfriadores de absorção) e aplicações industriais que se adequem, apesar do valor em módulo aparentemente ser maior do que o de potência elétrica. Neste presente trabalho, deu-se prioridade para a obtenção e quantificação da potência elétrica, sendo assim, recomenda-se o estudo e aplicação da parte térmica desta proposta.

### **3.2 Análise econômica preliminar dos cenários propostos**

Segundo o responsável pelo serviço de gerenciamento de RSU do município, e previamente exposto por Rossi (2014), em 2014 havia contrato com outra empresa que possuía ponto de destinação em Araranguá/SC, onde ocorria a segregação parcial realizada de forma manual, ou seja, o material que era descartado pela população em geral, se existisse uma possibilidade de reciclagem, era separado e não participava do processo de aterramento. Atualmente esse processo é inexistente na empresa encarregada

pela coleta, sendo o resíduo disposto sem nenhuma segregação, aumentando consideravelmente a quantidade de material disposta no aterro, o que limita mais ainda sua vida útil e potencializa a ocorrência de efeitos negativos dessa forma de disposição.

Como a cobertura da coleta de RSU de Araranguá/SC é realizada por duas partes, existem dois preços distintos para a destinação. A Prefeitura Municipal, que possui apenas dois caminhões destinados à cobertura de alguns bairros da cidade, paga por tonelada depositada no aterro cerca de R\$ 132,95. Já a outra parte, que possui seis caminhões, o preço pago por esse serviço (coleta + destinação) é de R\$ 188,86, visto que a coleta é de responsabilidade da empresa terceirizada atualmente responsável pela coleta e disposição.

A Tabela 7 apresenta a despesa média mensal da Prefeitura Municipal de Araranguá/SC com transporte de RSU coletado até o local de disposição. É importante frisar que os valores apresentados na Tabela 7 não estão inclusos no valor apresentado na Tabela 8, sendo que o cálculo da Tabela 7 é apenas referente ao transporte dos RSU com frota própria da Prefeitura Municipal até o aterro sanitário, e os valores apresentados na Tabela 8 são os valores pagos para a disposição dos RSU coletados.

Tabela 7: Despesa média mensal da Prefeitura Municipal de Araranguá/SC com transporte de RSU coletado até o local de disposição.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Preço médio do Diesel (2018/2019) <sup>1</sup></b>	R\$ 3,79
<b>Distância média percorrida por um caminhão (km)<sup>2</sup></b>	76
<b>Consumo médio de combustível do caminhão (km/l)</b>	3
<b>Despesa média diária de um caminhão (R\$)</b>	R\$ 96,01
<b>Despesa média mensal da frota</b>	R\$ 9.217,28

<sup>1</sup>Fonte: ANP (2019); <sup>2</sup> ida e volta.

Tabela 8: Despesa média mensal da Prefeitura Municipal de Araranguá/SC com coleta e disposição de RSU.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Preço médio da destinação com coleta terceirizada (R\$/t)</b>	R\$ 188,86
<b>Preço médio da destinação com coleta própria (R\$/t)</b>	R\$ 132,95
<b>Despesa média mensal</b>	R\$ 366.140,94

Somando-se os gastos mensais com transporte, coleta e disposição, a Prefeitura Municipal de Araranguá/SC, gasta mais de R\$ 4.000.000,00 anualmente, que poderiam ser investidos em uma alternativa na disposição final dos RSU, como a proposta neste trabalho, a biodigestão.

A análise do custo de instalação de uma planta geradora a partir da biodigestão da fração orgânica de RSU não foi possível pela indisponibilidade de sistemas comerciais de biodigestão, com isso, não se tem ideia de custo para a implementação dessa proposta, no entanto, plantas piloto começam a ser desenvolvidas para pesquisa e até mesmo para aplicação direta em algumas cidades do Brasil em alguns países já se encontram em operação, na Alemanha, por exemplo. Até 2019, cerca de 400 plantas de biodigestão operavam na Alemanha utilizando bioresíduos como substrato e, nesse ano apenas, 135 dessas plantas processaram um total de 2 milhões de toneladas de resíduos orgânicos segregados de RSU (doméstico). Segundo essa fonte, globalmente, a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos está aumentando e deve se tornar o sistema de tratamento de resíduo associado à geração de bioenergia mais importante em países em desenvolvimento e economias emergentes (GERMAN BIOGAS ASSOCIATION, 2019).

Foram realizadas várias tentativas de contato com empresas que trabalham no ramo de aproveitamento energético no Brasil através de RSU, mas a biodigestão não é utilizada como método de recuperação pelas mesmas.

### **3.3 Desafios e oportunidades**

Na quantificação realizada no presente trabalho fica evidente a falta de um gerenciamento otimizado de RSU em Araranguá/SC, pois os resíduos são coletados sem segregação prévia pela comunidade e tampouco a empresa terceirizada o faz, evidenciando uma falha na educação ambiental e deficiência na execução das políticas públicas de meio ambiente.

Considerada uma das principais fraquezas no gerenciamento de RSU, a falta da coleta seletiva causa a perda da eficiência e inúmeros outros problemas operacionais em uma planta de biodigestão, principalmente se essa operar em regime contínuo ou semi-contínuo. Essa ausência de coleta seletiva implica na demanda de um sistema de pré-tratamento para o RSU, entretanto, essa implicação tenderia a ampliar os custos de implantação.

Cabe destacar também, que com a crise energética nacional provocada principalmente pela redução dos níveis de água nos reservatórios das hidrelétricas devido à escassez de chuvas, acionam-se usinas termelétricas, o que acarreta aumento significativo das bandeiras tarifárias utilizadas pelas distribuidoras de energia elétrica no

país. A geração distribuída de energia elétrica a partir do biogás proveniente de reaproveitamento dos RSU é uma alternativa, inclusive já prevista em lei (ANEEL, 2012), cujas características possibilitam a diversificação da matriz energética, a produção de energia limpa e renovável e o aumento da oferta de energia distribuída e próxima aos centros de carga.

É importante ressaltar que a utilização do biogás como biocombustível para gerar energia elétrica promove a redução das emissões de gases indutores do efeito estufa.

Uma outra questão a ser analisada envolve a coleta e a destinação de RSU de grandes geradores do setor comercial, tais como supermercados, feiras e restaurantes. Segundo a Política Ambiental Municipal (2010) a coleta seletiva de resíduos deve ser realizada de forma separada para resíduos domésticos, restos de feiras e de mercados e restos de alimentos deles provenientes e cabe salientar que esses grandes geradores viabilizam coleta segregada da fração orgânica de RSU.

No caso de Araranguá, considerando-se a existência de pelo menos seis grandes geradores, nesse caso, supermercados, os mesmos são responsáveis por cerca de 10 % da fração orgânica coletada mensalmente considerando-se a produção de cerca de 8 t/mês para supermercados de pequeno porte e de 15 t/mês para os supermercados considerados de grande porte, resultando em uma média de 11,5 t/mês, ao total tem-se cerca de 69 toneladas produzidas mensalmente com ônus de coleta e disposição para a Prefeitura Municipal e seus contribuintes. Isso já não ocorre para diversos municípios catarinenses segundo informações obtidas de colaborador responsável pelo gerenciamento de resíduos de uma grande rede de supermercados que tem lojas instaladas em dez cidades catarinenses, dentre essas, Araranguá/SC. Nos casos em que a coleta e a destinação de resíduos desse tipo de gerador não são realizados pela Prefeitura Municipal, o gerador é o responsável. É importante ressaltar que o Brasil não possui uma lei específica que determina a classificação de um grande gerador, porém segundo pesquisas relacionadas na área, o limite a geração é de 120-200 L/dia para estabelecimentos não residenciais (POLETTI, 2018).

Neste trabalho foi proposto o uso da biodigestão como solução para uma gestão integrada dos RSU com recuperação energética, porém, outras propostas podem ser avaliadas em conjunto, envolvendo a compostagem, por exemplo, mas a biodigestão em si, tal como destacado anteriormente, geraria biofertilizante agrícola de qualidade, podendo beneficiar os pequenos produtores que possuem renda a partir da agricultura

familiar no município (cerca de 1000 famílias). Ressalta-se a importância e a expectativa que a sociedade tem em relação a soluções para a questão da má gestão e do mau gerenciamento de RSU. A falta de mais opções de aproveitamento energético de RSU exemplifica o fato de que o Brasil ainda tem grandes desafios em relação a esse método de reaproveitamento energético, sendo a incineração a opção comercial mais oferecida pelas empresas brasileiras.

Outro resultado relevante neste trabalho é a quantidade de residências que seriam beneficiadas caso existisse um projeto de reaproveitamento energético. Podendo também ser proposto o abatimento na iluminação pública municipal, que afeta a população também. Além do benefício econômico direto que o município teria com a alteração da disposição final, a implantação de uma planta de biodigestão com segregação resultaria em geração de emprego na usina, atrairia investidores, aumentaria a pesquisa sobre o assunto, com expectativa de que essa tecnologia poderá se tornar cada vez mais segura e rentável, contribuindo ainda com práticas mais sustentáveis para a sociedade.

#### **4 CONCLUSÃO**

Após todas as análises realizadas no presente trabalho, fica evidente a falta de uma política integrada de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município visto que a coleta seletiva nem é oferecida à população. É falha também a execução dos planos e ações propostas por lei e políticas ambientais do município, exemplo disso é a questão dos grandes geradores que não possuem coleta separada, nem feiras e restaurantes. Outro fato relevante em relação a políticas públicas é a falta de educação ambiental para a população, até mesmo ações que reforcem os princípios da PNRS, citados na introdução deste trabalho, como a logística reversa e a responsabilidade compartilhada.

Atualmente, muitas comunidades que se localizam mais afastadas dos centros urbanos, mas próximas de aterros sanitários sofrem com esse cenário, terrenos são desvalorizados e não se procura estudar novas soluções.

A partir das estimativas realizadas neste trabalho obteve-se bom potencial de geração de energia elétrica a partir da conversão de biogás, sendo que no Cenário 1 obteve-se o valor de 1,14 MW, e para no Cenário 2, 1,39 MW. As comparações entre os Cenários 1 e 3 exemplificam as características dos RSU que foram discutidas ao longo do trabalho, sendo que no Cenário 3 se refere à média brasileira, onde é levada em



consideração a classe social e também a economia da região. Como Araranguá/SC pode ser considerado um município de pequeno/médio porte, suas características são bem evidentes na questão econômica, onde a cidade possui empresas têxteis, poucas indústrias, e agricultura familiar, não havendo grandes produtores de gados bovino e suínos, como por exemplo no oeste do estado de Santa Catarina.

Os resultados obtidos neste trabalho são estimativas de reaproveitamento de resíduos sólidos em uma planta de biodigestão com foco na geração de energia elétrica. A diferença entre o cenário 1 e o cenário 2 é significativa, não podendo ser ignorada. A falta de uma coleta segregada afeta nos resultados propostos, sendo positiva quando existe a segregação, e no cenário atual ela afeta na produção de metano no aterro sanitário, o qual já possui um tratamento, gerando energia elétrica para o mesmo e possuindo abatimento em sua fatura de energia. Sugere-se para próximos estudos a quantificação de quanto  $\text{CH}_4$  é gerado pelo aterro sanitário, e a utilização desse com o emprego da biodigestão para aproveitamento energético.

Além disso, também sugere-se estudar qual é a melhor tecnologia a ser aplicada na recuperação energética via biodigestão com a vazão mássica produzida pelo município de Araranguá/SC e também a possibilidade de levar em conta a produção de RSU da região da AMESC, tendo em consideração que essa região possui pequenas cidades, que em grupo poderiam tornar a geração distribuída de energia elétrica a partir de RSU mais atrativa.

## 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. **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos** - Brasil, 2012.

ABRELPE - Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2017**. Brasil, 2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em: 25/11/2019.

ANEEL. **Cadernos Temáticos ANEEL – Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília, 2014.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 25/11/2019.

ANEEL. **Geração Distribuída**. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ANP. **Série Histórica Do Levantamento De Preços E De Margens De Comercialização De Combustíveis**. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenzia/precos/levantamento-de-precos/serie-historica-do-levantamento-de-precos-e-de-margens-de-comercializacao-de-combustiveis>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ARARANGUÁ. **LEI Nº 2930, DE 28 DE OUTUBRO DE 2010**. 2010. Disponível em:

<<https://www.ararangua.sc.gov.br/cms/pagina/ver/codMapaItem/60001>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ARARANGUÁ (Município). Constituição (2012). **Lei Complementar nº 149, de 2012.**

ARARANGUÁ. PREFEITURA MUNICIPAL DE ARARANGUÁ. (Org.). **Plano Municipal De Saneamento Básico - Pmsb E De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos - Pgirs.** 2015. Disponível em: <[https://site.samaeararangua.com.br/fotos/arq\\_plano\\_2015\\_06\\_09\\_\\_11\\_36\\_14.pdf](https://site.samaeararangua.com.br/fotos/arq_plano_2015_06_09__11_36_14.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2019.

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.

BRASIL. ONU. **FAO: 30% de toda a comida produzida no mundo vai parar no lixo.** 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/fao-30-de-toda-a-comida-produzida-no-mundo-vai-parar-no-lixo/>>. Acesso em: 21 mar. 2019.

BRASIL. **Redução de emissões na disposição final.** 2007. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu\\_urbano/\\_publicacao/125\\_publicacao12032009023918.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023918.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2019.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás: O estado da arte da tecnologia de biodigestão seca;** Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor, Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás: Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás;** Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor, Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás: Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás**. Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Felipe Correa de Souza Pereira Gomes ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás: Guia técnico sobre geração distribuída de energia elétrica por biogás em estações de tratamento de esgoto**; Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor, Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2017.

EC (Org.). **Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)**. 2008. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [U. S.], 1998. **Health and Environmental Effects Testing for Biodiesel under the Requirements for USEPA Registration of Fuels and Fuel Additives**. Washington, DC.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro. Disponível em: <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>.

FIGUEIREDO, Juliana Carvalho. **Estimativa De Produção De Biogás E Potencial Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos Em Minas Gerais**. 2012. Dissertação (Mestrado), UFMG Belo Horizonte, 2012.

GE ENERGY. **Cogeneration Application Considerations**, 2009. Disponível em: [https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en\\_US/documents/technical/ger/ger-3430g-cogeneration-application-considerations.pdf](https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-3430g-cogeneration-application-considerations.pdf). Acesso em: 16/06/2019

GERMAN BIOGAS ASSOCIATION (Alemanha) (Org.). **Biowaste To Biogas**. 2019. Disponível em: <<https://biowaste-to-biogas.com/index.html>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

HENRIQUES, R. M., 2004. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

IBGE. **Panorama**. 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/ararangua/panorama>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

KUNZ, Airton et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.

MELLO, Pedro Pescador de. **Biogás na suinocultura: comparação de tecnologias de geração de gás em três diferentes países**. 2017. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2017

ONU. **Agenda 2030**. 2019. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

POLETTTO, Luíza Denardin. **Metodologia de Definição de Grandes Geradores de Resíduos Sólidos Urbanos para o Município de Florianópolis**. 2018. 114 F. Tcc (Graduação) - Curso De Engenharia Sanitária E Ambiental Trabalho De Conclusão De Curso Universidade, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

Rossi, Catherine Da Rosa. **Potencial de Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos na Região Da Amesc**. 2014. 28 F. Tcc (Graduação) - Curso De Engenharia De Energia, Universidade Federal De Santa Catarina, Araranguá, 2014.

Santa Catarina (Estado). **Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Santa Catarina: Contrato Administrativo N. 012/2016**. Secretaria de Estado do

Desenvolvimento Econômico Sustentável, Diretoria de Saneamento e Meio Ambiente.  
Florianópolis: SDS, 2018

SCARABELOT, L. T.; RAMPINELLI, G. A.; RAMBO, C. R.. **Avaliação do Sistema de Compensação de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos em Unidades Prosumidoras**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.

SCHERHAUFER, Silvia et al. Environmental impacts of food waste in Europe. **Waste Management**, [s.l.], v. 77, p.98-113, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.038>.

SOARES, Erika Leite de Souza Ferreira. **Estudo Da Caracterização Gravimétrica E Poder Calorífico Dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2011. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

TCHOBANOGLIOUS, G. et al. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. EUA: McGraw-Hill, 1993.