

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NOS SISTEMAS ISOLADOS AMAZONENSES

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN SISTEMAS AISLADOS AMAZÓNICOS

ELECTRIC POWER GENERATION FROM URBAN SOLID WASTE IN AMAZONIAN ISOLATED SYSTEMS

Ketson Patrick de Medeiros Freitas*
ketsonpatrick@gmail.com

Genilson Pereira Santana*
gsantana@ufam.edu.br

Priscila Sayme Almeida Souza**
priscilasayme@gmail.com

*Universidade Federal do Amazonas, Manaus/AM, Brasil
**Faculdade Metropolitana de Manaus, Manaus/AM, Brasil

Resumo

Os Sistemas Isolados (SISOL), que no âmbito na rede elétrica são aquelas localidades não conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), estão majoritariamente concentrados na região norte do país, mais especificamente no estado do Amazonas. Esses locais são afetados por diversos problemas, como: déficit energético, altos preços da energia e grandes emissões de poluentes. Ao mesmo tempo, a errada destinação de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no estado Amazonas é um problema ainda existente. Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade da geração de energia elétrica, a partir de RSU, nos SISOL amazonenses. Para isso, foi realizada a análise econômica na condição de certeza. Nesta análise, o projeto se mostrou economicamente inviável, nas condições atuais. Porém, cabe ressaltar que essas condições, envolvem parâmetros que foram bastante impactados com a pandemia de Covid-19, como o preço de venda da energia elétrica e a cotação do dólar. Diante disso, foi realizada a análise de sensibilidade, no qual foram avaliados três cenários, variando-se três parâmetros: preço de venda da energia elétrica, cotação do dólar e impostos. Dos três cenários, o cenário que variou simultaneamente os três parâmetros apresentou uma viabilidade econômica do projeto em 49,5% dos SISOL amazonenses.

PALAVRAS CHAVE: Sistemas Isolados. Pirólise. Amazonas. Resíduos Sólidos Urbanos.

Resumen

Las GO de Sistemas Aislados (SISOL), que dentro de la red eléctrica son aquellas localizaciones no conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN), se concentran mayoritariamente en la región norte del país, más específicamente en el estado de Amazonas. Estos lugares se ven afectados por varios problemas, tales como: déficit energético, altos precios de la energía y grandes emisiones contaminantes. Al mismo tiempo, el mal destino de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el estado de Amazonas es un problema que aún persiste. Dado lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo analizar la factibilidad de generar electricidad a partir de RSU en SISOL en Amazonas. Para ello, el análisis económico se realizó bajo condición de certeza. En este análisis, el proyecto demostró ser económicamente inviable en las condiciones actuales. Sin embargo, es de destacar que estas condiciones involucran parámetros que fueron impactados significativamente por la pandemia Covid-19, como el precio de venta de la electricidad y la tasa del dólar. Por ello, se realizó un análisis de sensibilidad, en el que se evaluaron tres escenarios, variando tres parámetros: precio de venta de electricidad, tipo de cambio del dólar e impuestos. De los tres escenarios, el escenario que varió simultáneamente los tres parámetros presentó

una factibilidad económica del proyecto en el 49,5% del SISOL en Amazonas.

PALABRAS CLAVE: Sistemas aislados. Pirólisis. Amazonas. Resíduos sólidos urbanos.

Abstract

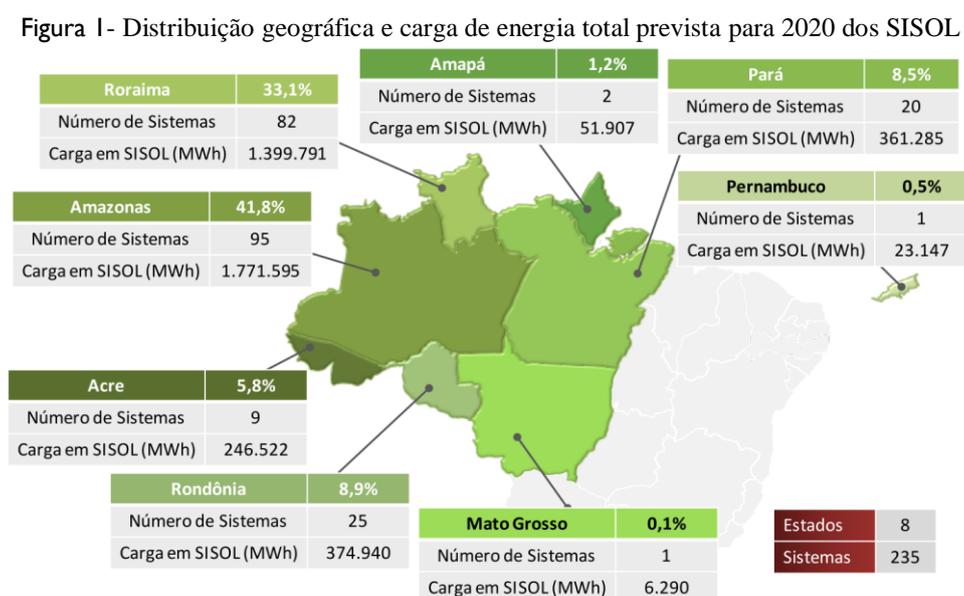
Isolated Systems (SISOL), which within the power grid are those locations not connected to the National Interconnected System (SIN), are mostly concentrated in the northern region of the country, more specifically in the state of Amazonas. These places are affected by several problems, such as: energy deficit, high energy prices and large pollutant emissions. At the same time, the wrong destination of Solid Urban Waste (USW) in the state of Amazonas is a problem that still exists. Given the above, this work aimed to analyze the feasibility of generating electricity from MSW in SISOL in Amazonas. For this, the economic analysis was carried out under the condition of certainty. In this analysis, the project proved to be economically unfeasible under current conditions. However, it is noteworthy that these conditions involve parameters that were significantly impacted by the Covid-19 pandemic, such as the sale price of electricity and the dollar rate. Therefore, a sensitivity analysis was carried out, in which three scenarios were evaluated, varying three parameters: electricity sales price, dollar exchange rate and taxes. Of the three scenarios, the scenario that simultaneously varied the three parameters presented an economic feasibility of the project in 49.5% of SISOL in Amazonas.

KEYWORDS: Isolated Systems. Pyrolysis. Amazons. Urban solid waste.

1. Introdução

No âmbito da energia elétrica, é denominado como Sistemas Isolados (SISOL), locais não conectados à rede nacional de transmissão, isto é, ao SIN (Sistema Interligado Nacional). Essa ausência de interligação se dá por razões técnicas ou econômicas. Dessa forma, a maior parte desses sistemas são supridos eletricamente por geração local, normalmente baseada em geradores de óleo diesel. (CCEE, 2017)

De acordo com a ONS (2019), existem, atualmente no Brasil, 235 SISOL, localizados principalmente na região norte, compreendendo os estados do Acre, Amazonas, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e a ilha de Fernando de Noronha que pertence ao estado de Pernambuco. A Figura I apresenta a distribuição geográfica dos SISOL, bem como a carga de energia total nesses sistemas, por estado, prevista para o ano de 2020.



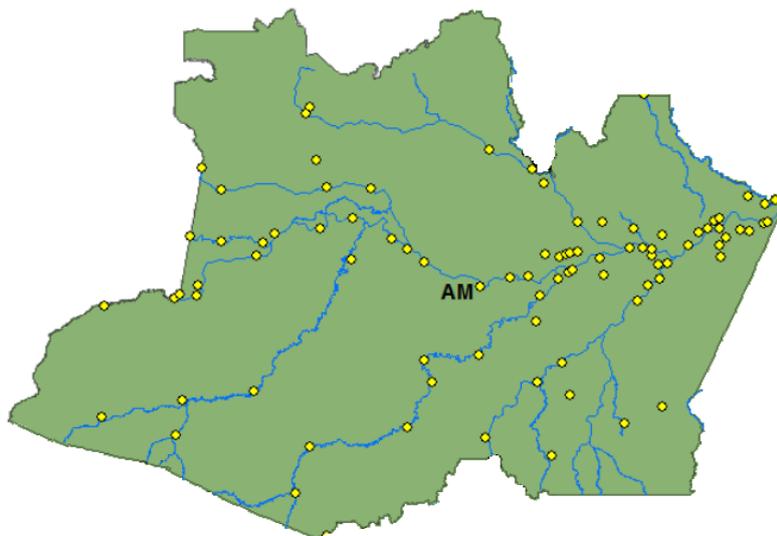
Fonte: ONS, 2019.

Observando a Figura I, é possível notar a concentração dos SISOL na região norte, com destaque para o Amazonas, que possui o maior número de sistemas (95) e conseqüentemente a maior carga de energia total prevista para 2020.

1.1. SISOL no estado do Amazonas

É válido notar a variedade dos 95 SISOL localizados no estado do Amazonas, visto que são desde pequenas localidades, como Carvoeiro, que possui uma demanda verificada de 58 kW em 2018, até cidades maiores como Itacoatiara, com uma demanda verificada de 31.680 kW (EPE, 2019). A Figura II apresenta a distribuição geográfica dos SISOL no estado do Amazonas.

Figura II - Distribuição Geográfica dos SISOL no estado do Amazonas



Fonte: EPE, 2019.

Percebe-se, através do mapa da Figura II, que a maioria das localidades estão situadas ao longo das calhas dos rios, que representam a principal via de transporte da região Norte. O suprimento de energia elétrica nesses SISOL depende de uma complexa logística de fornecimento de combustível, que muitas vezes sofre interrupções em épocas de estiagem, limitando o calado das embarcações. Além disso, em muitos casos, as localidades não dispõem de infraestrutura de porto e aeroporto apropriadas, assim como serviços de transporte e comunicação satisfatórios (FROTA, 2004).

No Amazonas, apesar de possuir SISOL supridos por gás natural (Anamá, Anori, Caapiranga e Codajás) e também uma localidade parcialmente suprida por biomassa de cavaco de madeira (Itacoatiara), os motores a diesel têm se mostrado como uma solução de fácil instalação, manutenção e operação. Ainda que apresente maiores impactos ambientais e uma complexa logística de fornecimento de combustível, com custos de operação bastante elevados. Como exemplo, enquanto nos leilões dos SIN a energia elétrica é comercializada a valores da ordem de R\$200/MWh, nos SISOL esse valor pode chegar a R\$1.600/MWh (PONTE, 2019).

O Ministério de Minas e Energia (MME), por meio do Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados - Horizonte 2024 (2019), realizou um levantamento e estimativa de carga e balanço de energia e de demanda de todos os SISOL, para os anos de 2019 a 2024. Nesse estudo é possível verificar as localidades que apresentarão déficit de energia, bem como o ano de início dessa carência. A Tabela I reúne as localidades com previsão de déficit no balanço de demanda em 2024, o ano de início do déficit, a previsão de interligação ao SIN e os tipos de combustível utilizados

Tabela I - SISOL do Amazonas com previsão de déficit no balanço de demanda

Localidade	Combustível Utilizado	Balanço de Demanda em 2024 (kW)	Ano de início do Déficit	Previsão de Interligação ao SIN
Anamã	Gás Natural	-3664	2021	-
Anori	Gás Natural	-4664	2024	-
Caapiranga	Gás Natural	-5668	2020	-
Caiambé	Óleo Diesel	-33	2023	-
Codajás	Gás Natural	-7414	2021	-
Humaitá	Óleo Diesel	-20100	2023	mar/2023
Itacoatiara	Óleo Diesel e Cavaco	-42290	2020	ago/2020
Itapiranga	Óleo Diesel	-2858	2021	dez/2020
Parintins	Óleo Diesel	-30958	2020	mar/2024
Rio Preto da Eva	Óleo Diesel	-10367	2021	dez/2021
Silves	Óleo Diesel	-1764	2021	dez/2020

Fonte: Adaptado de EPE, 2019.

Diante dessas diversas localidades com déficit energético, já é possível justificar a busca por novas alternativas energéticas para os SISOL. Essa busca por fontes alternativas de energia pode ainda ser corroborada quando analisada a as emissões de poluentes causada pela geração local de energia em SISOL.

1.2. Emissões de poluentes

Como dito a geração local de energia nos SISOL se dá, predominantemente, por meio de usinas termelétricas à óleo diesel. Esse tipo de geração levanta bastante questionamentos a respeito das emissões de gases poluentes (material particulado) e causadores do efeito estufa, o que se torna mais relevante em razão da localização dos SISOL, em meio a floresta amazônica (PONTE, 2019).

Diversos esforços vêm sendo realizados para conectar os SISOL ao SIN, buscando reduzir a necessidade de geração local e, conseqüentemente, as emissões. Entretanto, a grande extensão de redes elétricas requer um elevado custo de investimento, e em diversos casos, apresenta restrições técnicas e econômicas (RIBEIRO, 2012).

O MME também realizou um levantamento das quantidades estimadas de energia gerada e de dióxido de carbono (CO₂) emitidas, para o ano de 2020. A Tabela II apresenta a informação da emissão, em milhões de toneladas de CO₂ equivalente, na geração de energia estimada para 2020, por tipo de fonte de energia.

Tabela II. Quantidade de CO₂ emitida com a geração de energia nos SISOL em 2020

Fonte	Energia Gerada (MWh)	Consumo de Combustível	Emissões (MtCO ₂ eq/ano)
Óleo Diesel	4.228.396	1.175.494 m ³ /ano	2,764
Gás Natural	165.232	44.612.585 m ³ /ano	0,092
Biomassa	52.560	142.800 ton/ano	0,004
Fotovoltaica	6.555	-	0
PHC	54.844	-	0
Total	4.507.587	-	2,871

Fonte: EPE, 2019.

Utilizando os valores totais obtidos, de energia gerada (4.507.587 MWh) e emissões estimadas (2,781 MtCO₂ eq), estima-se que, no ano de 2020, ocorra uma taxa de emissão de 0,637 tCO₂ eq/MWh. Para efeitos de comparação, de acordo com o próprio MME, em 2017, o SIN apresentou um indicador de intensidade de emissões de 0,090 tCO₂ eq/MWh, isto é, mais do que sete vezes menor que o estimado para os SISOL no ano de 2020.

Diante disso, a utilização de fontes alternativas para a geração de energia local nos SISOL, é uma excelente alternativa não só para as localidades com déficit energético, mas como para as que possui sua matriz energética dependente do óleo diesel, que são a maioria.

2. Bases Teóricas

O tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) com recuperação energética, é algo positivo tanto por ser uma fonte alternativa de geração de energia local nos SISOL, quanto por ser uma forma de contornar a problemática de disposição final dos RSU no contexto nacional e local.

2.1. Conceitos básicos de RSU

Os RSU compreendem aqueles que são produzidos pelas inúmeras atividades desenvolvidas em áreas com aglomerações humanas. Abrange resíduos de diversas origens (residencial, comercial, agrícola etc.), sendo sua disposição final, normalmente responsabilidade do poder municipal (ZANTA; FERREIRA, 2003)

Esta definição dimensiona a complexidade do conceito e vem de encontro com as definições de outros trabalhos (IPT, 2000; MANCINI, 1999) no qual o termo RSU é empregado muitas vezes como sinônimo de lixo, e corresponde a qualquer material sólido proveniente das atividades diárias do homem em sociedade, cujo produtor ou proprietário não o considere como algo de valor suficiente para conservá-lo.

Os RSU podem ser classificados quanto à sua natureza física, quanto a sua composição química, quanto ao seu grau de degradabilidade, quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública (periculosidade), ou até mesmo em função da sua origem ou natureza.

Já com relação a caracterização dos RSU, consiste em determinar quanti e qualitativamente os seus aspectos físico-químico e biológicos. Permitindo assim, a verificação dos materiais presentes nos resíduos gerados, possibilitando inferir a respeito da viabilidade da implantação de coleta seletiva, os recursos humanos necessários, dimensões de instalações e destinação adequada para os resíduos (FERNANDO; LIMA, 2012).

Os RSU podem ser caracterizados pelas características biológica, químicas ou físicas. Dessa caracterização é relevante recortar das caracterizações apresentadas, os conceitos de:

- (i) Poder Calorífico: Determina a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor quando submetido à queima.
- (ii) Composição Gravimétrica: indica o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de resíduos analisada, permitindo analisar o seu poder calorífico total.
- (iii) Geração *per capita*: relaciona a quantidade de RSU gerada diariamente e o número de habitantes em uma determinada região.

2.2. Gestão Integrada e Gerenciamento de RSU

Antes de tudo, é necessário entender a diferença entre gestão integrada e gerenciamento de RSU. A primeira objetiva elaborar diretrizes de forma a disciplinar ações, considerando os diversos aspectos envolvidos (ambientais, culturais, econômicos, políticos, sociais etc.), de modo que as medidas adotadas sejam sustentáveis. Já o gerenciamento, são justamente as ações disciplinadas pela gestão integrada. Assim, o gerenciamento faz parte da gestão, podendo ser entendido como as etapas a serem realizadas (LOPEZ, 2007)

2.2.1. Gestão de RSU no Contexto Brasileiro

No Brasil, em 2010, foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que é uma Lei Federal (nº 12.305/10) que tem por objetivo a gestão integrada de RSU no Brasil. A PNRS contempla diversos tipos de resíduos (domiciliar, industrial, perigoso etc.), com exceção dos resíduos radioativos, que possuem uma legislação própria.

É importante destacar que para a execução da PNRS, é previsto a elaboração de Planos de Resíduos Sólidos para cada esfera administrativa do governo, isto é, planos nacionais, estaduais, regionais, intermunicipais e municipais. Uma característica do plano municipal, por exemplo, é que esse é um requisito necessário para os municípios terem acesso a recursos da União.

Os planos, basicamente, são documentos estratégicos que determinam, para uma área de abrangência, metas norteadas pelos objetivos da PNRS. Um dos objetivos principais da PNRS é reduzir a quantidade de RSU direcionada para aterros e lixões. Este objetivo fez-se com que fossem estipulados prazos (o primeiro até 2014) para que os municípios extinguissem os lixões. Ocorreram diversas prorrogações, e o objetivo total ainda não foi (e está longe de ser) alcançado.

2.2.2. Gestão de RSU no Contexto do Estado do Amazonas

O estado do Amazonas é o maior estado brasileiro em extensão territorial, essa dimensão associada a dinâmica de urbanização e crises na gestão pública, favorecem o descumprimento de normalizações, fiscalizações e implantação de sistemas eficazes para as questões ambientais (ARAÚJO; SCHOR, 2011).

O levantamento divulgado pelo Ministério do Meio Ambiente - MMA (2015), aponta que 96,8% dos municípios do estado do Amazonas possuem o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS). Apesar de aparentar uma informação favorável, vale lembrar que este plano é condição necessária para que os municípios tenham acessos a recursos da União, o que faz com que esses planos, muitas vezes, sejam feitos às pressas e dificilmente são cumpridos.

Corroborando com a ideia de que grande parte dos PMGIRS são apenas um documento existente, porém inaplicável, no mesmo levantamento divulgado pelo MMA em 2015, foram coletados dados a respeito da disposição final dos RSU de cada município. Dos municípios amazonenses, 90,3% descartam os RSU em lixões e o restante em aterros controlados. O que mostra uma total inconformidade com os objetivos da PNRS que deveriam nortear os planos municipais. É destacável que nenhum município possui um aterro com condições específicas para ser considerado como aterro sanitário.

Diante disso, é essencial a busca por alternativas que diminuam as destinações dos RSU para lixões (que já é algo teoricamente proibido) e também para os aterros (que é mais adequado para os rejeitos sem possibilidade de tratamento ou reaproveitamento).

2.3. Destinação dos RSU

O termo destino traduz-se principalmente em tratamento e disposição final dos RSU. De acordo com Abreu (2019), as principais formas de tratamento e disposição de RSU são: reciclagem, compostagem, aterro sanitário, biodigestão, incineração e pirólise.

2.3.1. Reciclagem

De acordo Lajolo (2003) e Teixeira (2000), a reciclagem é um processo que consiste num conjunto de operações interligadas, realizadas por diferentes agentes econômicos, no qual o material, após seu uso, retorna ao ciclo produtivo, que seja o de sua origem, ou em qualquer outro.

Essa reintrodução ao processo produtivo, além de recuperar e reduzir a quantidade de RSU, economiza, de modo significativo, a quantidade de energia gasta na produção industrial. Basicamente, consiste em algumas etapas, como a separação, coleta e triagem dos RSU de acordo com o tipo, classificação e prensagem. Posteriormente ocorre algum tipo de beneficiamento, e por fim, acontece a reciclagem propriamente, sendo o material reintroduzido no processo produtivo (CALDERONI, 2003; CUNHA, 2002; RENÓ et. al., 2002).

2.3.2. Compostagem

A compostagem é uma técnica de tratamento de RSU no qual a matéria orgânica, em condições adequadas de temperatura, umidade e areação, é transformada em um produto estável conhecido como composto orgânico, que possui propriedades condicionadores de solo, muito utilizada na agricultura.

No processo em si, os materiais orgânicos, presentes nos RSU, são separados dos materiais inertes (alumínio, vidro e plástico) e levados a locais apropriados (pátios de compostagem, silos ou tambores rotativos), onde serão submetidos a um processo de degradação controlada, visando a produção do composto (PAVAN, 2010).

A separação que ocorre no processo, auxilia na qualidade do composto. Diante disso, a compostagem depende de uma coleta seletiva, ocorrendo, geralmente, integrada a um processo de reciclagem. O composto formado é utilizado em segmentos de mercado como: agricultura, jardinagem, paisagismo, cobertura de solo e reflorestamento.

2.3.3. Aterro Sanitário

O aterro sanitário é uma técnica que consiste na disposição dos RSU no solo, baseado em critérios da engenharia e normas operacionais, garantindo a proteção tanto do ambiente quanto da saúde pública. Nesse processo, os RSU dispostos são compactados e cobertos com solo em formato de células diárias, formando camadas de resíduos. É fundamental a adoção de princípios de engenharia para tratamento e coleta dos líquidos percolados gerados, além de uma impermeabilização de fundo (MUTZ et al., 2017).

É importante diferenciar aterro sanitário de aterro controlado e lixão. Nos lixões, ou vazadouros, o RSU é descarregado sobre o solo, sem critérios técnicos e medidas de proteção ambiental ou à saúde pública, tornando-se local de geração de vetores de doenças e tendo seu lixiviado infiltrado no solo. Já nos aterros controlados, apesar de existirem medidas para minimização dos impactos, não é observada a impermeabilização de base, ocasionando muitas vezes também a infiltração do seu lixiviado (ROSA et al., 2017).

Integrado ao aterro sanitário, podem ser observados sistemas de coleta, queima e beneficiamento de biogás, sendo uma alternativa de aproveitamento energético a partir dos RSU.

2.3.4. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico, no qual a matéria orgânica é degradada e estabilizada, na ausência de ar, através da ação de microrganismo, resultando em um produto denominado biogás. O biogás é rico em energia, por possuir elevada percentagem de metano. O processo gera ainda, um efluente denominado biofertilizante, que é amplamente utilizado como condicionador de solo na agricultura (MAYER, 2016).

Por ser um processo focado na parte orgânica dos RSU, assim como na compostagem, a biodigestão ocorre de maneira integrada com a coleta seletiva. Vale lembrar também, que existem técnicas de captação do gás metano em aterros sanitários, porém apresentam uma eficiência de produção menor do que a produção nos biodigestores. O biogás produzido pode ser queimado diretamente ou utilizado como

combustível para motores de combustão interna e turbinas a gás na geração de energia (PEDROXA et al., 2017).

2.3.5. Incineração

A incineração é um processo que reduz o peso, toxicidade e volume dos RSU, através de uma combustão controlada a elevadas temperaturas. Como produtos do processo observam-se cinzas, água, escórias (como metais ferrosos, vidros e pedras) e gases, como CO_2 , SO_2 , N_2 , oxigênio do ar em excesso e gases inertes provenientes do ar e dos próprios RSU. Em casos de combustão incompleta (que não é o ideal), ainda podem ser observados monóxido de carbono, fuligem, dioxinas, furanos e dissociados de nitrogênio (LIMA, 1991).

Os incineradores requerem valores altos de investimento e custos de operação mais elevados que os demais métodos apresentados. Isso se deve ao fato de se tratar de unidades mais complexas, com alto grau de automatização, muitos dispositivos de controle e necessidade de uma mão-de-obra mais qualificada. Vale salientar que, geralmente, é realizado o aproveitamento da energia liberada na queima, para a geração de vapor e eletricidade.

2.3.5. Pirólise

A pirólise é um processo térmico de tratamento que promove a decomposição dos RSU em atmosfera ausente de oxigênio. Nesse processo os RSU são encaminhados para um reator, normalmente um forno sem a presença de oxigênio, onde são submetidos a elevadas temperaturas por um determinado tempo. O processo resulta em combustíveis de alta qualidade, que podem ser gasosos, líquidos e sólidos, a depender do objetivo da planta (ABREU et. al., 2019).

Ainda de acordo com Abreu (2019), os processos de pirólise, geralmente, contam com o tratamento dos efluentes gasosos e líquidos, gerando praticamente nenhum passivo ambiental. Assim como a incineração, a pirólise reduz significativamente a massa e o volume de RSU. Por ser uma tecnologia relativamente nova, é um método com poucos exemplares de implantação em grande escala operacional. Logicamente, os combustíveis gerados, a partir dos RSU, em um processo de pirólise, também podem e são utilizados para a geração de energia.

2.4. Tratamento de RSU com Recuperação Energética

Conforme Pedroxa (2017), as principais tecnologias de tratamento e destinação para a conversão de RSU em energia, mais especificamente em energia elétrica, são: a digestão anaeróbia, a incineração e a pirólise.

2.4.1. Digestão Anaeróbia com Recuperação Energética

Conforme Verma (2002), a digestão anaeróbia é uma consequência de diversas interações metabólicas entre vários grupos de microrganismos. O processo ocorre, basicamente, em três estágios: hidrólise, acidogênese e metanogênese. Primeiramente, um grupo de microrganismos segrega enzimas, hidrolisam materiais poliméricos a monômeros como a glucose e aminoácidos. Em seguida, outro grupo, converte os materiais formados em hidrogênio e ácido acético. E, por fim, outras bactérias são responsáveis por converter o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato em metano.

De acordo com Costa (2010), a digestão anaeróbia não se trata de uma tecnologia única, mas uma combinação de processos tecnológicos que visa o alcance do objetivo pretendido. Esses objetivos geralmente são: aumento da recuperação de materiais recicláveis, produção de biofertilizantes, produção de material estabilizado para aterro, produção de calor e energia elétrica e produção de combustível derivados de resíduos.

Como o sistema de tratamento por biodigestão é focado na fração orgânica dos RSU, percebe-se e ainda é reforçado pelo estudo da EPE (2008), que a reciclagem é uma alternativa que se compõe muito bem com a geração de energia elétrica a partir da digestão anaeróbia de RSU.

A digestão anaeróbia se dá de maneira natural em diversos ambiente, como: pântanos; sedimentos de rios, lagos e mares; minas de carvão; trato digestivo de animais e em aterros sanitário (AMARAL, 2004). Com isso, diversas tecnologias de captação de metano em aterros sanitários foram desenvolvidas e implementadas. Outra forma de utilização da digestão anaeróbia de RSU é realizá-la controladamente em reatores, conhecidos geralmente como biodigestores.

De acordo com diversos trabalhos (AMARAL, 2004; LEITE, 2016; SOUZA et al., 2012) o sistema mais apropriado para a digestão anaeróbia de RSU depende das características dos resíduos, da área disponível, dos recursos financeiros e operacionais, da importância da geração de energia para o sistema, da prevenção à poluição, e diversos outros fatores. Tudo isso, torna a digestão anaeróbia dos RSU em reatores mais atrativa do que a captação em aterros sanitários. Isso é devido a possibilidade de, nos reatores, potencializar a produção de biogás, ter um melhor controle operacional do processo, maior facilidade na captura do biogás e menor tempo de permanências quando comparados aos aterros

2.4.1.1. Modelos de Biodigestores

Os biodigestores, normalmente, são uma estrutura física com uma câmara onde ocorre o processo de degradação da matéria orgânica. Esta estrutura pode ser cilíndrica, vertical e superficial, podendo estar, ou não, acima do solo, acompanhada de uma campânula (também conhecida como gasômetro) onde se é acumulado o biogás formado (PINTO, 2008).

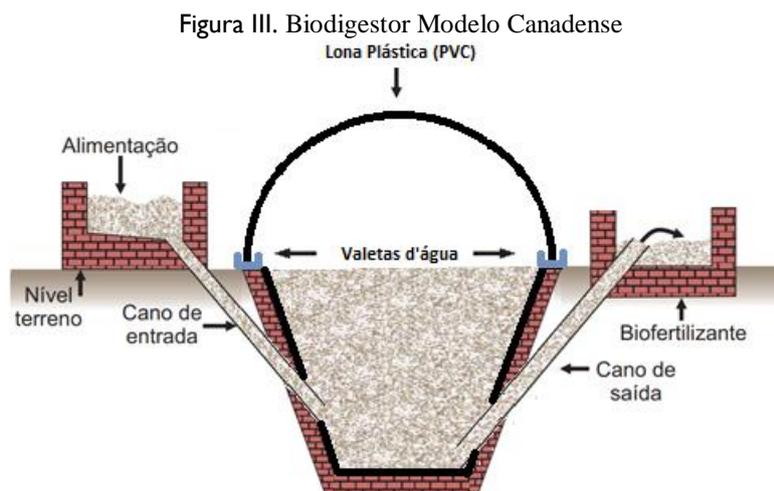
Frigo (2015) em seu artigo sobre modelos e aplicações de biodigestores, aprofunda os conhecimentos em diferentes modelos de biodigestores, como: modelo chinês, modelo indiano, modelo canadense e modelo batelada. Por poder ser utilizado em pequenos e grandes projetos, apresentar uma maior produção de biogás e ser o mais difundido no Brasil, o modelo considerado neste trabalho é o biodigestor do tipo canadense.

O biodigestor do modelo canadense é caracterizado por ser horizontal, apresentando uma câmara de fermentação em alvenaria com largura maior que a profundidade, o que promove uma maior área de exposição ao sol, aumentando a produção de biogás e até evitando entupimento (CASTANHO; ARRUDA, 2002).

Uma outra característica é a existência de uma manta superior fixada sobre uma valeta de água que circunda a base, formando uma campânula diferente de armazenamento, onde está situado também, o registro para saída do gás. A câmara de fermentação também é revestida com uma lona plástica (PEREIRA; DEMARCHI; BUDIÑO, 2009).

É necessário um local de instalação que proporcione o menor risco de ocorrência de furos na manta superior que venham causar vazamento do biogás. Esse tipo de biodigestor é o mais difundido no Brasil, além de poder ser utilizado em instalações tanto de pequeno quanto de grande porte (FRIGO et al., 2015).

A Figura III apresenta a configuração de um biodigestor do modelo canadense. É destacável a lona de PVC fixada sobre uma valeta de água circundante a base, formando o gasômetro do sistema. Bem como a câmara de fermentação também revestida por um material impermeabilizante.



Fonte: Adaptado de Perlingeiro, 2014.

2.4.1.2. Vantagens da Digestão Anaeróbia

Algumas das vantagens de um sistema de digestão anaeróbia, de modo geral, são: redução do volume e umidade dos RSU para destinação final, redução da quantidade de material orgânico dispostos em aterros, redução da formação de gases que geram o efeito estufa, geração de importantes insumos agrícolas, descentralização da geração de energia, promoção de uma gestão integrada dos RSU, dentre outras (LEITE, 2016).

2.4.1.3. Desvantagens da Digestão Anaeróbia

Como desvantagens da digestão anaeróbia pode ser citado, por exemplo, a formação de sulfetos pela redução dos sulfatos, o que acaba gerando o gás sulfídrico devido a não geração de metano da matéria oxidada. Esse gás tem odor desagradável e oxida componentes metálicos. Algumas outras desvantagens que são lembradas são: bioquímica e microbiologia do processo complexa, sensibilidade das bactérias a diversos compostos, possibilidade de demora da partida do processo, baixa remoção de fósforo e nitrogênio, dentre outras (MAYER, 2016).

2.5. Incineração com Recuperação Energética

A incineração pode ser definida como um processo de redução de peso e volume dos RSU através de uma combustão controlada (GRIPP, 1998). Menezes (2000) ainda complementa apresentando que o principal objetivo da incineração no passado era a redução de massa e volume, e atualmente são incorporados mecanismos de aproveitamento da energia térmica, através da energia no processo de combustão derivada do poder calorífico dos RSU.

Conforme Machado (2015), a incineração é o processo de tratamento térmico a alta temperatura mais difundido, com alto número de unidades em operação comercial pelo mundo. Isso é especialmente verdade em países com pequena disponibilidade de área para aterro, como Japão, Suíça e Suécia. Estimando-se uma redução entre 12 e 30 % da massa e 4 e 10% do volume dos resíduos originais.

Basicamente, os sistemas de incineração consistem em câmaras onde ocorre a combustão controlada dos RSU, apresentando como remanescentes gases, água, cinzas e escórias. E adicionalmente, algum mecanismo de aproveitamento energético, normalmente máquinas térmicas a vapor.

As máquinas térmicas a vapor utilizam a energia da combustão dos RSU para um fluido de trabalho, geralmente a água, gerando vapor e convertendo a alta energia do fluido em trabalho mecânico ou calor para processos secundários de aquecimento. Esse tipo de sistema vem sendo responsável por grande parte da energia elétrica produzida no mundo (HENRIQUES, 2004).

Esses de aproveitamento energético, geralmente, são constituídos por: caldeiras (onde é produzido e acumulado o vapor), turbinas (que convertem a energia termodinâmica em trabalho mecânico), geradores (para converter a energia mecânica em elétrica), condensadores (para retornar o vapor ao estado líquido), além de sistemas de bombeamento. Essas características são recorrentes nos diversos modelos de incineradores.

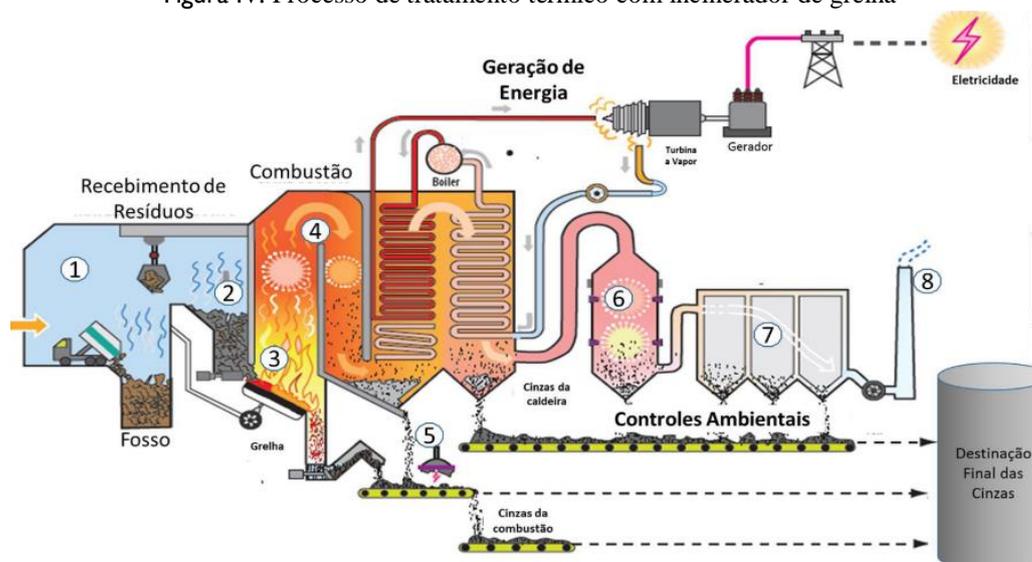
2.5.1. Modelos dos Sistemas de Incineração

Existem uma variedade de sistemas de incineração. Uma divisão que é geralmente aceita é a categorização em sistema de grelhas e de fornos. Os sistemas do tipo (i) grelha são adequados para resíduos grandes e irregulares, mantidos em uma grelha móvel ou estacionária, permitindo que o ar penetre pela grelha e passe pelos resíduos. Os incineradores do tipo forno são diversos e incluem os do tipo: Forno Rotativo, Câmara Fixas Múltiplas, Leito Fluidizado, Injeção Líquida e de Plasma.

Os incineradores do tipo grelha são os mais indicados para o tratamento de RSU, sendo inclusive os equipamentos mais empregados para incineração de RSU. Basicamente nesse modelo os RSU são queimados e grelhas metálicas que permitem a circulação do ar por baixo, por cima e pelo resíduo. Evidentemente, esse tipo de incinerador depende de os resíduos manterem-se sobre a grelha e não caírem no poço de cinzas antes de serem queimados. Os incineradores de grelha móvel são amplamente utilizados para resíduos municipais e raramente para resíduos de processo (LANÇA, 2008)

A Figura 4 apresenta o processo térmico, já com aproveitamento energético, utilizando um sistema de incineração do tipo grelha. Observa-se que os RSU são descarregados no fosso (1), de onde são encaminhados, através de garras, à moega (2). Os resíduos da moega alimentam o incinerador (3) do tipo grelha, que por sua vez fornece calor, através da combustão, para a caldeira (4). Na caldeira o vapor é produzido e conduzido ao sistema turbina-gerador, para a geração de energia elétrica. As cinzas restantes sobre a grelha passam por separadores eletromagnéticos (5). E os gases resultantes da combustão são encaminhados aos sistemas de tratamento (6 e 7) para remoção de poluentes, sendo posteriormente lançados, através da chaminé (8), ao ambiente.

Figura IV. Processo de tratamento térmico com incinerador de grelha



Fonte: Leite, 2016.

2.5.2. Vantagens da Incineração

De modo geral, uma das vantagens da incineração é a capacidade de reduzir consideravelmente o volume e massa dos RSU a serem dispostos em aterros. Alguns autores também consideram como

vantagem a não necessidade, em geral, de separação dos RSU. Geralmente, a incineração apresenta um rendimento energético maior que a digestão anaeróbia. E o processo de incinerar é mais vantajoso também, em relação à destruição de resíduos de serviços de saúde (LEITE, 2016).

2.5.3. Desvantagens da Incineração

A principal desvantagem que é levantada pela maioria das pessoas, são os efluentes do processo de incineração. Pois além dos produtos comuns a combustão, isto é, o vapor d'água e dióxido de carbono, são produzidos também outros poluentes, como as dioxinas e furanos, que são poluentes orgânicos persistentes, muitos sendo elementos tóxicos cancerígenos que se acumulam no tecido adiposo de mamíferos (IDEC, 2005).

No Brasil usinas de incineração vêm sendo desativadas, principalmente devido a precariedade das instalações, existindo controvérsias sobre os níveis aceitáveis de exposição as dioxinas, que na maioria dos casos contaminam por ingestão, mas também podem contaminar por inalação (CAIXETA, 2005).

Por fim, uma característica amplamente debatida é a questão de o processo de incineração concorrer com a alternativa de reciclagem. Visto que a incineração além de não necessitar de uma separação prévia, ainda é favorecida, energeticamente falando, com o poder calorífico de materiais como papel e plástico, que são componente que proporcionam o maior benefício na reciclagem.

2.6. Pirólise com Recuperação Energética

A pirólise consiste na decomposição da matéria orgânica aquecida na ausência total (ou parcial) de oxigênio atmosférico ou outro agente oxidante. Esse aquecimento é controlado por faixas de temperatura, fornecendo a energia necessária para o rompimento das macromoléculas presentes na biomassa dos resíduos (DINIZ, 2005).

Os processos de pirólise ocorrem através de reações químicas complexas, os quais dependem qualitativa e quantitativamente das condições reacionais, além das características próprias dos resíduos. Algumas das principais variáveis observadas em uma operação pirolítica são: taxa de aquecimento do reator, pressão no reator, temperatura de reação e tempo de residência tanto das fases sólidas quanto dos vapores (PEDROXA et al., 2017).

A pirólise possui como produtos principais a formação de carvão, bio-óleo e gás combustível. Esses produtos podem ser utilizados na geração de calor e eletricidade ou passar por processos de melhoramento para serem usados como combustível ou produtos químicos. Dependendo das condições do reator, a produção de um desses produtos pode ser maximizada, e são justamente essas condições que determinam os diferentes modelos e tipos de pirólise (MOTA et al., 2015)

2.6.1. Tipos de Pirólise

De acordo com Mota (2015), uma divisão bem aceita para os tipos de processos de pirólise, é a classificação em: Pirólise Lenta, Pirólise Rápida e Pirólise Ultrarrápida. A pirólise lenta é o tipo menos complexo e conseqüentemente com uma aplicabilidade mais possível, sendo a considerada neste trabalho.

A pirólise lenta, também conhecida como pirólise convencional e até mesmo carbonização, é caracterizada por taxas de aquecimento pequenas e uma faixa máxima de temperatura por volta de 600 a 800°C. Além de um tempo de permanência da biomassa no reator entre 5 e 30 minutos, ou até mesmo horas (MOTA et al., 2015)

O principal produto da pirólise lenta é o carvão, possuindo uma densidade energética bem maior que aquela do material original e queimas em temperaturas muito mais elevadas. Além disso, em menores quantidade, é produzido gás combustível, bio-óleo e ácido pirolenhoso (PEDROXA et al., 2017).

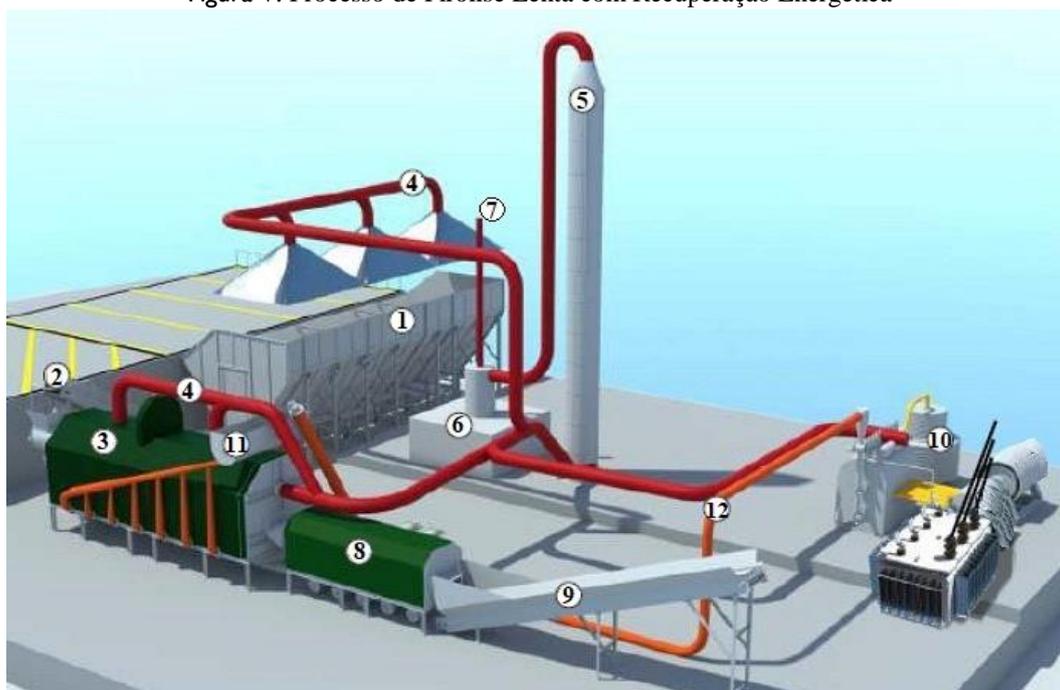
A Figura V apresenta um sistema de tratamento de RSU com recuperação energética, utilizando o processo de pirólise lenta. Basicamente os RSU alimentam a moega (1), sendo encaminhados por meio da esteira (2) até o forno de carbonização (3). No forno, os resíduos são aquecidos sem a presença de oxigênio, o que promove a decomposição da matéria orgânica sem a combustão.

Os gases formados são canalizados (4) até o destilador (5), onde são liquefeitos gerando o extrato pirolenhoso (um subproduto amplamente utilizado na indústria química e na agricultura). Após o destilador, os gases restantes ainda passam por um filtro (6) onde são separadas as partículas sólidas, liberando somente vapor de água pela chaminé (7).

Os RSU, transformados em carvão, seguem para o separador (8). No separador são retirados para reciclagem, através da esteira (9), os materiais não carbonizados, como alumínio, vidro, ferro, cobre etc. Parte do carvão (cerca de 10%) é utilizado como combustível para o forno e o restante é encaminhado para o sistema de turbina a vapor (10), para a geração de energia elétrica, através do motor, gerador e transformador.

Outro ponto interessante é o fato das cinzas, tanto do forno (11) quanto da caldeira (12), serem encaminhada para dentro do forno, fazendo parte do processo de decomposição. Além disso, os gases resultantes da queima do carvão, também tanto no forno quanto na caldeira, são canalizados e direcionados ao destilador e filtro. Isso faz com que, em teoria, a emissão desse sistema se resuma em vapor de água.

Figura V. Processo de Pirólise Lenta com Recuperação Energética



Fonte: Adaptado de Usitrar, 2017.

2.6.2. Vantagens da Pirólise

A utilização do processo de pirólise no tratamento de RSU apresenta vantagens como a redução significativa do volume dos RSU e também como a incineração, pode ser utilizado para a eliminação satisfatória de resíduos de serviços de saúde. Geração mínima de passivos ambientais. Possibilidade de geração de empregos diretos e mais seguros e saudáveis aos colaboradores. Utilização de um pequeno espaço para instalação do empreendimento (ABREU et. al., 2019).

2.6.3. Desvantagens da Pirólise

Por se tratar de uma tecnologia inovadora, existe ainda muita resistência quanto a implantação em grande escala operacional. Devido ao elevado risco de contaminação do ar, os custos de tratamento dos efluentes gasosos tendem a ser elevados. Além disso, geralmente, é necessária uma mão de obra mais qualificada, o que pode tornar o custo operacional e de manutenção mais alto que os demais (ABREU; HENKES, 2019; MONTEIRO et al., 2001).

3. Decisões Metodológicas

Neste capítulo as tecnologias de tratamento de RSU com recuperação energética são comparadas e ranqueadas com bases em diferentes parâmetros como: custos, receitas, emissões, logística e social. Diante do ranqueamento é possível selecionar a tecnologia mais adequada para os SISOL. A tecnologia selecionada neste capítulo, será utilizada na aplicação do estudo de caso, apresentada nos capítulos subsequentes.

3.1. Metodologia de Seleção

Foram utilizadas nesta seleção as tecnologias de geração de energia a partir de RSU apresentadas no capítulo 2: Digestão Anaeróbia, Incineração e Pirólise. Dentre os tipos de cada tecnologia, foram considerados os mais adequados para o tratamento de RSU em cidades de pequeno e médio porte, ou seja, os sistemas mais eficientes, porém com o menor custo e grau de complexidade possíveis, o que implica, geralmente, nos sistemas mais utilizados: biodigestores do tipo modelo canadense, incineradores do tipo grelha e pirólise lenta.

Com relação aos dados e informações, foram utilizados dados secundários obtidos em diversos trabalhos publicados. Por se tratar muitas vezes de temas com poucas informações, como é o caso da pirólise, e buscando realizar uma análise diversificada e mais próxima possível da realidade, foi utilizada, na maioria dos casos, a relação matemática da transitividade.

A relação da transitividade é a que se estabelece entre três (ou mais) elementos, de tal forma que se o primeiro tem relação com o segundo e este tem relação com um terceiro, então o primeiro possui relação com o terceiro. Um exemplo clássico é se existe as relações “ $A > B$ ” e “ $B > C$ ”, então existe também a relação “ $A > C$ ” (LIMA; NEVES, 2019).

Como muitos trabalhos apresentavam dados sobre as tecnologias, porém em ambientes diferentes (quantidade de RSU, composição gravimétrica etc.), era inviável comparar diretamente essas informações. Com isso, utilizou-se a relação de transitividade para a classificação das tecnologias.

Ilustrando a abordagem da relação de transitividade neste trabalho, observa-se como exemplo que alguns trabalhos comparavam digestão anaeróbia e incineração, enquanto outros abordavam incineração e pirólise, assim, foi possível estabelecer uma relação e conseqüentemente uma classificação das três tecnologias. Vale lembrar que foram utilizados variados estudos, o que diversifica os ambientes analisados, minimizando as características de tendência.

A PNRS estabelece que qualquer prática ou tecnologia de processamento de resíduo para ser licenciada, deve ser limpa e ambientalmente correta, ser economicamente viável e socialmente inclusiva (MEDEIROS; CASTRO, 2015). Diante disso, a seleção realizada neste capítulo, baseou-se em cinco diferentes parâmetros de análise: (i) Custos, (ii) Receitas, (iii) Emissões, (iv) Logística e (v) Social.

- (i) Custos: Este é um parâmetro quantitativo, e considera: custos de implantação (CAPEX) e custos operacionais (OPEX).
- (ii) Receitas: Basicamente, é soma das multiplicações entre quantidade de produtos gerados e suas estimativas de preço. Esse parâmetro é quantitativo, e considera: receita da energia elétrica e receita dos demais subprodutos.
- (iii) Emissões: Trata-se de um parâmetro quali e quantitativo, considerando: os tipos de poluentes emitidos e o peso das emissões em uma análise multicritério.
- (iv) Logística: É um parâmetro majoritariamente qualitativo, observando fatores como tamanho das instalações, destinação dos subprodutos, tempo de processamento, etc.
- (v) Social: Já é um parâmetro qualitativo, observando questões como concorrência com a reciclagem, aspectos da mão-de-obra, entre outras.

Em cada parâmetro de seleção, as tecnologias foram avaliadas e classificadas. Essa classificação, em forma de *ranking*, permitiu adotar uma pontuação para, através de uma análise quantitativa, determinar a tecnologia selecionada. Vale lembrar que, a PNRS não possui uma distinção clara da importância de cada parâmetro de análise, por esse motivo, todos receberam o mesmo peso nesta seleção.

3.2. Análise quanto aos Custos

Na análise quanto aos custos, foram levados em consideração tanto os custos de investimentos iniciais (CAPEX), quanto os custos operacionais (OPEX). Em cada caso, foram analisados diferentes trabalhos, realizadas as conversões de moedas necessárias e calculadas as médias dos custos. Por fim, foram somados o CAPEX e OPEX, e com base nesse resultado, as tecnologias foram ranqueadas no parâmetro “custos”.

3.2.1. Custos de Implantação (CAPEX)

Para determinação do CAPEX foram considerados os guias para tomadores de decisão de Mutz (2017) e do CNI (2019). O primeiro apresenta uma estimativa dos custos em Euros, enquanto o último reúne e resume diversos trabalhos, apresentando um panorama dos custos em Dólares. Na Tabela III estão reunidas as informações coletadas em ambos trabalhos, já convertidas e adaptadas para o formato de Dólares por Capacidade, isto é, US\$/toneladas ao ano, bem como a média dos valores.

Tabela III. CAPEX das tecnologias de tratamento de RSU com recuperação energética

Fonte	CAPEX (US\$/ton)		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
CNI, 2019.	334,00	723,50	574,00
Mutz et al., 2017.	172,80	378,00	432,00
Média	253,40	550,75	503,00

Fonte: Adaptado de Mutz (2017) e CNI (2019).

3.2.2. Custos Operacionais (OPEX)

Para a determinação do OPEX também foram utilizados os trabalhos de Mutz (2017) e do CNI (2019). O primeiro apresentava custos operacionais específicos, bem como o custo operacional total (valor que foi considerado no presente trabalho). Já no estudo do CNI (2019), de maneira análoga ao realizado no CAPEX, foram utilizados a média dos valores apresentados para cada informação. A Tabela IV reúne os dados de OPEX, em Dólares por ano, além da média destes.

Tabela IV. OPEX das tecnologias de tratamento de RSU com recuperação energética

Fonte	OPEX (US\$/ton/ano)		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
CNI, 2019.	100,50	118,50	45,00
Mutz et al., 2017.	30,24	87,48	81,00
Média	65,37	102,99	63,00

Fonte: Adaptado de Mutz (2017) e CNI (2019).

3.2.3. Custos Totais

Como os demais custos, como a tributação por exemplo, tendem a ser semelhantes ou imensuráveis previamente, o custo total considerado nesse trabalho é dado pela soma dos valores médios de CAPEX e OPEX obtidos para cada tecnologia. Esta informação é apresentada na Tabela V.

Tabela V. Custos totais médios das tecnologias de tratamento de RSU

Tipo de Custo	Custos (US\$/ton)		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
CAPEX	253,40	550,75	503,00
OPEX	65,37	102,99	63,00
Total	318,77	653,74	566,00

Fonte: Autor, 2021.

3.2.4. Ranqueamento com base no Custos

O ranqueamento parcial é realizado em cada parâmetro de análise, e servirá de suporte para o ranqueamento geral. Esta classificação com base nos custos, leva em consideração os custos totais médios obtidos, classificando-os do menor para o maior. A tecnologia melhor ranqueada obtém 3 pontos, enquanto a última colocada, 1 ponto. A tecnologia intermediária obtém 2 pontos. Esse padrão de pontuação é mantido nos demais parâmetros de análise. E os pontos são utilizados para uma análise quantitativa no ranqueamento geral. A Tabela VI apresenta o ranqueamento parcial, junto com as pontuações obtidas por cada tecnologia no parâmetro “custos”.

Tabela VI. Ranqueamento parcial das tecnologias com base no parâmetro "Custos"

Parâmetro: Custos	Ranqueamento Parcial		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Valor Considerado	318,77	653,74	566,00
Posição	1°	3°	2°
Pontuação	3 pontos	1 ponto	2 pontos

Fonte: Autor, 2021.

3.3. Análise quanto as Receitas

Na análise quanto as receitas, foram levadas em consideração a receita proveniente da venda de energia elétrica produzida com as tecnologias e as receitas com a venda de subprodutos. Foram utilizados trabalho que apresentavam uma comparação pareada das tecnologias, e através da propriedade transitiva das relações obtidas foi possível classificar parcialmente as tecnologias de tratamento.

3.3.1. Receitas Provenientes da Venda de Energia Elétrica

Para a determinação das relações das tecnologias no âmbito das receitas com a venda de energia elétrica produzida, foram utilizados os estudos de Bain & Company (2012) e de Medeiros e Castro (2015). O primeiro apresenta os valores, em reais por toneladas, referentes às tecnologias de digestão anaeróbia e incineração, utilizando para isso a eficiência energética de cada planta e um valor de venda de 150 R\$/MWh. O segundo estudo apresenta a eficiência energética das tecnologias de incineração e pirólise.

Utilizando o mesmo valor de venda do trabalho de Bain & Company (2012), pôde-se estimar as receitas a partir dos dados de Medeiros e Castro (2015). A Tabela VII reúne e apresenta os valores de receitas de ambos trabalhos.

Tabela VII. Receitas com a venda de energia elétrica produzida pelas tecnologias

Fonte	Receitas (R\$/ton)		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Bain & Company, 2012.	37,50	100,00	-
Medeiros e Castro, 2015.	-	81,6	85,65

Fonte: Adaptado de Bain & Company (2012) e Medeiros e Castro (2015).

3.3.2. Receitas Provenientes da Venda de Subprodutos

Ainda de acordo com Bain & Company (2012), a geração de energia elétrica é a única efetiva receita adicional do processo de incineração. Com relação a digestão anaeróbia, percebe-se que a receita com a geração de energia elétrica é muito inferior a incineração (<40%), com isso a receita com produtos não principais, como o biofertilizante, não alteraria a colocação da tecnologia.

A pirólise, por sua vez, que conforme Medeiros e Castro (2015), já apresentam uma receita principal maior que as demais, além de possuir subprodutos, como o extrato pirolenhoso, que mesmo com uma receita menos relevante, serve para destacar ainda mais a tecnologia das demais.

Diante disso, a receita proveniente da venda de subprodutos, em geral, não é capaz de alterar o cenário de classificação das tecnologias de acordo com a receita proveniente da venda de energia elétrica produzida.

3.3.3. Ranqueamento com Base nas Receitas

O ranqueamento parcial com base nos custos foi feito através da propriedade transitiva das relações apresentadas. Devido ao, em geral, menor impacto das receitas de subprodutos nas receitas totais, foram utilizadas, nesta análise, as relações entre as receitas provenientes da geração de energia elétrica. As tecnologias foram classificadas da maior para a menor receita. A Tabela VIII apresenta tanto as relações obtidas por cada fonte e a relação geral entre as tecnologias, quanto o posicionamento e pontuação no ranqueamento parcial.

Tabela VIII. Ranqueamento parcial das tecnologias com base no parâmetro "Receitas"

Parâmetro: Receitas	Ranqueamento Parcial		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Bain & Company, 2012.	Digestão Anaeróbia <	Incineração	-
Medeiros e Castro, 2015.	-	Incineração <	Pirólise
Relação Geral	Digestão Anaeróbia <	Incineração <	Pirólise
Posição	1°	3°	2°
Pontuação	3 pontos	1 ponto	2 pontos

Fonte: Autor, 2021.

3.4. Análise quanto as Emissões

Na análise quanto as emissões, foram consideradas os tipos de emissões de cada método de tratamento, além de uma análise multicritério utilizada para, também, uma hierarquização das tecnologias. Com base nesses dados quali e quantitativos pôde-se determinar o ranqueamento para o parâmetro "emissões".

3.4.1. Pesos na Análise Multicritério

Marchezetti (2009) realizou uma avaliação de alternativas tecnológicas para o tratamento de RSU, por meio de um método de análise multicritério denominado AHP (Processo Analítico Hierárquico). Nesse estudo, para cada tecnologia considerada, foram auferidos pesos a diversos critérios, dentre estes o critério de emissões de poluentes. Com isso, quanto menor o peso, maior a quantidade de poluentes emitidos. A Tabela IX apresenta os pesos de relevância do critério de emissão de poluentes, na escala do trabalho de Marchezetti, para as tecnologias estudadas no presente trabalho, além de uma relação geral referente a quantidade de poluentes emitidos por cada tecnologia.

Tabela IX. Pesos das emissões no estudo de hierarquização das tecnologias

Fonte	Peso das Emissões no Estudo de Hierarquização		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Marchezetti, 2009.	0,081	0,040	0,087
Relação Geral	(Digestão Anaeróbia <	Incineração) >	Pirólise

Fonte: Adaptado de Marchezetti, 2009.

3.4.2. Tipos de Emissões

O trabalho de Marchezetti (2009) ainda apresenta, como anexo, um levantamento dos tipos de poluentes emitidos por cada tecnologia. Nesse compilado é possível observar a grande diversidade de poluentes da incineração. E com relação as demais tecnologias, a digestão anaeróbia apresenta a emissão de metano e gases ácidos, fato que é mais impactante ao ambiente do que as emissões de inertes, como cinzas e escórias, da tecnologia de pirólise. A Tabela X apresenta as informações levantadas por Marchezetti, além da relação entre as tecnologias no âmbito dos tipos de poluentes emitidos.

Tabela X. Tipos de poluentes emitidos pelas tecnologias de tratamento de RSU

Fonte	Poluentes Emitidos		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Marchezetti, 2009.	Produz CH_4 e H_2S e outros gases.	CO_2 , SO_x , N_2 , CH_4 , H_2S dioxinas, furanos, cinzas, resíduos não queimados e outros gases.	Cinzas e escórias.
Relação Geral	(Digestão Anaeróbia <	Incineração) >	Pirólise

Fonte: Adaptado de Marchezetti, 2009.

3.4.2. Ranqueamento com base nas Emissões

O ranqueamento parcial com base nas emissões foi realizado por meio das relações definidas tanto pelos pesos na análise multicritério, quanto pelos tipos de poluentes emitidos. As relações nos dois critérios foram iguais, sendo também, a relação geral do parâmetro “emissões”. As tecnologias foram classificadas da de menor para a de maior quantidade e diversidade de poluentes emitidos. A Tabela XI aborda tanto as relações obtidas em cada critério e a relação geral, quanto o posicionamento e pontuação no ranqueamento parcial com base nas emissões.

Tabela XI. Ranqueamento parcial das tecnologias com base no parâmetro "Emissões"

Parâmetro: Emissões	Ranqueamento Parcial		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Pesos na Análise Multicritério	(Digestão Anaeróbia < Incineração) >	Pirólise	(Digestão
Tipos de Poluentes Emitidos	Anaeróbia < Incineração) >	Pirólise	
Relação Geral	(Digestão Anaeróbia < Incineração) >	Pirólise	
Posição	2º	3º	1º
Pontuação	2 pontos	1 ponto	3 pontos

Fonte: Autor, 2021.

3.5. Análise quanto a Logística

Na análise quanto a logística, foram considerados diversos fatores, como: (i) Tamanho da Instalação, (ii) Temperatura de Operação, (iii) Tempo de Operação, (iv) Redução de Volume, (v) Aplicabilidade Usual e (vi) Atividades Extras. Para cada critério, baseado nos argumentos apresentador, foi estipulado uma relação entre as tecnologias. Por meio dessas relações estipuladas, ao final, foi possível estabelecer uma relação geral e um consequente ranqueamento parcial para o parâmetro "Logística".

3.5.1. Tamanho da Instalação

De acordo Pedroxa (2017), um dos pontos positivos da tecnologia de pirólise, bem como da incineração, é a questão do pequeno espaço para a instalação do empreendimento. Essas usinas podem ter dimensões reduzidas, podendo ser instaladas em galpões relativamente pequenos no interior de áreas industriais.

Já as plantas de digestão anaeróbia, devida a eficiência energética e a necessidade de armazenamento de um maior volume durante a decomposição, no critério de tamanho das instalações, é, viavelmente, superada pelas tecnologias térmicas.

Entre a incineração e pirólise, por esta última apresentar geralmente uma quantidade maior de equipamentos devido aos tratamentos de gases e controle dos subprodutos, foi pior classificada no critério de tamanho da instalação, apesar de que ambas possuam dimensões próximas.

Dessa forma, no critério de tamanho da instalação, a incineração, por necessitar de um tamanho menor que as demais tecnologias, fica melhor classificada. Em seguida encontra-se a pirólise, com dimensões relativamente próximas as da incineração. E por fim, a digestão anaeróbia com necessidades maiores de espaço (Incineração, Pirólise e Digestão Anaeróbia).

3.5.2. Temperatura de Operação

Conforme Mota (2015), a pirólise lenta caracteriza-se por taxas de aquecimentos pequenas com faixa de temperatura em torno de 600°C. Marchezetti (2009) complementa que a incineração atua em uma faixa entre 750°C e 1200°C e a digestão anaeróbia entre 55°C e 60°C.

Diante disso, como quanto menor a temperatura de operação, menor também é a complexidade da tecnologia nesse critério. Assim, as tecnologias foram classificadas da de menor para a de maior temperatura de operação necessária. Com isso, a digestão anaeróbia é a melhor classificada, por possuir uma necessidade menor de elevação de temperatura, e é seguida, nessa ordem, pela pirólise e incineração (Digestão Anaeróbia, Pirólise e Incineração).

3.5.3. Tempo de Operação

A pirólise lenta (processo de pirólise considerado neste trabalho), geralmente, possui um processo de horas, enquanto a incineração costuma demorar minutos (DIP, 2004). A digestão anaeróbia, por sua vez, devido ao longo período para decomposição dos resíduos, normalmente tem o seu processo ocorrendo ao longo de dias.

Como quanto menor o tempo de operação, mais rápido é o retorno dos investimentos das tecnologias, estas foram classificadas da de menor para a de maior tempo de operação. Com isso, a incineração fica melhor classificada, por necessitar, geralmente, de apenas alguns minutos para poder processar uma determinada quantidade de RSU. Em seguida, encontra-se a pirólise e digestão anaeróbia, que levariam para processar a mesma quantidade de RSU, normalmente horas e dias, respectivamente (Incineração, Pirólise e Digestão Anaeróbia).

3.5.4. Redução de Volume

De acordo com o levantamento realizado por Marchezetti (2009), a incineração possui a capacidade de reduzir em até 99% do volume inicial de resíduos e a pirólise até 90%, enquanto a digestão anaeróbia diminui a matéria orgânica em até 60% do seu volume inicial.

Como a PNRS possui como um de seus objetivos a redução da quantidade de RSU destinados aos aterros sanitários, quanto maior for a redução de volume proporcionada pela tecnologia, melhor esta será classificada. Com isso, observa-se a incineração em primeiro, por reduzir até 99%, seguida pela pirólise, com reduções de até 90% e estando em último a digestão anaeróbia, com capacidades máximas de 60% de redução (Incineração, Pirólise e Digestão Anaeróbia).

3.5.5. Aplicabilidade Usual

As plantas de digestão anaeróbia são comumente utilizadas com mais frequência para o tratamento de dejetos animais em fazendas e não para o tratamento de RSU em áreas urbanas. E isso é justificado por motivos logísticos, pois nos ambientes rurais, a planta de operação se encontra mais próxima da sua fonte de matéria-prima limpa, o resíduo orgânico, e também está mais próximo do destino de seu subproduto, o biofertilizante. Vale lembrar que tanto a matéria-prima, quanto o subproduto, são materiais pesados e de baixo valor agregado, o que torna seu transporte mais custoso (BAIN & COMPANY, 2012).

Ainda de acordo com Bain & Company (2012), a pirólise é uma tecnologia ainda incipiente no mundo, com poucas plantas em operações, sendo estas normalmente em pequena escala. Além disso, há bastante incertezas nas estimativas de custos, visto o raro direcionamento para o tratamento de RSU.

Já a incineração possui certa relevância no contexto internacional, principalmente nos países desenvolvidos. É uma tecnologia comumente utilizada em locais densamente povoados e também em regiões com pouco espaço para aterros ou com uma legislação que dificulte a implantação destes (BAIN & COMPANY, 2012).

Como quanto maior a aplicabilidade usual, mais testada e validade é a tecnologia, estas foram então classificadas da mais usualmente aplicada para a de menor utilização. Com isso, a incineração é a melhor posicionada, por ser utilizada em diversos projetos de grande escala. Em seguida, encontra-se a digestão anaeróbia, que apesar de ser utilizada em pequenos projetos, é bastante validada no setor rural. E por fim, a pirólise, por se tratar ainda de uma tecnologia incipiente (Incineração, Digestão Anaeróbia e Pirólise).

3.5.6. Atividades Extras

Na digestão anaeróbia, além do investimento na planta de digestão propriamente dita, é necessário o investimento em uma planta de triagem, que fica responsável por separar e enviar somente os resíduos orgânicos para a planta de digestão. (BAIN & COMPANY, 2012). Com relação as tecnologias térmicas, observa-se que na incineração, o próprio calor do processo é utilizado no processo de geração de energia elétrica, enquanto na pirólise existe primeiro a formação de um combustível e posteriormente esse combustível é utilizado para a geração de energia elétrica.

Como quanto menor o número de atividade extras, geralmente, menos complexa se torna a tecnologia, estas foram classificadas da de menor para a de maior necessidade de atividades extras. Com isso, a melhor posicionada é a Incineração, por possuir inerente ao processo, o calor responsável pela geração de energia. Em seguida, encontra-se a pirólise, no qual necessita-se primeiramente gerar o combustível para depois obter o calor necessário. E por fim, a digestão anaeróbia, que além de tudo, necessita também de uma planta prévia de triagem (Incineração, Pirólise e Digestão Anaeróbia).

3.5.7. Ranqueamento com base na Logística

Para realizar o ranqueamento parcial do parâmetro “Logística”, primeiramente foi determinada a relação geral das tecnologias nesse parâmetro, utilizando para isso as classificações realizadas em cada critério. A Tabela XII reúne as classificações de cada critério e apresenta a relação geral obtida para o parâmetro “Logística”.

Tabela XII. Relação dos critérios do parâmetro "Logística"

Fonte	CAPEX (US\$/ton)		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Tamanho da Instalação	Incineração	Pirólise	D. Anaeróbia
Temperatura de Operação	D. Anaeróbia	Pirólise	Incineração
Tempo de Operação	Incineração	Pirólise	D. Anaeróbia
Redução de Volume	Incineração	Pirólise	D. Anaeróbia
Aplicabilidade Usual	Incineração	D. Anaeróbia	Pirólise
Atividades Extras	Incineração	Pirólise	D. Anaeróbia

Fonte: Autor, 2021.

A relação geral apresentada na Tabela XII, foi obtida através das classificações em cada critério. Isto é, como na maioria dos critérios, a incineração foi a melhor classificada, portanto, essa tecnologia ocupa a melhor classificação também na relação geral. O mesmo critério foi utilizado para a posição intermediária e para a tecnologia pior classificada.

Com base na relação geral da Tabela XII, pôde-se, finalmente, realizar o ranqueamento parcial com base no parâmetro “Logística”. Seguindo a mesma metodologia dos outros parâmetros, isto é, a tecnologia melhor classificada obtém 3 pontos, a em posição intermediária, 2 pontos, e por fim, a pior classificada, 1 ponto. A Tabela XIII apresenta o ranqueamento parcial com base no parâmetro “Logística”.

Tabela XIII. Ranqueamento parcial das tecnologias com base no parâmetro "Logística"

Parâmetro: Logística	Ranqueamento Parcial		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Relação Geral	Digestão Anaeróbia <	(Incineração >	Pirólise)
Posição	3°	1°	2°
Pontuação	1 ponto	3 pontos	2 pontos

Fonte: Autor, 2021.

3.6. Análise quanto o Social

Conforme Leite (2016), enquanto a digestão anaeróbia trabalha em conjunto com a coleta seletiva, as tecnologias térmicas concorrem pelo mesmo material valorizado pela reciclagem, por depender desses resíduos para uma maior eficiência. Entre a incineração e pirólise, pelo fato da primeira possuir sua receita relacionada com o poder calorífico dos resíduos, essa concorrência com a reciclagem é mais sensível.

Com relação a mão-de-obra, segue-se a mesma linha. A digestão anaeróbia possui uma maior quantidade de colaboradores, levando em consideração especialmente os catadores de materiais reciclados. E entre as tecnologias térmicas, ambas necessitam de uma mão-de-obra mais qualificada, sendo a pirólise, por possuir mais atividades no processo, uma maior recrutadora.

Com isso, as tecnologias foram classificadas da de maior para a de menor afinidade com coleta seletiva e inclusão de trabalhadores. A Tabela XIV apresenta a relação entre as tecnologias, bem como a classificação e pontuação dessas no parâmetro “Social”.

Tabela XIV. Ranqueamento parcial das tecnologias com base no parâmetro "Social"

Parâmetro: Social	Ranqueamento Parcial		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Leite, 2016.	Digestão Anaeróbia >	(Incineração <	Pirólise)
Posição	1°	3°	2°
Pontuação	3 pontos	1 ponto	2 pontos

Fonte: Autor, 2021.

3.7. Ranqueamento Geral e Seleção da Tecnologia

Realizados os ranqueamentos parciais, é possível, através do somatório das pontuações obtidas em cada parâmetro, determinar a pontuação geral das tecnologias. A Tabela XV apresenta as pontuações obtidas nos parâmetros analisados, além da pontuação total.

Tabela XV. Pontuações de cada tecnologia de tratamento de RSU

Critérios	Pontuação		
	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Custos	3	1	2
Receitas	1	2	3
Emissões	2	1	3
Logística	1	3	2
Social	3	1	2
Pontuação Total	10 pontos	8 pontos	12 pontos

Fonte: Autor, 2021.

Diante da pontuação total, pôde-se finalmente determinar a relação geral das tecnologias e o ranqueamento final, conseguindo assim selecionar a tecnologia utilizada no estudo de caso do presente trabalho. A Tabela XVI apresenta o ranqueamento final das tecnologias.

Tabela XVI. Ranqueamento final das tecnologias de tratamento de RSU

Ranqueamento Final			
Tecnologia	Digestão Anaeróbia	Incineração	Pirólise
Pontuação Considerada	10 pontos	8 pontos	12 pontos
Relação Geral	(Digestão Anaeróbia >	Incineração) <	Pirólise
Posição	3 pontos	1 ponto	2 pontos

Fonte: Autor, 2021.

Tendo em vista essa detalhada seleção, a tecnologia da Pirólise, mais especificamente o processo de pirólise lenta, é o tratamento de RSU com recuperação energética aplicado no estudo de caso deste trabalho.

As estimativas, avaliações e conclusões a respeito da implantação do tratamento de RSU nos SISOL do Amazonas, estão baseadas nesta tecnologia de decomposição da matéria, em elevadas temperaturas, na ausência de oxigênio e visando a transformação dos RSU em um combustível sólido utilizado para a geração de energia elétrica.

4. Resultados, Análises e Discussão

Selecionada a tecnologia da pirólise, pôde-se finalmente realizar a análise econômica na condição de certeza. Para isso, foram relacionados em um fluxo de caixa todos os investimentos, receitas e impostos, conseguindo-se com isso, determinar os indicadores de viabilidade econômica do projeto.

4.1. Investimentos

Os investimentos para o projeto incluem tanto os gastos com a implantação do empreendimento, bem como os gastos operacionais. Além disso, deve ser considerado também a depreciação dos equipamentos e edificações.

4.1.1. Gastos com a Implantação

Utilizando a proporção de valores conforme a capacidade da planta, adaptados de Lameu (2018), juntamente com o valor de planta comercializado pela empresa italiana *Maim Engineering*, estimou-se, em reais, os valores das plantas de pirólise de acordo com suas capacidades. Esses valores estão organizados na Tabela XVII.

Tabela XVII- Preços das plantas de pirólise de acordo com a capacidade

Capacidade (kg/h)	Valor (US\$)	Valor (R\$)
40	454.552,45	2.431.855,60
200	909.104,90	4.863.711,19
500	1.515.174,83	8.106.185,32
1000	2.424.279,72	12.969.896,52
2000	3.939.454,55	21.076.081,84
2500	4.545.524,48	24.318.555,97

Fonte: Adaptado de Lameu (2018).

Considerando a Resolução Consema 13/2012, esse tipo de empreendimento é enquadrado como de pequeno porte e de potencial poluidor grande, o que acarreta a necessidade, para seu licenciamento, do Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental – EIA/RIMA.

De acordo com Caibre (2016), o custo do estudo ambiental e dos demais documentos, bem como, as taxas de análise e vistoria do órgão ambiental estadual, representa cerca de 3% do valor da planta da pirólise na empresa fornecedora.

Levando em conta o mesmo estudo, a execução da construção civil, compreendendo a área impermeável para instalação da planta de pirólise, barracão, áreas de escritórios, dentre outros, possui um custo por volta de 15% do valor da planta.

Diante disso, a Tabela XVIII apresenta os gastos para a implementação do empreendimento de recuperação energética a partir de RSU, por meio da pirólise.

Tabela XVIII- Resumo dos gastos com a implantação do empreendimento

Investimentos	Valor
Unidade de pirólise (planta)	Valor da Tabela XVII
Projetos de engenharia e licenças ambientais	3% do valor da planta
Construção Civil	15% do valor da planta

Fonte: Autor, 2021.

4.1.2. Gastos Operacionais

Conforme Carta (2012), o custo dos insumos e despesas administrativas, que são indicados como custo operacional variável no fluxo de caixa do empreendimento, representa cerca 6,5% do capital investido na implantação.

Ainda de acordo com o estudo, o custo de manutenção, que é designado no fluxo de caixa como custo operacional fixo, é de aproximadamente 4,5% do capital investido na implantação do empreendimento.

Por fim, o custo de mão-de-obra, leva em consideração os salários dos funcionários, bem como os encargos sociais e trabalhistas. Os encargos sociais incluem as contribuições do tipo INSS (Instituto Nacional de Seguro Social), FGTS (Fundo de Garantia por Tempo de Serviço), dentre outros.

Já os encargos trabalhistas envolvem: 13º salário, férias, descanso semanal remunerado, licenças, auxílios, acidentes de trabalho, faltas legalmente abonadas, aviso prévio, etc.

De acordo com Caibre (2016), os salários juntamente dos encargos sociais e trabalhistas, representam aproximadamente o mesmo custo operacional fixo de manutenção, ou seja, 4,5% do capital investido na implantação do projeto.

Diante disso, a Tabela XIX apresenta o resumo dos gastos operacionais do empreendimento de recuperação energética a partir de RSU, por meio da pirólise.

Tabela XIX- Resumo dos gastos operacionais do empreendimento

Investimentos	Valor Anual
Insumos e Outras Despesas	6,5% do gasto com implantação
Manutenção	4,5% do gasto com implantação
Mão-de-obra	4,5% do gasto com implantação

Fonte: Autor, 2021.

4.1.2. Depreciação

Considerando a Instrução Normativa SRC nº162 de 31 de dezembro de 1998 da Secretaria da Receita Federal, que discorre sobre a vida útil de cada tipo de bem, e analisando as características dos equipamentos do empreendimento, determinou-se uma vida útil de 10 anos para os equipamentos e 25 anos para as edificações.

Diante dos valores gastos com equipamentos e edificações, juntamente da vida útil destes, foi possível determinar o valor anual da depreciação de cada item. Esses valores estão organizados na Tabela XX.

Tabela XX- Resumo dos gastos com a depreciação

Item	Gastos na Implantação	Vida Útil	Depreciação Anual
Equipamentos	Valor da Tabela 22	10 anos	10% do valor da Tabela XVII
Edificações	3% do valor da planta	25 anos	0,12% do valor da planta

Fonte: Autor, 2021.

4.2. Receitas

As receitas do empreendimento de recuperação energética a partir de RSU, por meio da pirólise, consideradas neste trabalho, são aquelas obtidas através da venda da energia elétrica gerada e da venda do subproduto biofertilizante.

4.2.1. Venda de Energia Elétrica

Foi considerado como o preço de venda, a média dos valores da venda de energia, na região norte, comercializada na bolsa eletrônica de venda de energia da CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, nos últimos 12 meses (segundo semestre de 2020 e primeiro semestre de 2021).

Nesse período, o preço da energia variou entre R\$55,57/MWh e R\$502,70/MWh. Essa grande oscilação ocorreu devido ao impacto nas negociações acarretados pela pandemia do Covid-19. No presente trabalho foi utilizado então, o preço médio do período que foi de R\$199,52/MWh.

Com relação a eficiência de geração da planta de pirólise, conforme Caibre (2016), é possível gerar 01 MW de energia para cada tonelada de RSU (considerando a matéria orgânica) processada.

4.2.2. Venda de Biofertilizante

Também no estudo de Caibre (2016), foi determinado o fator de rendimento de biofertilizante por tonelada de RSU (considerando a matéria orgânica), sendo esse fator igual a 12%. Isto é, aproximadamente 120kg de biofertilizantes são produzidos para cada tonelada de RSU processada. Com a relação ao preço de venda, o estudo estimou um valor médio de R\$125,00 por tonelada de fertilizante.

Dessa forma, as receitas do projeto, tanto pela venda de energia elétrica, quanto pela venda de biofertilizante, estão esquematizadas na Tabela XXI.

Tabela XXI- Resumo das receitas do empreendimento

Tipo de Receita	Eficiência	Preço
Venda de Energia	1t de RSU = 1MW	R\$199,52/MWh
Venda de Biofertilizante	1t de RSU = 120kg	R\$125,00/t

Fonte: Autor, 2021.

4.3. Impostos

São diversos os impostos que apresentam alíquotas incidentes sobre alguma das operações da planta de pirólise, tanto relacionados com a geração e venda energia elétrica, quanto com a produção e venda do biofertilizante. Algumas dessas alíquotas incidem em apenas uma das operações, outras em ambas.

São exemplos desses impostos: COFINS – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social; CSLL – Contribuição Social sobre o Lucro Líquido; ICMS – Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços; IPI- Imposto sobre Produtos Industrializados; IR – Imposto de Renda e PIS/PASEP – Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servido Público.

A Tabela XXII apresenta as alíquotas dos impostos incidentes sobre cada tipo de operação do empreendimento.

Tabela XIX- Resumo dos gastos operacionais do empreendimento

Impostos	Energia Elétrica	Biofertilizante
COFINS	7,60%	0,00%
CSLL	9,00%	9,00%
ICMS	25,00%	12,00%
IPI	0,00%	Não Tributável
PIS/PASEP	1,65%	0,00%
IR	15% + 10% adicional acima de R\$20.000,00/mês	

Fonte: Autor, 2021.

4.4. Análise Econômica

Para a análise econômica foi determinado o fluxo de caixa do empreendimento, de 2019 a 2024. O ano de 2019 foi considerado o ano implantação do projeto. Em 2024, foi arbitrada uma venda do empreendimento, pelo valor residual, levando em conta a depreciação no período considerado, sem correção de inflação.

Basicamente o fluxo de caixa segue a seguinte esquematização: Primeiramente é determinado a Receita Bruta (RB) anual, em seguida são subtraídos os impostos sobre a vendas de produtos (IPI, ICMS, PIS e COFINS) obtendo-se a Receita Líquida Anual (RLA).

Da RLA são subtraídos os custos operacionais e as depreciações, obtendo-se o denominado Lucro Líquido Tributável (LTV). Deste último são deduzidos o imposto de renda e da contribuição social, determinando assim o Lucro Real Anual (LRA) do empreendimento.

De posse desses fluxos de caixas anuais e dos gastos com a implantação do empreendimento, determinou-se o Valor Presente Líquido (VPL), que representa os valores dos fluxos de caixa anuais corrigidos para o ano zero, isto é, para o ano de implantação do empreendimento (2019). Esse dado é facilmente calculado pelo *Microsoft Excel*, através da função “VPL”.

Outra informação que foi determinada nos casos de VPL positivo, foi a Taxa Interna de Retorno (TIR), essa taxa refere-se à porcentagem de retorno sobre o capital investido na implantação do empreendimento. Essa informação também pode ser determinada através do *Microsoft Excel*, por meio da função “TIR”.

Dessa forma, o VPL permite avaliar se determinado empreendimento é economicamente viável, dada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Nesse estudo, foi considerada uma TMA de 6%, que é um valor geralmente utilizado como rendimentos de renda fixa.

Para um projeto ser considerado economicamente viável, é necessário que o VPL calculado seja positivo, isso porque sua TIR será maior que sua TMA. Já nos casos em que a TIR é menor que a TMA, o VPL calculado será negativo, indicando a inviabilidade econômica do projeto.

Dessa forma, construiu-se, para cada um dos SISOL, um fluxo financeiro, objetivando determinar o VPL do empreendimento naquela localidade e conseqüentemente a viabilidade econômica do projeto. Os VPLs dos SISOL amazonenses estão organizados no APÊNDICE A na categoria “Cenário Atual”. Nota-se que nas condições atuais levadas em consideração nesse trabalho, **NENHUM** dos SISOL amazonenses apresentou um VPL positivo para o projeto.

Porém, vale ressaltar que algumas dessas condições atuais sofreram os impactos da pandemia de Covid-19, como por exemplo o valor do Dólar e o preço de venda da energia elétrica. E algumas outras, podem ser ajustas através dos poderes políticos, como é o caso dos impostos.

Dessa forma, é relevantemente importante, a realização de uma análise de sensibilidade considerando esses parâmetros ajustáveis e reanalisando a viabilidade do projeto.

4.5. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade tem por objetivo avaliar o impacto econômico da variação de determinados parâmetros que foram utilizados na análise econômica na condição de certeza.

Nesse trabalho, o foco da análise econômica foram os parâmetros que sofreram grande impacto com a pandemia de Covid-19 ou que podem ser ajustados pelos poderes públicos.

Dessa forma, foram considerados três cenários, de tal maneira que a cada cenário, um parâmetro a mais era ajustado, partindo do mais facilmente alterado para o mais complexo. Além disso, foram observados os impactos da variação de cada parâmetro individualmente.

4.5.1. Cenário 01

No primeiro cenário, o parâmetro ajustado foi o preço de venda da energia elétrica. Isso porque, durante a pandemia, os preços de venda sofreram uma espécie de congelamento, o que alterou o valor médio utilizado como base de cálculo para o cenário atual.

Dessa forma, no Cenário 01, foi utilizado o maior preço de venda do período considerado, que foi de R\$502,70/MWh, conforme os dados apresentados pela CCEE.

Com o preço de venda da energia elétrica ajustado, foram novamente determinados os fluxos financeiros de cada SISOL. A Tabela XXIII, apresenta os VPLs corrigidos para os SISOL de Parintins e Vila Bitencourt.

Tabela XXIII- VPLs dos SISOL de Parintins e Vila Bitencourt para o Cenário 01

SISOL	Cenário Atual	Cenário 01
Parintins	-R\$72.167.063,92	-R\$57.31.302,52
Vila Bitencourt	-R\$4.723.407,95	-R\$4.696.094,01

Fonte: Autor, 2021.

Nota-se pela Tabela XXIII, que apesar da redução do prejuízo, o VPL se manteve negativo nas duas localidades de exemplo, indicando a inviabilidade econômica do projeto, nas condições do Cenário 01.

Percebe-se ainda, que como o SISOL de Parintins possui uma geração de RSU diária muito maior que o SISOL de Vila Bitencourt, a variação do VPL com a alteração do preço de venda da energia elétrica se mostrou, também, muito mais sensível.

Os valores ajustados de VPL, para todos os SISOL, estão organizados no APÊNDICE A, na categoria “Cenário 01”. E da mesma forma dos exemplos anteriores, **TODOS** os SISOL tiveram seus prejuízos reduzidos, porém permaneceram com o VPL negativo.

4.5.2. Cenário 02

No segundo cenário, o próximo parâmetro analisado foi o valor do dólar. Isso porque, o preço do dólar sofreu uma enorme variação com a pandemia do Covid-19, observou-se um aumento de mais de 29% somente em 2020 (INVESTING, 2021).

Além disso, a variação do preço do dólar tem um impacto significativo nos custos de implantação, visto que os valores das plantas da empresa italiana, *Maim Engineering*, estão em dólares.

Dessa forma, no Cenário 02, além da variação do preço de venda da energia elétrica, arbitrou-se uma redução de um terço do valor no valor do dólar. Visto que essa é uma redução plausível diante do aumento observado na cotação da moeda durante 2020 e 2021. Assim, a nova cotação utilizada foi de R\$3,53.

Os valores de VPL corrigidos conforme os parâmetros do Cenário 02, estão organizados na Tabela XXIV.

Tabela XXIV- VPLs dos SISOL de Parintins e Vila Bitencourt para o Cenário 02

SISOL	Cenário Atual	Cenário 02
Parintins	-R\$72.167.063,92	-R\$16.118.461,60
Vila Bitencourt	-R\$4.723.407,95	-R\$2.353.750,19

Fonte: Autor, 2021.

Observa-se pela Tabela XXIV, que a redução na cotação do dólar conseguiu reduzir ainda mais o prejuízo, porém, não o suficiente para tornar o projeto economicamente viável, visto que os VPLs se mantiveram negativos.

Esse padrão se repetiu, novamente, para **TODOS** os SISOL amazonenses. Os VPLs corrigidos conforme os parâmetros do Cenário 02, estão organizados também no APÊNDICE A, na categoria “Cenário 02”.

4.5.3. Cenário 03

No terceiro cenário foram avaliados os impactos dos impostos nos fluxos financeiros de cada SISOL. Isso porque, como já detalhado nesse trabalho, esse tipo de empreendimento possui uma alta incidência de alíquotas, que corroem os lucros e aumentam os prejuízos.

Por se tratar de um projeto com um viés sustentável, é plausível a consideração, por parte dos poderes públicos, da isenção de impostos sobre esse tipo de empreendimento. Funcionando exatamente com um incentivo fiscal do governo, para projetos ambientalmente sustentáveis.

Dessa forma, no Cenário 03, além das variações no preço de venda da energia elétrica e na cotação do dólar, foi considerado também, a isenção de imposto para o projeto.

Na Tabela XXV, estão organizados o VPLs corrigidos de acordo com os parâmetros do Cenário 03, para os exemplos de Parintins e Vila Bitencourt.

Tabela XXV- VPLs dos SISOL de Parintins e Vila Bitencourt para o Cenário 03

SISOL	Cenário Atual	Cenário 03
Parintins	-R\$72.167.063,92	+R\$864.061,60
Vila Bitencourt	-R\$4.723.407,95	-R\$2.206.594,79

Fonte: Autor, 2021.

Percebe-se pela Tabela XXV que, conforme os parâmetros do Cenário 03, o SISOL de Parintins apresentou um VPL positivo, atestando a viabilidade do projeto para esse cenário, além de demonstrar a importância dos incentivos fiscais para projetos ambientalmente sustentáveis.

O SISOL de Vila Bitencourt, porém, apesar da leve redução do prejuízo, permaneceu com o VPL negativo, atestando que a viabilidade do empreendimento tem forte influência da quantidade de RSU gerados pela localidade em questão.

Os valores de VPL corrigidos de acordo com os parâmetros do Cenário 03, para cada um dos SISO amazonenses, estão organizados no APÊNDICE A na categoria “Cenário 03”.

Analisando o APÊNDICE P observa-se que 47 SISOL, ou seja, quase metade (49,5%) das localidades, apresentaram um VPL positivo, quando ajustados os parâmetros de acordo com o terceiro cenário. Esses locais são justamente aqueles com a maior quantidade de RSU gerada diariamente.

Vale lembrar que este trabalho considerou um horizonte de cinco anos de atividade, e que quando considerado um tempo maior, como o tempo de vida útil das edificações, por exemplo, pode ser que seja observado um número ainda maior de localidades onde o projeto seja viável economicamente.

Outro ponto a mencionar, é que foram analisados também, além dos cenários anteriormente mencionados, a variação individual de cada um dos parâmetros ajustados. Porém, não se observou mudanças significativas capazes de alterar a viabilidade ou não do projeto.

5. Conclusão

Todo o desenvolvimento deste trabalho possibilitou diversas conclusões, além, é claro, da determinação da viabilidade ou não da geração de energia elétrica a partir de RSU nos SISOL amazonenses. Algumas destas conclusões são:

-Os SISOL, no âmbito da energia elétrica, enfrentam diversas problemáticas tais como: déficit energético, altos preços de energia e grandes emissões de poluentes. Esses problemas necessitam de resolução, mesmo que não seja a recuperação energética de RSU por meio da pirólise;

-Outra problemática, não só dos SISOL, mas como da maioria dos municípios amazonenses, é a errada destinação dos RSU, que vai na contramão dos objetivos da PNRS, além de ser um grande desperdício de um potencial energético;

-A seleção da tecnologia realizada nessa pesquisa, com base em parâmetros como: custos, receitas, logísticas emissões e parâmetros sociais, determinou a pirólise como a tecnologia mais adequada para o projeto. Isso corrobora com a ideia de que as tecnologias ainda incipientes são um fértil campo de estudo para trabalhos futuros;

-A alternativa de geração de energia elétrica a partir de RSU nos SISOL não se mostrou economicamente viável nas condições atuais. Porém, cabe ressaltar, que alguns parâmetros atuais sofreram um grande impacto com a pandemia do Covid-19, como é caso do preço de venda da energia elétrica e a cotação do dólar;

-A análise de sensibilidade realizada nessa pesquisa também mostrou que políticas de incentivos fiscais, para projetos ambientalmente sustentáveis, são essenciais para a viabilidade econômica de muitos empreendimentos, inclusive o projeto estudado neste trabalho;

-A análise de sensibilidade observou a alteração de três parâmetros (preço de venda da energia, cotação do dólar e isenção de impostos). No cenário em que os três parâmetros foram ajustados, obteve-se uma viabilidade econômica na implantação do projeto em 49,5% dos SISOL;

-Os SISOL que conseguiram apresentar uma viabilidade econômica na análise de sensibilidade, foram aqueles que possuem as maiores gerações diárias de RSU. Isso acontece, pois a maior quantidade de RSU, permite a geração de uma maior receita, capaz de suprir os altos custos de implantação do empreendimento;

-Por apresentar altos custos de implantação, uma alternativa que pode melhorar os índices de viabilidade econômica, é conseguir implementar a planta de pirólise a partir do fornecimento de empresas nacionais, que poderiam apresentar preços mais acessíveis.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

São possíveis diversos desdobramentos a partir da sequência lógica da pesquisa deste trabalho. Alguns desses desdobramentos que podem ser estudados e analisados por trabalhos futuros, são:

-Realizar as análises econômicas na condição de certeza, bem como a análise de sensibilidade, utilizando valores, que porventura sejam cedidos, de empresas nacionais;

-Avaliar projetos que integram os mais diferentes tipos de tecnologias de recuperação energética a partir de RSU;

-Analisar possibilidades de reduções de custos, ou aumento de receitas, nos empreendimentos estudados nessa pesquisa, visando aumentar os índices de viabilidade econômica;

-Investigar outras possíveis soluções para os problemas enfrentados pelos SISOL no âmbito energético.

Referências

ABREU, C. D.; HENKES, J. A. **Uma Análise Sobre O Tratamento De Resíduos Sólidos Urbanos: Proposta De Sistema Alternativo, Transformando Resíduos Só-Lidos Em Carvão E Energia**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 8, n. 1, p. 1015, 2019.

AMARAL, F. M. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2004.

ARAÚJO, M.; SCHOR, T. **Resíduos de serviço de saúde no estado do Amazonas: desafios para implantar sua gestão**. InterfaceHS - Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 3, n. 1, p. 1–22, 2011.

BAIN & COMPANY, B. **Estudo Econômico-Financeiro para destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos(RSU)**Belo HorizonteFundação Israel Pinheiro, , 2012.

CAIBRE, D. I. et al. **Análise da viabilidade econômica do processo de pirólise para tratamento de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso aplicado a uma cidade de médio porte**. Revista de Ciências Ambientais, v. 10, n. 2, 16 dez. 2016.

CAIXETA, D. M. **Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano: o caso de Campo Grande/MS**. Universidade de Brasília, 2005.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 4. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.

CARTA, R.; CRUCCU, M.; SANNA, F. **Pirolisi lenta, úmida e catalítica dela Pollina**, 2012.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada**Ponta GrossaVI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, , 2002.

CCEE, C. DE C. DE E. E. **Relatório orçamento das contas setoriais 2018 - CDE/RGR/CCCSão Paulo**, 2017.

CNI, C. N. DA I. **Recuperação Energética De Resíduos Sólidos. Um Guia Para Tomadores De Decisão**. Brasília: .

COSTA, J. P. F. DA. Tratamento mecânico e biológico de resíduos sólidos urbanos: avaliação do seu potencial para a recuperação de materiais recicláveis. Universidade Nova de Lisboa, 2010.

CRISPIM, M. DO C. F. N. Matriz de sustentabilidade e análise da percepção ambiental em relação aos resíduos sólidos domiciliares no sudoeste do Amazonas. Universidade Federal do Amazonas, 2019.

CUNHA, M. E. G. Análise do setor de saneamento ambiental no aproveitamento energético de resíduos: o caso do município de Campinas. UNICAMP, 2002.

DIAS, D. M. et al. Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais, 2012.

DINIZ, J. Conversão térmica de casca de arroz à baixa temperatura: produção de bio-óleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente. Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

DIP, T. M. Otimização de condições operacionais de processo visando a minimização da emissão de material particulado na incineração industrial de resíduos perigosos. São Paulo: Universidade de São Paulo, 6 out. 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Avaliação preliminar do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MSRio de Janeiro, 2008.

EPE, E. DE P. E. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2024 - Ciclo 2019Rio de JaneiroMinistério de Minas e Energia, , 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>

FERNANDO, A.; LIMA, S. DO C. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos do município de Maxixe-Moçambique. Caminhos de Geografia, v. 42, n. jun, p. 335–345, 2012.

FRIGO, K. D. D. A. et al. Biodigestores: Seus Modelos E Aplicações. Acta Iguazu, v. 4, n. 1, p. 57–65, 2015.

FROTA, W. M. Sistemas isolados de energia elétrica na Amazônia no novo contexto do setor elétrico brasileiro. Universidade Estadual de Campinas, 2004.

GRIPP, W. G. Aspectos técnicos e ambientais da incineração de resíduos sólidos urbanos: considerações sobre a proposta para São Paulo. Universidade de São Paulo, 1998.

HENRIQUES, R. M. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Knowledge Papers, 2012.

IDEC, I. B. D. D. D. C. Consumo sustentável: manual de educaçãoBrasíliaConsumers International, 2005.

INVESTING. Histórico da cotação do dólar. Disponível em: <<https://br.investing.com/currencies/usd-brl-historical-data>> Acesso em 17/07/2021.

IPT. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2000.

FREITAS, K. P. M. Geração de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos no Sistemas Isolados Amazonenses. Universidade Federal do Amazonas, 2021.

LAJOLO, R. D. Cooperativa de catadores de materiais recicláveis: guia para implantação IPT São Paulo, 2003.

LAMEU, G. H. P. Estudo sobre a implantação de uma planta de pirólise rápida em uma usina de açúcar e etanol. Centro Universitário Toledo, 2018.

LANÇA, R. O. Diagnóstico e avaliação do potencial energético dos resíduos gerados em uma indústria alimentícia. Universidade Estadual Paulista, 2008.

LEITE, C. B. Tratamento de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético: avaliação econômica entre as tecnologias de digestão anaeróbia e incineração. Universidade de São Paulo, 2016.

LIMA, B.; NEVES, G. Raciocínio Lógico-Quantitativo e Matemática para Receita Federal. 00. ed. Estratégia Concursos, 2019.

LIMA, L. M. Q. Tratamento de lixo. 2. ed. São Paulo: Hemus, 1991.

LOPEZ, A. A. Estudo da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê- Jacaré (UGRHI-13). Universidade de São Paulo, 2007.

MACHADO, C. F. Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/Sp. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

MANCINI, P. J. P. Uma Avaliação do sistema de coleta informal de resíduos sólidos recicláveis no município de São Carlos, SP. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1999.

MARCHEZETTI, A. L. Avaliação de alternativas tecnológicas para o tratamento de resíduos sólidos domiciliares pela aplicação do método AHP: Estudo de caso da região metropolitana de Curitiba. Universidade Federal do Paraná, 2009.

MARTINEZ, J.; ADHIKARI, K. B.; BARRINGT, S. Predicted growth of world food waste and methane production No Title, 2006.

MAYER, B. Caracterização e biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos gerados na central de abastecimento S.A. - Unidade Foz do Iguaçu. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

MEDEIROS, V. A.; CASTRO, D. E. Tecnologias de recuperação térmica e energética de resíduos sólidos. Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais - CEFET-MG, , 2015.

MELO, L. A.; SAUTTER, K. D.; JANISSEK, P. R. Estudo de cenários para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos de Curitiba, 2009.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENDES, M. A. Estágio Atual da Incineração no Brasil Curitiba VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, , 2000.

MONTEIRO, J. H. P. et al. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. 15. ed. Rio de Janeiro: .

MOTA, F. DE A. DA S. et al. **Pyrolysis of Lignocellulose Biomass: a Review**. Revista Geintec, v. 5, n. 4, p. 2511–2525, 2015.

MUTZ, D. et al. **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. Um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento**. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2017.

ONS, O. N. DO S. E. **Plano anual da operação energética dos sistemas isolados para 2020**Rio de Janeiro, 2019.

PAVAN, M. DE C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. Universidade de São Paulo, 2010.

PEDROXA, M. M. et al. Aproveitamento Energético De Resíduos Sólidos Urbanos Em Processo De Pirólise. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, 2017.

PEREIRA, E. R.; DEMARCHI, J. J. A.; BUDIÑO, F. E. L. **Biodigestores- Tecnologia para o manejo de efluentes da pecuária**, 2009.

PINTO, P. H. M. **Tratamento de Manipueira de Fecularia em Biodigestor Anaeróbio para Disposição em Corpo Receptor, Rede Pública ou uso em Fertirrigação**. Universidade Estadual Paulista, 2008.

PISANI JUNIOR, R.; CASTRO, M. C. A. A. DE; COSTA, A. Á. DA. Desenvolvimento de correlação para estimativa da taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: influências da população, renda per capita e consumo de energia elétrica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 415–424, 29 mar. 2018.

PONTE, G. P. DA. **Geração de energia elétrica em Sistemas Isolados: desafios e propostas para aumento da participação de fontes renováveis com base em uma análise multicritérios**. PUC-Rio, 2019.

PRSCS-RMM. **Plano de Resíduos Sólidos e Coleta Seletiva da Região Metropolitana de Manaus**, 2017.

RENÓ, F. A. G.; STREB, C. S.; PIUNT, R. C. **Conservação e produção de energia a partir de resíduos sólidos – alternativa para dois problemas: lixo e resíduos**. (IX Congresso Brasileiro de Energia – CBE, Ed.)Rio de Janeiro: IV Seminário Latino Americano de Energia., 2002

RIBEIRO, L. A. D. S. Making isolated renewable energy systems more reliable. *Renewable Energy*. v. 45, p. 221–231, 2012.

ROSA, B. P. et al. Impactos causados em cursos d'água por aterros controlados desativados no Município de São Paulo, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 7, p. 63–76, 2017.

SOARES, L. V. et al. **Taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte da mesorregião do sertão paraibano**, 2015.

SOUZA, J. et al. **Tratamento de resíduos urbanos, geração de energia e fertilizante: uma perspectiva para a região do Vale dos Sinos**CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, , 2012.

TEIXEIRA, E. N. Resíduos sólidos: minimização e reaproveitamento energético. **Seminário Nacional Sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais**, p. 29–31, 2000.

USITRAR. **Indústria de carbonização , processamento de resíduos e geração de energia**S&S Negócios Imobiliários, , 2017.

VERMA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes**, 2002.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos. In: **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. v. 1p. 1–18.

Apêndice A – VPLs dos SISOL de acordo com cada cenário

Utilizando os parâmetros tanto do cenário atual, quanto dos cenários determinados na análise de sensibilidade, foram calculados os Valores Presentes Líquidos (VPL) dos SISOL amazonenses. Essa determinação foi realizada através da função “VPL” do *Microsoft Excel*, utilizando uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 6%.

Do ponto de vista da análise econômica, é considerado viável os projetos que apresentam VPL positivo, pois sua Taxa Interna de Retorno (TIR) é maior que a TMA. E logicamente, os que apresentam VPL negativo, são considerados economicamente inviáveis.

Na Tabela XXVI, estão organizados os VPLs, em reais (R\$) calculados para cada um do SISOL amazonenses, em cada um dos cenários avaliados nesse trabalho.

Tabela XXVI- VPLs dos SISOL Amazonenses de acordo com os Cenários Propostos

SISOL	Cenário Atual	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
Alvarães	-4.762.705,19	-4.177.811,57	-1.530.333,91	80.543,89
Amaturá	-805.892,92	-706.923,62	-258.946,38	-215.788,65
Anamá	-3.066.719,43	-2.690.104,76	-985.386,36	51.862,44
Anori	-17.654.493,69	-15.486.397,97	-5.672.673,25	298.561,75
Apuí	-20.391.728,36	-17.887.481,02	-6.552.190,85	344.852,15
Araras	-6.514.439,14	-5.714.420,30	-2.093.194,25	-1.744.328,54
Augusto Montenegro	-6.893.294,50	-6.046.749,56	-2.214.926,58	-1.845.772,15
Autazes	-26.370.745,71	-23.132.233,08	-8.473.345,45	445.965,55
Auxiliadora	-6.888.624,00	-6.042.652,63	-2.213.425,87	-1.844.521,56
Axinim	-7.463.728,27	-6.547.130,06	-2.398.216,14	-1.998.513,45
Barcelos	-20.769.932,99	-18.219.239,47	-6.673.714,09	351.248,11
Barreirinha	-19.995.156,81	-17.539.611,23	-6.424.766,02	338.145,58
Belém do Solimões	-3.549.710,15	-3.113.780,83	-1.140.579,06	-950.482,55
Belo Monte	-7.475.003,52	-6.557.020,63	-2.401.839,06	-2.001.532,55
Benjamin Constant	-28.298.188,12	-24.822.972,04	-9.092.663,75	478.561,25
Beruri	-12.719.276,79	-11.157.260,34	-4.086.908,55	215.100,45
Betânia	-2.392.359,78	-2.098.561,21	-768.703,74	-640.586,45
Boa Vista do Ramos	-14.340.308,86	-12.579.218,30	-4.607.772,27	242.514,33
Boca do Acre	-26.171.032,19	-22.957.045,78	-8.409.174,28	442.588,12
Borba	-26.708.482,90	-23.428.493,77	-8.581.865,85	451.677,15
Caapiranga	-375.563,80	-329.441,93	-120.674,70	-100.562,25
Caburi	-4.220.902,14	-3.702.545,73	-1.356.243,86	-1.130.203,22
Caiambé	-4.247.151,80	-3.725.571,75	-1.364.678,30	-1.137.231,91
Camaruã	-4.840.156,29	-4.245.751,13	-1.555.220,20	-1.296.016,83
Campinas	-4.763.019,23	-4.178.087,04	-1.530.434,81	-1.275.362,34

Canutama	-8.903.094,32	-7.809.731,86	-2.860.707,64	150.563,56
Carauari	-12.793.263,51	-11.222.160,97	-4.110.681,67	216.351,67
Careiro	-15.164.749,25	-13.302.411,62	-4.872.678,25	256.456,75
Carvoeiro	-4.812.080,03	-4.221.122,83	-1.546.198,84	-1.288.499,03
Castanho	-26.052.239,20	-22.852.841,41	-8.371.004,18	440.579,17
Coari	-46.681.986,82	-40.949.111,25	-14.999.674,45	789.456,55
Codajás	-334.680,37	-293.579,27	-107.538,20	-89.615,16
Cucuí	-6.933.202,75	-6.081.756,80	-2.227.749,74	-1.856.458,12
Eirunepé	-20.427.449,88	-17.918.815,69	-6.563.668,75	345.456,25
Envira	-14.494.886,48	-12.714.812,70	-4.657.440,55	245.128,45
Estirão do Equador	-7.415.292,98	-6.504.642,96	-2.382.653,10	-1.985.544,25
Feijoa	-3.679.499,72	-3.227.631,33	-1.182.282,54	-985.235,45
Fonte Boa	-14.271.888,64	-12.519.200,56	-4.585.787,75	241.357,25
Guajará	-14.505.772,05	-12.724.361,45	-4.660.938,26	245.312,54
Humaitá	-40.479.745,16	-35.508.548,38	-13.006.794,28	684.568,12
Iauaretê	-5.025.273,92	-4.408.135,02	-1.614.701,47	-1.345.584,56
Ipiranga	-7.489.167,52	-6.569.445,19	-2.406.390,18	-2.005.325,15
Ipixuna	-374.410,54	-328.430,30	-120.304,14	-100.253,45
Itacoatiara	-50.005.057,98	-43.864.085,95	-16.067.430,75	845.654,25
Itamarati	-3.186.116,43	-2.794.838,97	-1.023.750,54	-853.125,45
Itapiranga	-1.692.260,43	-1.484.438,97	-543.750,54	-453.125,45
Japurá	-576.362,43	-505.581,08	-185.194,54	-154.328,78
Juruá	-14.612.992,20	-12.818.414,21	-4.695.389,82	247.125,78
Jutaí	-353.228,08	-309.849,19	-113.497,87	-94.581,56
Lábrea	-25.762.647,88	-22.598.813,93	-8.277.953,82	435.681,78
Limoeiro	-314.179,50	-275.596,06	-100.950,94	-84.125,78
Manaquiri	-24.592.764,83	-21.572.600,73	-7.902.051,55	415.897,45
Manicoré	-35.379.292,13	-31.034.466,78	-11.367.936,55	598.312,45
Maraã	-7.365.923,56	-6.461.336,45	-2.366.789,91	124.567,89
Maués	-32.135.695,89	-28.189.206,92	-10.325.716,82	543.458,78
Moura	-7.463.851,51	-6.547.238,17	-2.398.255,74	-1.998.546,45
Murituba	-6.672.095,85	-5.852.715,65	-2.143.851,89	-1.786.543,24
Nhamundá	-10.978.259,20	-9.630.051,93	-3.527.491,55	185.657,45
Nova Olinda do Norte	-26.109.832,56	-22.903.361,89	-8.389.509,85	441.553,15
Novo Airão	-14.497.843,07	-12.717.406,20	-4.658.390,55	245.178,45
Novo Aripuanã	-14.527.420,80	-12.743.351,58	-4.667.894,35	245.678,65
Novo Céu	-4.651.914,08	-4.080.626,39	-1.494.734,94	-1.245.612,45
Novo Remanso	-3.721.366,53	-3.264.356,60	-1.195.735,02	-996.445,85
Palmeiras do Javari	-7.515.805,73	-6.592.812,05	-2.414.949,47	-2.012.457,89
Parauá	-3.315.233,39	-2.908.099,47	-1.065.237,90	-887.698,25
Parintins	-72.167.063,92	-57.031.302,52	-16.417.170,42	864.061,60
Pauini	-7.385.312,28	-6.478.344,11	-2.373.019,82	124.895,78
Pedras	-6.968.051,80	-6.112.326,14	-2.238.947,30	-1.865.789,42
Rio Preto da Eva	-17.642.216,15	-15.475.628,20	-5.668.728,28	298.354,12
Sacambu	-5.841.776,62	-5.124.365,46	-1.877.056,94	-1.564.214,12
Santa Isabel do Rio Negro	-11.025.250,65	-9.671.272,50	-3.542.590,66	186.452,14
Santa Rita	-6.963.289,50	-6.108.148,68	-2.237.417,10	-1.864.514,25
Santana	-7.014.930,35	-6.153.447,67	-2.254.010,14	-1.878.341,78
Santo Antônio do Içá	-315.809,15	-277.025,57	-101.474,57	-84.562,14
Santo Antônio do Matupí	-1.685.535,99	-1.478.540,34	-541.589,87	-451.324,89
São Gabriel da Cachoeira	-34.677.918,02	-30.419.226,34	-11.142.573,75	586.451,25
São Paulo de Olivença	-15.282.916,46	-13.406.067,07	-4.910.647,28	258.455,12
São Sebastião do Uatumã	-5.821.597,85	-5.106.664,78	-1.870.573,18	98.451,22
Silves	-568.955,08	-499.083,40	-182.814,43	-152.345,36
Sucunduri	-58.967.923,31	-51.726.248,52	-18.947.343,78	-15.789.453,15
Tabatinga	-40.652.278,15	-35.659.893,11	-13.062.231,91	687.485,89
Tapauá	-6.058.170,58	-5.314.184,72	-1.946.587,81	102.451,99
Tefé	-40.729.365,32	-35.727.513,44	-13.087.001,26	688.789,54
Tonantins	-8.611.851,87	-7.554.256,03	-2.767.126,75	145.638,25
Tuiué	-6.927.709,58	-6.076.938,23	-2.225.984,70	-1.854.987,25

Uarini	-7.441.337,89	-6.527.489,38	-2.391.021,75	125.843,25
Urucará	-11.796.057,91	-10.347.419,22	-3.790.263,45	199.487,55
Urucurituba	-11.817.143,72	-10.365.915,54	-3.797.038,66	199.844,14
Vila Alterosa	-6.667.534,54	-5.848.714,51	-2.142.386,27	-1.785.321,89
Vila Amazônia	-4.310.643,91	-3.781.266,59	-1.385.079,34	-1.154.232,78
Vila Bitencourt	-4.723.407,95	-4.696.094,01	-2.353.750,19	-2.206.594,79
Vila Caviana	-6.544.853,71	-5.741.099,75	-2.102.966,94	-1.752.472,45
Vila do Itapuru	-3.829.308,98	-3.359.042,96	-1.230.418,67	-1.025.348,89
Vila do Lindóia	-3.868.300,71	-3.393.246,24	-1.242.947,34	-1.035.789,45
Vila Urucurituba	-6.561.367,47	-5.755.585,50	-2.108.273,08	-1.756.894,23

Fonte: Autor, 2021.

Recebido em: 23/08/2021

Aceito em: 27/03/2023

Endereço para correspondência

Nome: Ketson Patrick de Medeiros Freitas

E-mail: ketsonpatrick@gmail.com



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)