

1. INTRODUÇÃO

O tema da gestão dos resíduos sólidos vem sendo abordado intensamente nas literaturas científica, tecnológica e gerencial em quase todas as regiões do mundo. O fator estimulante da produção literária, decorre do fato de que o aumento da população mundial implica, necessariamente, em geração significativa deste tipo de resíduos. Segundo a Organização das Nações Unidas-ONU a população mundial era, em 2015, 7,3 bilhões, com projeção de duplicação para 2050. Em 2018 a quantidade de lixo produzido pela população mundial foi de aproximados 1,4 bilhão de toneladas, resultando em uma média de 1,2 kg per capita diária (Eosconsultores, 2018).

No Brasil, segundo a ABREPE, em 2018 foram geradas 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, com coleta de 92%, ou 72,7 milhões. A destinação adequada em aterros sanitários foi de apenas 59,5% dos resíduos coletados (43,3 milhões de toneladas). O restante (40,5%) foi despejado em locais inadequados em 3.001 municípios. Assim, 29,5 milhões de toneladas de RSU acabaram indo para lixões ou aterros controlados, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente (ABRELPE, 2019).

A matriz energética brasileira é reconhecida pelas suas fontes de geração renovável, com destaque para as usinas hidrelétricas, de biomassa e mais recentemente as usinas eólicas. Em se tratando de geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos (RSU), ainda apresenta participação relativamente pequena (menos de 0,07%), considerando-se a elevada quantidade de resíduos produzidos diariamente no país. Em estudo realizado pela EPE (2014), estimou que o potencial de geração de energia a partir de RSU utilizando as tecnologias de aproveitamento de gás de aterro, digestão anaeróbia acelerada e incineração, era de 311MW, 868MW e 3.176MW, respectivamente (Dalmo, Simão, Nebra, & Santana, 2018).

Este estudo tem como objetivo desenvolver um modelo de dinâmica de sistemas que simule a cadeia completa dos resíduos sólidos urbanos, considerando toda a dinâmica populacional envolvida em sua correta separação, destinação e reaproveitamento em processos industriais para a geração de energia elétrica, que poderia ser implementada e destinada às próprias cidades geradoras do RSU. Especificamente, pretende-se: 1) Pesquisar, entender e discorrer sobre os processos de gestão de resíduos sólidos urbanos dentro e fora do Brasil a fim de se identificar as melhores práticas e casos de sucesso; 2) Adaptar modelos de Dinâmica de Sistemas já propostos, incluindo etapas de geração de vapor e energia elétrica; e, 3) Realizar simulações e análises de viabilidade econômico-financeira da implantação de usinas de geração de energia elétrica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), através da lei 12305/2010, classifica como *geradores de resíduos sólidos* todas as pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluindo o consumo. A lei define uma série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final, como sendo o *ciclo de vida de um produto*, que após este estágio passa a ser considerado como resíduo sólido. Segundo a NBR 10004/2004, *resíduo sólido* é todo o resíduo no estado sólido ou semissólido, que resultam das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluem-se nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu

lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Segundo Maranhó (2008), a partir da sua origem, é possível se estabelecer a caracterização dos resíduos sólidos, onde os diferentes tipos de lixo podem ser agrupados como: resíduo doméstico (ou residencial); resíduo comercial; resíduo público; entulhos de obras; resíduo industrial; resíduo radioativo; resíduo agrícola e resíduo de serviços de saúde. De acordo com Waskow (2015), a gestão de resíduos sólidos no Brasil e no mundo exige, para fins de planejamento das principais estratégias e ações a serem tomadas, o conhecimento de sua composição gravimétrica. O resultado desta caracterização é importante por inúmeras razões, incluindo a necessidade de estimativa da quantidade de materiais passíveis de serem reciclados, identificação das propriedades físicas, químicas e térmicas dos resíduos.

Waskow (2015) aborda uma metodologia de caracterização da composição dos RSU's onde existem três categorias: bens de consumo duráveis, bens de consumo não duráveis e recipientes e embalagens. São classificados como bens de consumo duráveis produtos com um tempo de vida de três anos ou mais, bens de consumo não duráveis são aqueles com tempo de vida de menos de três anos.

De acordo com Jucá et al. (2014), as políticas públicas tratam da “coordenação dos meios à disposição do Estado, harmonizando as atividades estatais e privadas para a realização de objetivos socialmente (ou economicamente) relevantes e politicamente determinados”.

2.2 Políticas Públicas no Exterior e no Brasil

Observando-se os aspectos técnicos gerais, a legislação internacional relativa a RSU parece caminhar para os mesmos objetivos, baseando-se na implantação de estímulos seletivos que inibem tanto a capacidade de geração, quanto o mau gerenciamento do volume gerado dos resíduos sólidos (Juca et al., 2014). O modelo aplicado pelos Estados Unidos é baseado no funcionamento de uma agência reguladora regida por legislação federal, a Environmental Protection Agency (EPA). Já a União Europeia (UE) é ancorada em “diretivas” que, apesar de compulsórias, têm a sua implementação e sanção institucionalizada em cada país membro. O Japão, por sua vez, tem uma legislação federal que aplica uma regra a todos os municípios (Juca et al., 2014). Para esse autor, os principais marcos legais da política pública nacional, na área de RSU, são a Lei de Consórcios Públicos, a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essas legislações são integradas e complementares para a gestão dos RSU, constituindo a base do sistema jurídico-ambiental brasileiro, no âmbito federal, voltado para a regulamentação da gestão de RSU.

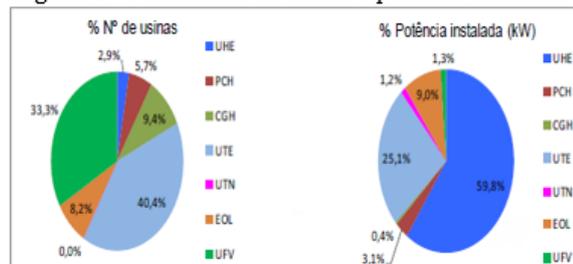
De acordo com o Boletim de informações Gerenciais da ANEEL (2019), a matriz Energética Brasileira, no que diz respeito à Geração de Energia Elétrica, é composta pelos empreendimentos listados na Tabela 1, juntamente com seus potenciais de geração (Figura 1) e sua participação no montante total do país:

Tabela 1 - Empreendimentos em operação no Brasil

Tipo	Quantidade	% do total	Potência Instalada (kW)
Usina Hidrelétrica de Energia - UHE	217	2,9	98.581.478
Pequena Central Hidrelétrica - PCH	426	5,7	5.183.756
Central Geradora Hidrelétrica - CGH	698	9,4	708.002
Central Geradora Undielétrica - CGU	1	0,0	50
Usina Termelétrica de Energia - UTE	3001	40,4	41.337.216
Usina Term nuclear - UTN	2	0,0	1.990.000
Central Geradora Eolielétrica - EOL	606	8,2	14.872.793
Central Geradora Solar Fotovoltaica - UFV	2469	33,3	2.074.002
Total	7420	100	164.747.297

Fonte: ANEEL, 2019

Figura 1 - Percentuais de usinas e potência instalada



Fonte: ANEEL, 2019

2.3 Tratamento dos resíduos sólidos

As principais alternativas para o tratamento de resíduos sólidos são: a reutilização, a recuperação, a reciclagem, a compostagem, incineração e a disposição final no aterro sanitário (Fugii, 2019). Neste sentido, segundo Caldas (2019), uma das formas mais eficazes de minimizar os impactos da atividade humana no meio ambiente é por meio da inovação no tratamento de resíduos, por exemplo, gerando energia (elétrica e calor) e produtos com valor econômico, quebrando a linearidade do modelo tradicional na forma do conceito conhecido como economia circular. Como consequência destas ações, poderíamos constatar uma redução significativa na necessidade de construção de aterros sanitários e lixões.

O quantitativo de UTE's instalado corresponde a 25,1% da potência total no país. Apesar de serem as mais poluentes, é onde se concentram as unidades de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. Analisando mais de perto o montante das UTEs, é possível observar as unidades que utilizam algum tipo de resíduo no processo. Assim, destaca-se os quantitativos de usinas que utilizam resíduos como: bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, gás de alto forno, lenha, licor negro, resíduos florestais, biogás, resíduos animais e resíduos sólidos urbanos. Observa-se que mesmo com todos os incentivos e preocupações quanto à destinação e reaproveitamento do RSU, a aplicação destes no processo de geração de energia no Brasil ainda é muito incipiente, conforme ainda a ANEEL (2019).

Carneiro (2015) apresenta o processo de incineração, conforme descrito a seguir. Neste processo, o material é coletado na mesma forma em que chega à usina de incineração (resíduo bruto). Depois de pesado, é descarregado em um fosso (bunker), que dependendo da configuração da usina, tem capacidade de armazenamento de até uma semana. Nele, o material é inicialmente revolvido por garras suspensas em pontes rolantes para homogeneização da carga. O fosso é necessário, porque o poder calorífico dos RSU é variável e, como a geração de energia deve ser constante, ele permite o armazenamento do RSU e a regulação da mistura dos resíduos antes da combustão. Em seguida, a garra suspensa carrega o silo de alimentação de onde o material é descarregado, por meio de êmbolos hidráulicos, para dentro da câmara de combustão do incinerador. A grelha inclinada do tipo basculante desloca o resíduo através da câmara de combustão, provocando o seu revolvimento e a sua exposição às regiões de alta temperatura. Neste deslocamento, o material vai se aquecendo e passa por secagem, perda de compostos orgânicos voláteis, combustão do resíduo carbonoso, e sai da câmara de combustão ao fim da grelha, com uma pequena quantidade de material orgânico na forma de carvão. Este tipo de grelha pode operar com materiais com granulometrias bastante variadas, o que o torna bastante adequado à incineração de RSM em estado bruto.

Cerca de 60% do ar de combustão é introduzido por baixo da grelha, normalmente preaquecido, com a função de resfriá-la e auxiliar na secagem e combustão do RSU. O ar introduzido por sobre a grelha é injetado em alta velocidade para criar uma região de elevada turbulência e promover a sua mistura com os gases e vapores combustíveis gerados na decomposição térmica do RSU. A temperatura na região sobre a grelha atinge os 1200 °C, decompondo a maioria dos compostos orgânicos a CO₂ e água. Os gases de combustão a alta temperatura ao saírem desta região, trocam calor com as paredes do incinerador e trocadores de calor, gerando vapor que é utilizado para gerar energia elétrica ou para fins de aquecimento. Na combustão do RSU, além de gás carbônico e água, também podem se formar gases extremamente corrosivos como: ácido clorídrico, cloro, ácido fluorídrico, etc. Desta forma, as tubulações metálicas próximas às grelhas são geralmente revestidas com material refratário. As temperaturas de superaquecimento de vapor têm de se limitar a 420 °C. Temperaturas maiores podem ser atingidas, exigindo o revestimento dos superaquecedores com ligas metálicas resistentes aos gases ácidos. Na saída desta região, os gases se encontram aquecidos, a cerca de

400 °C, e normalmente passam por mais uma seção de troca de calor, aquecendo o ar de combustão. Os gases de combustão então resfriados a cerca de 250 °C, são enviados para os sistemas de tratamento de gases para remoção de material particulado, gases ácidos, dioxinas e furanos e metais pesados eventualmente presentes. Ao fim da grelha, a fração orgânica do RSU deve estar quase totalmente consumida, restando uma fração inorgânica denominada cinza de fundo. Estas cinzas são apagadas em um tanque de água e depois de desaguadas, são enviadas para disposição final em aterros (Carneiro, 2015).

2.4 Dinâmica de Sistemas

De acordo com Fugii (2019), a dinâmica de sistemas encontra suas principais aplicações em ambientes complexos e mal definidos, em que as decisões dos seres humanos são guiadas pela lógica. Um modelo de Dinâmica de Sistemas baseia-se no modo de referência e nas relações causa-efeito formuladas a partir de uma situação em estudo. Alguns dos principais softwares utilizados para desenvolvimento de modelos de dinâmica de sistemas são Matlab (Simulink), Vensim, Anylogic, etc. Para a etapa de modelagem do sistema, ou o objeto deste estudo, o software a utilizado é o Vensim® PLE, devido à sua simplicidade e facilidade de desenvolvimento e testes dos modelos de dinâmica de sistemas. Para o desenvolvimento deste trabalho está sendo considerado como referência o modelo de DS desenvolvido por Araújo (2018), simulando todo o processo de gestão dos RSU's para a cidade de Belo Horizonte, o qual foi proposto por RONG 2004, conforme Figura 2 abaixo.

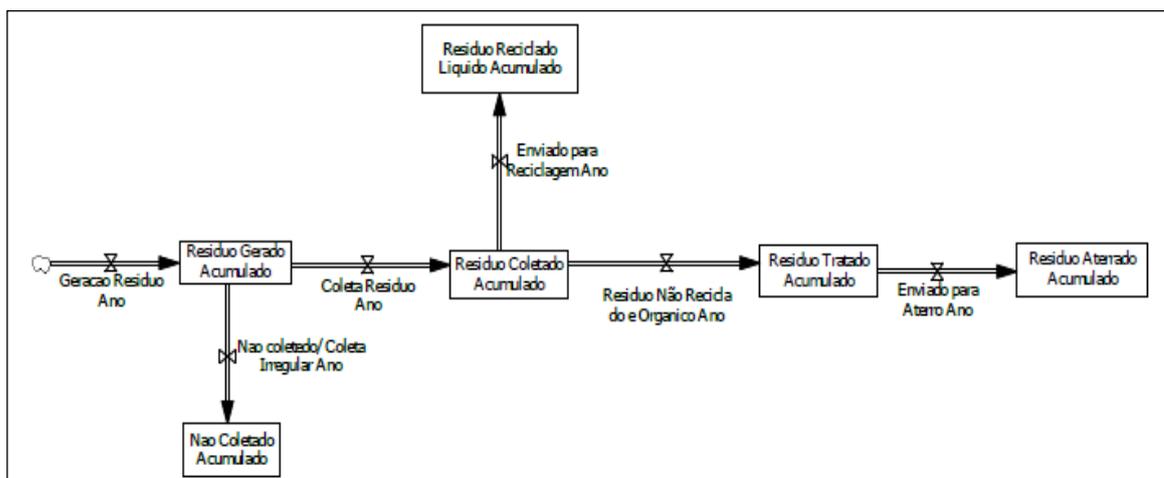


Figura 2-Fluxo de RSU, Fonte: RONG, (2004).

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização do locus e dos indicadores da pesquisa

A região selecionada para este estudo é a cidade de Belo Horizonte – MG, que de acordo com números divulgados pelo IBGE (2020), possui uma população estimada de 2.521.564 habitantes, área de unidade territorial de 331,354 km², densidade demográfica (senso de 2010) de 7167,0 habitantes por km² e um PIB per capita de R\$ 35.245,02. De acordo com Araújo (2018), em 2017, 96% dos resíduos municipais de residências, instituições e estabelecimentos comerciais foram coletados por caminhões compactadores. A geração média dos resíduos domiciliares e comerciais foi de 2.313 toneladas por dia, equivalendo a um montante aproximado de 844.245 toneladas por ano e uma geração per capita de RSU igual a 0,916 kg/habitante/dia. A Tabela 2 apresenta a evolução dos principais componentes dos resíduos

sólidos domiciliares de Belo Horizonte, a partir das pesquisas de caracterização, da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos de Macaúbas, no período de 2010 a 2014 (Araújo, 2018).

Tabela 2 - Composição gravimétrica do RSU Belo Horizonte (2010 a 2014)

Ano	Matéria orgânica	Plástico	Papel/Papelão	Vidros	Metais	Têxtil	Madeira	Pedra/Cerâmica	Diversos
2010	47,37%	14,52%	19,37%	2,89%	1,83%	2,56%	0,45%	0,46%	10,55%
2011	50,14%	10,95%	21,14%	1,64%	1,06%	3,76%	0,28%	0,55%	10,50%
2012	52,13%	11,45%	19,91%	1,95%	1,21%	2,83%	0,25%	0,41%	9,86%
2013	51,14%	12,67%	17,45%	1,93%	2,10%	4,38%	0,69%	0,40%	9,60%
2014	43,05%	12,35%	15,66%	3,14%	3,23%	2,07%	0,25%	1,48%	18,78%

Fonte: Araújo, (2018)

A metodologia desenvolvida utilizou dados disponibilizados pela Fundação João Pinheiro (FJP), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PBH), estudos acadêmicos prévios sobre o assunto incluindo dissertações, teses e pesquisas de mercado que trazem uma visão sistêmica dos processos de reaproveitamento dos RSU's para a geração de energia. Para geração de RSU do município, foram coletados dados totais da coleta dos resíduos domiciliares e públicos (Tabela 3), assim como as taxas de reciclagem e envio dos resíduos para tratamento. Os dados estão estruturados conforme coleta e sua normalização, considerando a janela de tempo entre os anos 2000 e 2017 na Tabela 4.

Tabela 3 – Série histórica geração de resíduos de Belo Horizonte (2000 a 2017)

Ano	Total RSU gerado (ton/ano)	Resíduos per capita (kg/hab/dia)
2000	666.096	0,810
2001	704.796	0,848
2002	714.690	0,851
2003	671.493	0,791
2004	646.216	0,753
2005	647.955	0,748
2006	701.997	0,802
2007	721.784	0,820
2008	778.143	0,876
2009	1.016.908	1,136
2010	903.505	1,042
2011	956.345	1,099
2012	815.437	0,932
2013	929.277	1,027
2014	837.319	0,921
2015	815.463	0,893
2016	817.689	0,891
2017	844.316	0,917

Fonte: Araújo (2018)

Tabela 4 – Evolução da população e do PIB de Belo Horizonte (2000 a 2017)

Ano	População estimada	PIB a preços correntes (R\$ 1.000)	PIB per capita (R\$ 1,00)
2000	2.252.595	16.060.535.184	7.130
2001	2.276.761	17.047.615.014	7.488
2002	2.301.177	19.703.419.791	8.562
2003	2.325.900	21.565.533.130	9.272
2004	2.350.564	27.195.182.264	11.570
2005	2.375.329	28.386.693.877	11.951
2006	2.399.920	32.725.360.676	13.636

2007	2.412.937	38.209.472.798	15.835
2008	2.434.642	42.255.582.791	17.313
2009	2.452.617	44.595.204.906	18.183
2010	2.375.151	51.661.760.194	21.748
2011	2.385.640	54.996.326.053	23.053
2012	2.395.785	74.279.149.067	31.004
2013	2.479.165	81.426.708.267	32.844
2014	2.491.109	87.656.760.157	35.188
2015	2.502.557	87.364.598.168	34.910
2016	2.513.451	88.277.462.531	35.122
2017	2.523.794	88.951.167.805	35.243

Fonte: Araújo (2018)

Poder Calorífico Inferior (PCI) do RSU e gás natural

O Poder calorífico inferior do RSU da cidade de Belo Horizonte considera a Tabela 5 para a obtenção dos valores individuais. Alguns dos componentes do RSU de Belo Horizonte não foram considerados no cálculo do PCI (Vidros, Metais, Pedra/Cerâmica e Diversos) por serem considerados inertes e não contribuírem para a estimativa do PCI do RSU.

Tabela 5 - Cálculo de PCI total do lixo de BH

Componentes	% Médio - SLU	PCI (Kcal/kg)	Contribuição PCI (Kcal/kg)
Matéria orgânica	48,77%	1311	639,32
Plástico	12,39%	6301	780,57
Papel/papelão	18,71%	4033	754,41
Vidros	2,31%	0	0,00
Metais	1,89%	0	0,00
Têxtil	3,12%	3478	108,51
Madeira	0,38%	2520	9,68
Pedra/Cerâmica	0,59%	0	0,00
Diversos	11,86%	0	0,00
PCI Total			2292,49

Fonte: Maranhó (2008)

3.2 Modelagem dos sistemas

A metodologia que será adotada para o projeto de pesquisa consiste na aplicação de técnicas de dinâmica de sistemas (DS), com o objetivo de tentar reproduzir o comportamento dos processos que vão desde a dinâmica populacional da cidade de Belo Horizonte, passando pela geração de resíduos sólidos urbanos e suas destinações, com foco especial na inclusão de uma usina de incineração dos RSU para a geração de energia elétrica. O modelo é calibrado e validado, tomando-se como base os dados reais do município a fim de se identificar a eficiência do modelo na previsão de alguns cenários futuros em caso de adoção deste tipo de processo na geração de energia limpa. O software escolhido para o desenvolvimento e simulação dos modelos é o software Vensim® PLE da empresa Ventana Systems.

Jucá et. al (2014) afirmam que a quantidade de resíduos gerados em uma região está diretamente relacionada à evolução da população, ao nível de urbanização, ao poder de compra dos habitantes, etc. Assim o poder de compra de determinada região, que pode ser medido através de indicadores como o PIB e o PIB per capita, parecem estar diretamente relacionados à geração de resíduos sólidos urbanos. De acordo com o IBGE (2020), a população estimada de Belo Horizonte é de 2.521.564 habitantes, com um PIB de R\$ 88.951.167,81 (x1000) e o PIB per capita de R\$ 35.245,02. Assim, a modelagem da população foi elaborada tomando como base o crescimento vegetativo do município, no qual foram consideradas as taxas brutas de natalidade (15,78), mortalidade (6,65) e as taxas líquidas migratórias (-3,19). De posse destas informações podemos estimar a população utilizando-se a Equação 1.

$$P_a = P_0 + \int_{t_0}^t \left[P_{a-1} * \left(\frac{T_{xnat} + T_{xmig} - T_{xmorte}}{1000} \right) \right] dp \quad \forall a \in I : a > 0 \quad (1)$$

Onde:

- P_a = população ano corrente;
- P_0 = população inicial;
- P_{a-1} = população do ano anterior ao corrente;
- T_{xnat} = taxa bruta de natalidade;
- T_{xmig} = taxa líquida migratória;

Com base nos números divulgados pela SLU (2021), todos os destinos estudados são influenciados diretamente pela taxa de coleta do resíduo sólido urbano, sendo que um percentual de todo o resíduo gerado não é coletado (algo em torno de 4%). Do percentual coletado (96%), uma parte é destinada para triagem e reciclagem (11%). Na situação atual da região, uma parte (22%) é enviada para os aterros sem qualquer tipo de tratamento. Com a inclusão da usina de incineração no processo, é possível considerar um montante que ficaria disponível para ser consumido na planta (a depender de sua capacidade de processamento). Assim pode-se perceber a importância de a análise considerar um completo balanço de massa neste módulo a fim de atestar sua eficácia.

O módulo de incineração dos resíduos sólidos urbanos e geração de energia foi desenvolvido considerando-se a estratégia de reaproveitamento do excedente de RSU gerado para a região de Belo Horizonte, em uma usina de incineração que possa utilizar os gases provenientes da queima do RSU para a geração de vapor de alta temperatura. Este vapor (em torno de 500° C) movimentará as paletas de uma turbina, que aciona um gerador acoplado para a geração de energia elétrica. Este módulo foi desenvolvido considerando-se duas alternativas tecnológicas na construção da usina: uma utilizando a tecnologia convencional de queima direta do RSU (sem separação dos componentes) sem a adição de outras fontes de energia térmica. E a outra considerando a queima do RSU combinada com um ciclo de gás natural em dois estágios do processo (uma turbina a gás e um queimador adicional).

Para a análise de viabilidade do empreendimento foi adotado o método do fluxo de caixa descontado e calculados o Valor Presente Líquido (VPL) e o *Payback* (tempo de retorno do investimento). O objetivo principal é detectar a viabilidade ou não de cada cenário. Além destes indicadores de projeto, foram analisados também a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* (tempo de retorno do investimento). O objetivo principal é detectar a viabilidade ou não de cada cenário e propor alternativas que propiciem a melhoria dos resultados. O Valor Presente Líquido de um projeto de investimento é igual ao valor presente de suas entradas futuras de caixa menos o valor presente do investimento inicial e das saídas futuras de caixa. Para cálculo

do VPL é utilizada a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) como taxa de desconto, que corresponde à menor taxa de retorno que o investidor estiver disposto a aceitar em um investimento de risco, para abrir mão de um retorno certo, num investimento com baixo risco. Para o estudo foi definida a TMA de 11% a.a. O valor presente líquido é definido pela equação:

$$VPL = I + \sum_{t=1}^T \frac{FC_t}{(1+TMA)^t} \quad (2)$$

Em que:

- I** = Investimento Inicial;
- T** = Período de vida útil;
- FC_t** = Fluxo de caixa no tempo t;
- t** = tempo, período do fluxo de caixa.

3.3 Validação interna dos modelos

Para a validação dos modelos desenvolvidos foi utilizada a técnica de validação dos dados históricos, que consiste em utilizar os dados coletados para construir um modelo e para testar se o modelo se comporta como o sistema real. A validação dos modelos parte de uma parte comum aos dois modelos desenvolvidos, que é a geração dos resíduos comparando os parâmetros da dinâmica populacional da cidade de Belo Horizonte, passando pela validação do PIB e PIB per capita, validação do balanço de massa dos processos de destino do RSU e finalizando com a validação do processo de geração de energia elétrica previsto nos processos da vida real comparado com o que foi encontrado nos modelos desenvolvidos para cada cenário. É interessante reafirmar que após a validação/calibração do modelo foram feitas simulações futuras para o período de 2018 a 2038, porém não sendo aplicadas correções econômicas anuais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

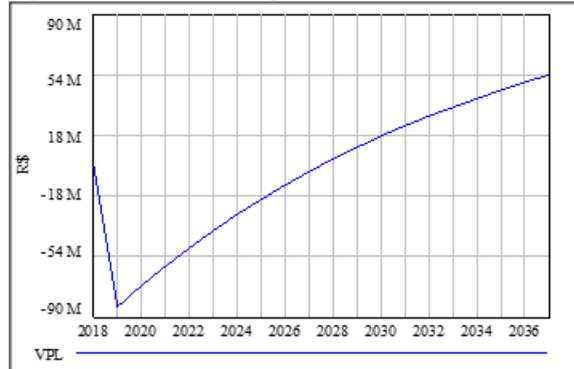
Os modelos desenvolvidos foram pensados para municiar os gestores quanto a estudos de viabilidade de se implantar uma usina de incineração de resíduos sólidos urbanos na região de Belo Horizonte, gerando e comercializando energia elétrica a partir da incineração dos resíduos sólidos urbanos. Os cenários foram construídos tomando-se como base os parâmetros para a construção de uma unidade de conversão do RSU em energia elétrica e a apuração de sua viabilidade para os dois tipos de tecnologias estudadas, até um cenário de ampliação no número de unidades que ainda apresente atratividade financeira, sempre considerando o montante total de RSU gerado pela cidade.

a. Resultados Apurados e Análise dos Cenários

Cenário 1: Implantação de uma planta de queima bruta (*massburning*)

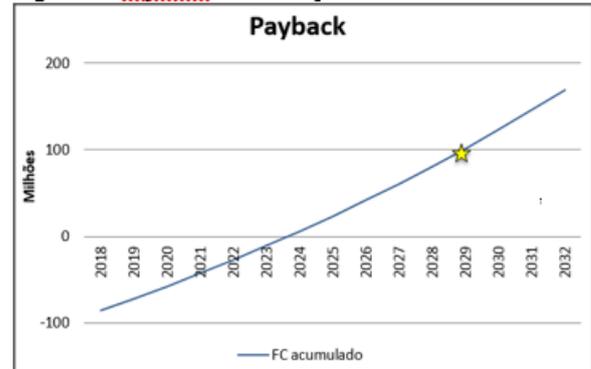
Este cenário considerou como seria o comportamento de uma usina contendo apenas de uma planta de conversão de RSU em energia utilizando a queima bruta (*massburning*), caso tivesse entrado em operação em Belo Horizonte no ano 2018, desconsiderando-se os reajustes anuais praticados. Com capacidade produtiva de 127.747 ton./ano (17,1% do total coletado), eficiência térmica de 23% e geração de 62 GWh/ano de energia elétrica que seria suficiente para alimentar 29.531 residências por ano). Os custos de implantação do projeto ficariam em torno de R\$ 98.995.540,00 (FEAM, 2012). Para este cenário o VPL aproximado foi de R\$53.581.876 e *Payback* de 11 anos. As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados do modelo.

Figura 2 - VPL simulado para o cenário 1



Fonte: Dos autores, 2021.

Figura 3 - *Payback* simulado para o cenário 1

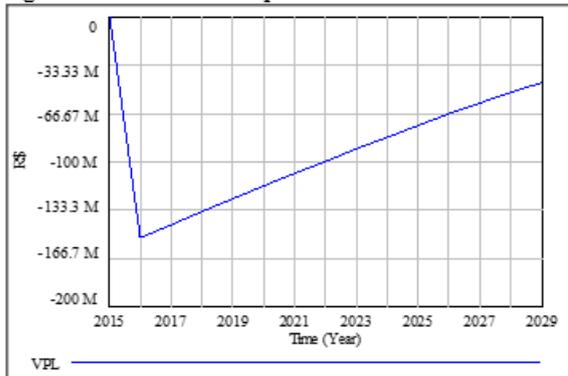


Fonte: Dos autores, 2021.

Cenário 2: Implantação de uma planta com o ciclo combinado (CCO)

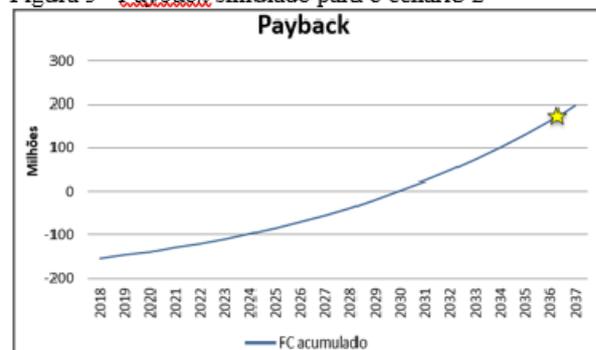
Este cenário considerou como seria o comportamento de uma usina contendo apenas uma planta de conversão de RSU em energia utilizando a queima através da tecnologia de CCO, caso tivesse entrado em operação em Belo Horizonte no ano 2018, desconsiderando os reajustes anuais praticados. Capacidade produtiva média em torno de 17,7% do total coletado, eficiência térmica de 32%, consumo de gás natural de 28.540,4 ton./ano e geração de 117,5 GWh/ano de energia elétrica (já descontadas as perdas técnicas), que seriam suficientes para alimentar 58.610 residências por ano). As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados do modelo no que se refere a VPL e *Payback*.

Figura 4 - VPL simulado para o cenário 2



Fonte: Dos autores, 2021.

Figura 5 - *Payback* simulado para o cenário 2



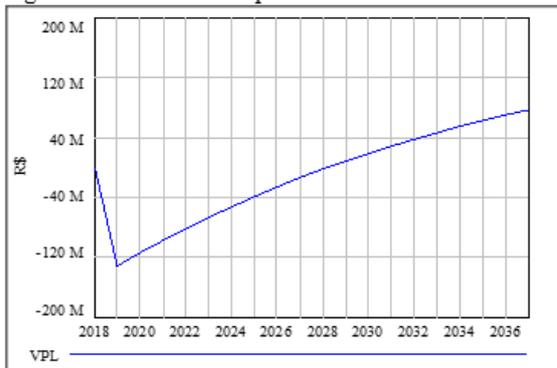
Fonte: Dos autores, 2021.

Os custos de implantação deste projeto seriam em torno de R\$ 154.352.530,23 (CAENEIRO, 2015) com o VPL em torno de R\$-48.215.200 e *Payback* de 19 anos.

Cenário 3: Implantação de duas plantas de queima bruta (*massburning*)

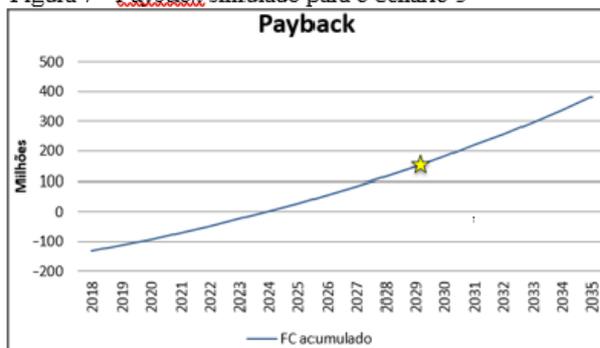
Este cenário considerou como seria o comportamento de uma usina contendo duas plantas de conversão de RSU em energia utilizando a queima bruta (*massburning*), caso tivesse sido implantada em Belo Horizonte no ano 2018, desconsiderando os reajustes anuais praticados. Como já esperado, o reaproveitamento médio ao longo dos anos analisados foi de 31,3% sobre o total de RSU coletado, eficiência térmica de 23%. O total de energia que seria disponibilizado na rede seria de aproximadamente 120GWh/ano, que seria suficiente para alimentar 61.797 residências por ano (162 kWh/mês). As Figuras 6 e 7 mostramos resultados do modelo para VPL e *Payback*.

Figura 6 - VPL simulado para o cenário 3



Fonte: Dos autores, 2021.

Figura 7 - Payback simulado para o cenário 3



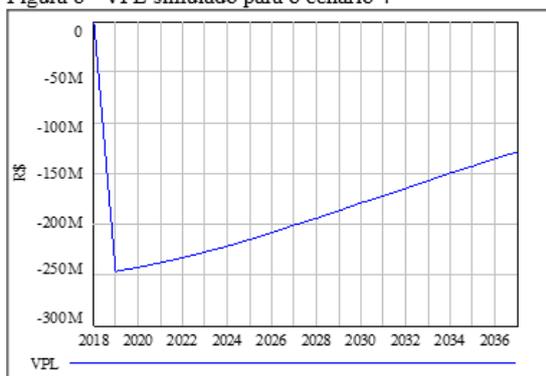
Fonte: Dos autores, 2021.

Quanto aos indicadores de viabilidade do empreendimento, foi aplicada uma taxa média de atratividade (TMA) de 11% e um custo de projeto de R\$ 153.245.040, adotando critério de custo de implantação de duas unidades fabris sendo 22,6% menor (FEAM, 2012). Obtivemos VPL aproximado de 76.168.800 para os 20 simulados e *Payback* de 11 anos.

Cenário 4: Implantação de duas plantas com o ciclo combinado (CCO)

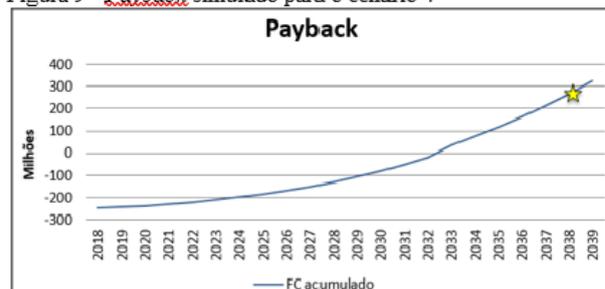
Este cenário analisou o comportamento de uma usina contendo duas plantas idênticas, de conversão de RSU em energia utilizando a queima através da tecnologia de CCO, caso tivesse sido implantada em Belo Horizonte no ano 2018, desconsiderando-se os reajustes anuais praticados. O reaproveitamento médio foi próximo, porém um pouco acima do cenário 3 (35,4%) com a mesma eficiência térmica do cenário 2 (32%). O Consumo de gás natural dobra em relação ao cenário 2 (56.900,8 ton./ano) reduzindo o fluxo de caixa em função deste acréscimo. O total de energia que seria disponibilizado na rede a partir da implantação da usina com as duas plantas, já descontando a perda técnica de aproximadamente 3% (ANEEL, 2019) seria de aproximadamente 226 GWh/ano, o qual seria suficiente para alimentar mais de 116.000 residências por ano (162 kWh/mês). As Figura 8 e 9 apresentam os resultados de VPL e *Payback* para o cenário.

Figura 8 - VPL simulado para o cenário 4



Fonte: Dos autores, 2021.

Figura 9 - Payback simulado para o cenário 4



Fonte: Dos autores, 2021.

Foi aplicada a mesma taxa média de atratividade (TMA) de 11% e um custo de projeto de R\$ 254.417.717, adotando o mesmo critério de que o custo de implantação para o cenário 3 (22,6% menor). Obtivemos neste cenário, VPL aproximado de R\$ -128.302.000 para os 20 anos e *Payback* também em torno de 20 anos de simulação.

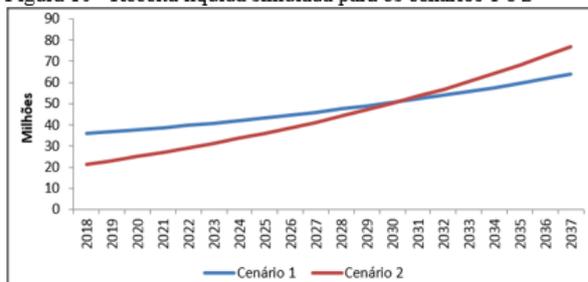
b. Estudo comparativo dos resultados entre os cenários

Com o objetivo de apoiar os gestores na tomada de decisão sobre qual a melhor alternativa a ser adotada na implantação de um empreendimento deste tipo na região foram comparados os principais indicadores dos quatro cenários desenhados. A análise dos cenários considerou um comparativo entre os cenários 1 e 2, ambos com o projeto de uma planta de incineração do RSU. Na sequência é feito um comparativo entre os cenários 3 e 4, ambos com o projeto de duas plantas de incineração. E por fim um comparativo global dos 4 cenários propostos.

Comparação dos indicadores entre os cenários 1 e 2

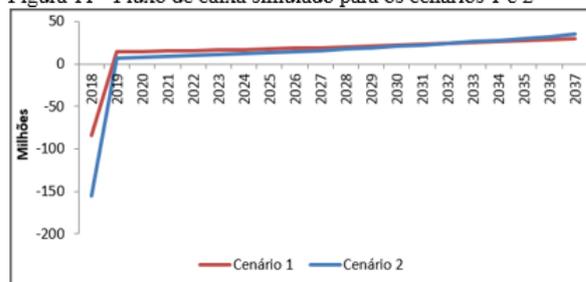
Esta comparação analisa a melhor combinação de indicadores dos projetos propostos com uma usina de incineração de RSU, sendo o cenário 1 com tecnologia nacional (*massburning*) e o cenário 2 (ciclo combinado = RSU + Gás natural). O cenário 1 apresenta investimento menor (R\$98.995.540), com o mesmo poder de processamento de RSU do cenário 2, porém com produção de energia 48,9% menor que o cenário 2. Interessante notar que mesmo com este percentual de energia gerada a menos, a receita líquida não refletiu este panorama, devido aos altos valores praticados para o Gás Natural, utilizado no cenário 2, o que manteve o fluxo de caixa do cenário 1 mais atrativo ao longo dos 20 anos. O cenário 1 teria condições de abastecer a metade do número de residências do cenário 2 (cenário 1: 29.531 e cenário 2: 58610). Já o VPL do cenário 1 se mostrou muito mais interessante (cenário 2 com VPL negativo). Com relação ao *Payback* o cenário 1 se mostrou muito mais atraente com 11 anos, contra 19 anos do cenário 2. A Figura 10 apresenta o comparativo das receitas líquidas dos dois cenários e a Figura 11 analisa o fluxo de caixa das usinas. Pode-se concluir que o **cenário 1** foi o melhor avaliado (melhor em 5 indicadores contra 4 do cenário 2), se mostrando a melhor alternativa para as usinas de tratamento do RSU com apenas uma planta.

Figura 10 - Receita líquida simulada para os cenários 1 e 2



Fonte: Dos autores, 2021.

Figura 11 - Fluxo de caixa simulado para os cenários 1 e 2



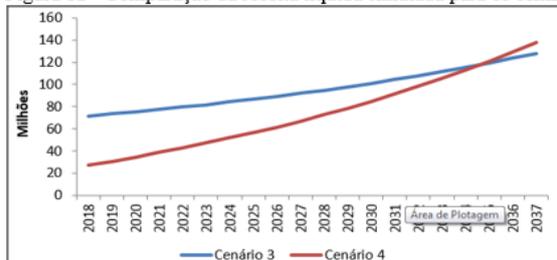
Fonte: Dos autores, 2021.

Comparação entre os cenários 3 e 4

Esta comparação tem como objetivo analisar a melhor combinação de indicadores dos projetos com a implantação de duas usinas de incineração de RSU, sendo o cenário 3 com tecnologia nacional (*massburning*) e o cenário 4 (ciclo combinado – RSU + Gás natural). No cenário 3 o investimento é menor (R\$153.145.000), com o mesmo poder de processamento de RSU quando comparado ao cenário 4, que possui investimento inicial previsto de R\$254.418.000 (66% mais caro). Porém o cenário 3 produz um montante de energia em torno de **50%** menor que o cenário 4 e, surpreendentemente, com receita líquida um pouco maior. Praticamente o mesmo percentual (51%) é indicado para o número de residências que os cenários poderiam abastecer (cenário 3: 60.889 e cenário 4: 119.714). O VPL do cenário 3 é muito maior que o cenário 4 (VPL negativo) e o *Payback* do cenário 3 é de 11 anos, contra 20 anos do cenário 4. O fluxo de caixa do cenário 3 também apresentou-se melhor que o do cenário 4 (21% superior), também por conta dos altos custos atrelados ao consumo de gás natural e de

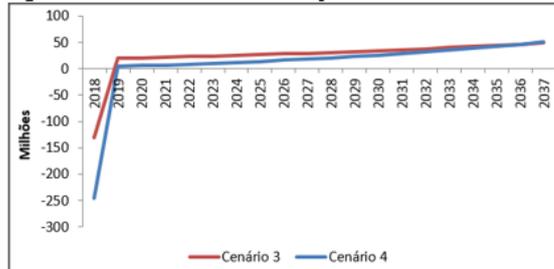
projeto. A Figura 12 apresenta uma comparação das receitas líquidas dos dois cenários e a Figura 13 analisa o fluxo de caixa das usinas.

Figura 12 - Comparação da receita líquida simulada para os cenários 3 e 4



Fonte: Dos autores, 2021.

Figura 13 - Fluxo de caixa simulado para os cenários 3 e 4

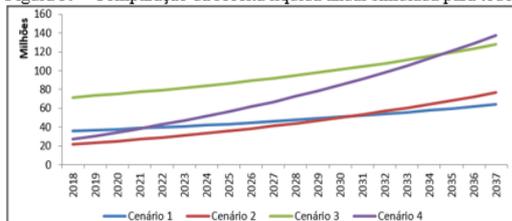


Fonte: Dos autores, 2021.

Comparação entre todos os cenários

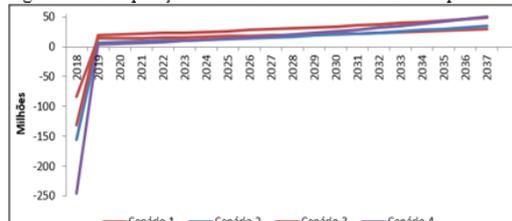
Quanto aos custos dos projetos, definitivamente temos o cenário 1 como o mais interessante entre os quatro, sendo que o cenário 4 é o que possui maior custo (R\$254.418.000, mais que o dobro do previsto para o cenário 1). Interessante refletir sobre os custos do cenário 3 (R\$153.145.000), que mesmo tendo prevista a implantação de duas plantas idênticas, ainda apresenta custo menor que o cenário 2 (R\$164.353.000). Quando analisamos a energia elétrica gerada por ano (em GWh) o melhor resultado fica a cargo do cenário 4, com potencial de entregar mais de 225GWh/ano à rede nacional, representando duas vezes mais que os cenários 2 e 3, e quatro vezes maior que o cenário 1. Obviamente este mesmo ranking se aplicaria ao indicador de número de residências abastecidas, por ser diretamente proporcional. A receita líquida mostrou resultados menos óbvios, quando comparada aos demais indicadores. Mesmo mantendo-se o cenário 4 como um bom valor apurado (R\$74.395.000), o cenário 3 apresentou o melhor resultado com R\$95.711.000. O mesmo panorama se apresentou também ao indicador de fluxo de caixa, com o cenário 3 em primeiro, seguido dos cenários 4, 1 e 2, nesta ordem. O indicador VPL apresentou dados peculiares, porém mantendo basicamente, o mesmo panorama: Cenário 3 em primeiro, 1 em segundo, seguido dos cenários 2 e 4, que apresentaram VPL negativo. O indicador de *Payback* reflete claramente os maiores desafios na adoção das tecnologias importadas: alto custo de projeto e altos custos com o consumo de gás natural. Assim, o cenário 1 obteve melhor *Payback* (11 anos), seguido do cenário 3 (12 anos), cenário 2 (19 anos) e cenário 4 com 20 anos. As Figuras 14 e 15 destacam o comparativo dos quatro cenários propostos, para receita líquida e fluxo de caixa anuais, previstos para cada um dos empreendimentos sugeridos.

Figura 39 - Comparação da receita líquida anual simulada para todos os cenários



Fonte: Dos autores, 2021.

Figura 40 - Comparação do fluxo de caixa anual simulado para todos os cenários



Fonte: Dos autores, 2021.

Dentre todos os cenários, o que apresentou indicadores mais interessantes foi o cenário 3, mesmo com todos os cenários tendo resultados financeiros não muito atraentes (especialmente VPL e *Payback*). Certamente os custos de consumo de gás natural e de projeto corroboraram para os muito pouco atraentes indicadores dos cenários 2 e 4, que apresentam números de

geração de energia altos. A Tabela 6 apresenta um resumo comparativo final de todos os indicadores apurados para os cenários.

Tabela 6—Comparativo dos indicadores simulados para todos os cenários

Cenário	Tecnol. Projeto	Num. Plantas	Custo Projeto (x1000) ↓	RSU processado (ton/ano) ↑	Energia Produzida (MWh/ano) ↑	Receita Líquida (x1000) ↑	Fluxo de Caixa (x1000) ↑	VPL (x1000) ↑	Payback (Anos) ↓	Residências Abastecidas ↑
1	Nacional	1	R\$ 98.995	127.747	61.925	47.855	29.468	53.582	11	30.445
2	Importada	1	R\$ 164.353	127.747	121.211	R\$ 44.975	R\$ 34.515	-R\$ 48.215	19	59.857
3	Nacional	2	R\$ 153.145	255.494	122.029	R\$ 95.711	R\$ 48.670	R\$ 77.169	12	60.889
4	Importada	2	R\$ 254.418	255.494	242.422	R\$ 74.395	R\$ 50.430	-R\$ 128.302	20	119.714

Fonte: **Dos autores, 2021.**

Interessante observar que na análise da Tabela 6, em alguns indicadores os resultados são os mesmos (apresentaram empate). Assim, para se definir o melhor cenário entre todos os analisados, foram computados os vencedores. Exemplo: no indicador “RSU Processado”, os cenários 3 e 4 ficaram empatados, tendo sido adotado os dois como vencedores nesta análise.

5. CONCLUSÕES

Os modelos desenvolvidos focaram principalmente na análise macroeconômica dos empreendimentos, não considerando alguns itens que porventura, poderiam influenciar no resultado final de cada empreendimento que pudesse ser selecionado. Alguns dos principais são: custos de transporte do RSU até a usina de incineração; custos de transporte dos resíduos para os aterros sanitários (cinzas); etc.

Apesar de apresentarem excelente performance nos quesitos geração de energia e número de residências abastecidas, os cenários 2 (com uma planta utilizando a tecnologia CCO) e 4 (com duas plantas utilizando a tecnologia CCO) apresentaram custos muito elevados, tornando-os nada atrativos sob a ótica de investidores. Já os cenários 1 e 3 se mostraram mais atraentes em função do tempo de retorno do investimento, custos de projeto e menor complexidade tecnológica.

Os resultados apresentados a partir das simulações realizadas nos levam a crer que há uma opção mais indicada entre as analisadas (cenário 3), em função do que seria um melhor tempo de retorno do investimento, menor valor de projeto versus percentual de eliminação do RSU, etc. Porém, os gestores ainda assim podem tender a tomar as decisões baseadas em outros indicadores, como número de residências abastecidas ou total de energia entregue na rede elétrica. Porém, seria necessário reavaliar todos os indicadores e cenários propostos para se justificar a escolha por outra composição.

A Adoção do cenário 4 poderia se tornar interessante a partir do momento em que o custo do projeto fosse reduzido, através do desenvolvimento de tecnologias mais baratas, ganhos em escala (mais de um projeto), etc. Além de melhores negociações e fontes alternativas para o consumo de gás natural. O fato é que o cenário 4 realmente abasteceria um número muito maior de residências (aproximadamente 120.000) e cumpriria um papel socioambiental muito mais vantajoso.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10004: (2004). Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro – RJ.
- ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019* (2019). Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

- ANEEL. *Informações Gerenciais – março 2019*, 2019. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Araújo, Í. C. (2018). *Modelagem da Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos Utilizando Técnicas de Dinâmica de Sistemas*. Dissertação (Mestrado Engenharia e Gestão de Processos e Sistemas) – Instituto de Educação Tecnológica (IETEC), Belo Horizonte.
- BELO HORIZONTE. Relatório 2017 a 2020 superintendência de limpeza urbana. Belo Horizonte: PBH, 2021. Disponível em: https://issuu.com/slubh/docs/relat_rio_slu_2017-2020. Acesso em: 3 jan. 2021.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. – 3. ed. Reimpr. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017. 80 p. – (Série legislação; n. 229 PDF).
- Carneiro, M. L. N. de M. (2015). *Análise termoeconômica e ambiental de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos – Estudo de caso da planta de Zabalgardi/Bilbao adaptada à realidade brasileira*. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro.
- Cristóvão, G.; Medeiros, G. (2020). *Gestão de resíduos sólidos: Diretrizes de extensão universitária para a comunidade do Entorno da Escola Superior Pedagógica do Bié, em Angola*. 10.36229/978-85-7042-219-4.CAP.08. Belo Horizonte.
- Dalmo, F.; Simao, N.; Nebra, S.A.; Santana, P. H. de M. (2018). *Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: experiência das políticas públicas brasileiras e internacional*. Revista Brasileira de Energias Renováveis. 7. 10.5380/rber.v6i1.57966.
- Eosconsultores. (2020). *Os números dos resíduos sólidos no mundo*. Blog, Resíduos Sólidos. Disponível em: (<https://www.eosconsultores.com.br/os-numeros-dos-residuos-solidos-no-mundo/>). Acessado em 29 de agosto de 2020.
- EPE. *Nota Técnica DEA 18/14 (2014). Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia.
- EPE. *RESENHA Mensal do mercado de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2020.
- FEAM Fundação Estadual do Meio Ambiente. (2012). Diretoria de pesquisa e desenvolvimento. Gerência de energia e mudanças climáticas. *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais*. Belo Horizonte.
- FJP. (2020). *Série Indicadores FJP*. Disponível em: (http://novosite.fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/14.02.Inf_NEP_Demografia_01_2020.pdf). Acesso em: 17/01/2021.
- Fugii, G. M. (2019). *Proposta de um modelo de dinâmica de Sistemas aplicado à gestão de resíduos sólidos urbanos domiciliares de Curitiba*. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade) – Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba.
- Gasmig. (2020). *Características Físicas e Químicas do Gás Natural*. Disponível em: (<http://www.gasmig.com.br/GasNatural/Paginas/CaracteristicasFisicasQuimicas.aspx>). Acesso em 17 de dezembro de 2020.
- Ibge. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020). Cidades*. Disponível em: (<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>). Acesso em: 10 de janeiro de 2021.

- Juca, J. F.; Lima, J.; Lima, D. A.; Mariano, M.; Lucena, L.; Firmo, A. L. (2014). *Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*.
- Maranho, A. S. (2009). *Potencial de Geração de Energia Elétrica a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos para Bauru e Região*. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2008.
- Sadef, Y.; Nizami, A. S.; Batool, S. A.; Chaudary, M. N.; Ouda, O. K. M.; Asam, Z. Z.; Habib, K.; Rehan, M.; Demirbas, A. (2016). *Waste to Energy and recycling value for developing integrated solid waste management plan in Lahore*. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, v. 11, n. 7, p. 569-579, 2016.
- SLU, S. de L.U. (2021). *Relatório de Gestão da Superintendência de Limpeza Urbana*. Disponível em: [Relatório de Gestão da Superintendência de Limpeza Urbana \(SLU\) - 2017 a 2020 by Superintendência de Limpeza Urbana - PBH - issuu](#). Belo Horizonte, 2021. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Acessado em 25 de Abril de 2021.
- Tchobanaglou, G.; Theisen, H.; Vigil, S. A. (1993). *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. [S.l.]: McGraw-Hill. (McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering).
- Waskow, R. P. (2015). *ASTM D5231 Aplicada à Caracterização da Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos. Estudo de Caso*. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.