

Dinâmica De Sistemas Para Mitigação Da Emissão Do Co2 Decorrente Do Resíduo Sólido Urbano Na Área De Abrangência De Um Campus Universitário

Glauco Oliveira Rodrigues¹, Isabela Marques Kumer²,
Eugênio De Oliveira Simonetto³, Taísa Maria Rossato⁴,
Dienifer Pauleski Della Justina⁵, Elenara Milena De Cristo⁶

¹ (Doutor Em Administração, Pelo Programa De Pós Graduação Em Administração (Ppga), Da Universidade Federal De Santa Maria (Ufsm), Brasil)

² (Mestranda Em Administração, Pelo Programa De Pós Graduação Em Administração (Ppga), Da Universidade Federal De Santa Maria (Ufsm), Brasil)

³ (Professor Do Programa De Pós Graduação Em Administração (Ppga), Da Universidade Federal De Santa Maria (Ufsm), Brasil)

⁴ (Doutoranda Em Administração, Pelo Programa De Pós Graduação Em Administração (Ppga), Da Universidade Federal De Santa Maria (Ufsm), Brasil)

⁵ (Mestranda Em Administração, Pelo Programa De Pós Graduação Em Administração (Ppga), Da Universidade Federal De Santa Maria (Ufsm), Brasil)

⁶ (Doutoranda Em Administração, Pelo Programa De Pós Graduação Em Administração (Ppga), Da Universidade Federal De Santa Maria (Ufsm), Brasil)

Resumo:

Introdução: A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) tornou-se uma questão cada vez mais crítica devido ao aumento do consumo e à subsequente geração de resíduos. A tendência da sociedade contemporânea para produtos com ciclos de vida mais curtos e embalagens descartáveis agrava os desafios na gestão de RSU, que não é totalmente reconhecida como um problema significativo de saúde e ambiental em todo o mundo. O campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com sua extensa área e diversas atividades, pode ser considerado um centro urbano que enfrenta problemas semelhantes de gestão da RSU. O estudo da gestão de RSU é um tema acadêmico pertinente, principalmente no Brasil, onde muitos estudos utilizam modelos de Dinâmica de Sistemas (DS) para apoio à decisão, destacando a relação entre o crescimento populacional e a geração e gestão de RSU. No entanto, existe uma lacuna na investigação centrada nos aspectos operacionais da recolha de resíduos e serviços relacionados, que este estudo pretende abordar.

Materiais e métodos: O método de pesquisa para desenvolvimento do modelo computacional foi baseado na metodologia de Sterman, que inclui: (1) estudos exploratórios e artigos científicos, manuais de referência e documentos demonstrativos sobre gestão de RSU e sua relação com emissões de CO₂; (2) desenvolvimento de modelos formais representativos do problema; (3) implementação computacional utilizando o simulador Vensim; (4) validação da solução através de testes de hipóteses e comparação com a realidade observada; e (5) demonstração de resultados. Os cenários para avaliação do modelo foram gerados a partir de análises utilizando dados do censo populacional de 2010, do Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil 2023, do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2022) e do SNIS (2020).

Resultados: O modelo do estudo mostrou que os cenários simulados poderiam reduzir o impacto ambiental (emissões de CO₂) em 11% a 23%, enfatizando a importância da coleta e reciclagem adequada dos resíduos. Além disso, as emissões contínuas de partículas de metais pesados pelas atividades humanas, que podem ser absorvidas por plantas e animais, causando intoxicações em todos os níveis da cadeia alimentar, foram identificadas como poluentes ambientais significativos devido à sua toxicidade. O modelo apresentou redução na emissão da coleta de metais em 16% no cenário otimista e 13% no cenário mediano.

Conclusão: O estudo demonstra o volume de RSU gerado na UFSM, as emissões equivalentes de CO₂ desses resíduos e sua destinação final. Por meio da Dinâmica de Sistemas (DS), as informações são analisadas para simular hipóteses de otimização que visam reduzir as emissões de CO₂ abaixo dos níveis atuais.

Palavra-chave: Dinâmica de Sistemas; Modelagem Computacional; Vensim

Date of Submission: 13-03-2024

Date of Acceptance: 23-03-2024

I. Introdução

O problema relacionado à gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) está se tornando cada vez mais grave, principalmente devido ao aumento do consumo e conseqüente produção de resíduos sólidos. A atitude da sociedade contemporânea em relação ao uso crescente de produtos com ciclos de vida mais curtos e embalagens descartáveis também tem contribuído para a precariedade da gestão de RSU, na qual a gestão não é totalmente destacada como um dos maiores problemas de saúde e meio ambiente do Mundo (Gonçalves; Tanaka; Amedomar, 2013; Ferreira; Barros, 2021). Esta situação reflete no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por a mesmo poder ser considerado um centro urbano, dado a sua grande área e a pluralidade de suas atividades.

A gestão de resíduos sólidos é um objeto pertinente em estudos acadêmicos, em especial no Brasil, dos quais muitos estão relacionados à utilização de modelos de DS para apoio à decisão, como apontam Sancheta *et. al.* (2021). A atenção é voltada para as relações entre crescimento populacional e geração e manejo de RSU. No entanto, se observa um gap de trabalhos nas áreas operacionais específicas de coleta e outros serviços relacionados a esta etapa do manejo, fator que será inserido na modelagem do presente trabalho.

A disposição final é uma das alternativas de destinação final ambientalmente adequada previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), desde que observadas as normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. No Brasil, a maior parte dos RSU coletados (61%) continua sendo encaminhada para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação ambientalmente adequada em 2022 (Nepomoceno; Pontarolo, 2022). Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros, ainda seguem em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas com destinação inadequada (ABRELPE, 2022).

Uma das conseqüências que uma má gestão de o que fazer com os RSU's é a emissão de gases de efeito estufa, em especial o CO₂. A responsabilidade com o destino correto de todos os resíduos finais, culmina em diversas ações práticas e sociais na área de abrangência do campus da UFSM, sendo um modelo na área ambiental para os demais centros urbanos municipais.

Desta maneira, o presente trabalho demonstrará o volume de RSU gerado nas atividades da UFSM, a emissão de CO₂ equivalente oriundos destes resíduos e o destino dos mesmos. Utilizando-se a Dinâmica de Sistemas (DS), tais informações serão confrontadas, para simulação de hipóteses de otimização, na busca que as emissões de CO₂ sejam menores do que as atuais.

II. Revisão Da Literatura

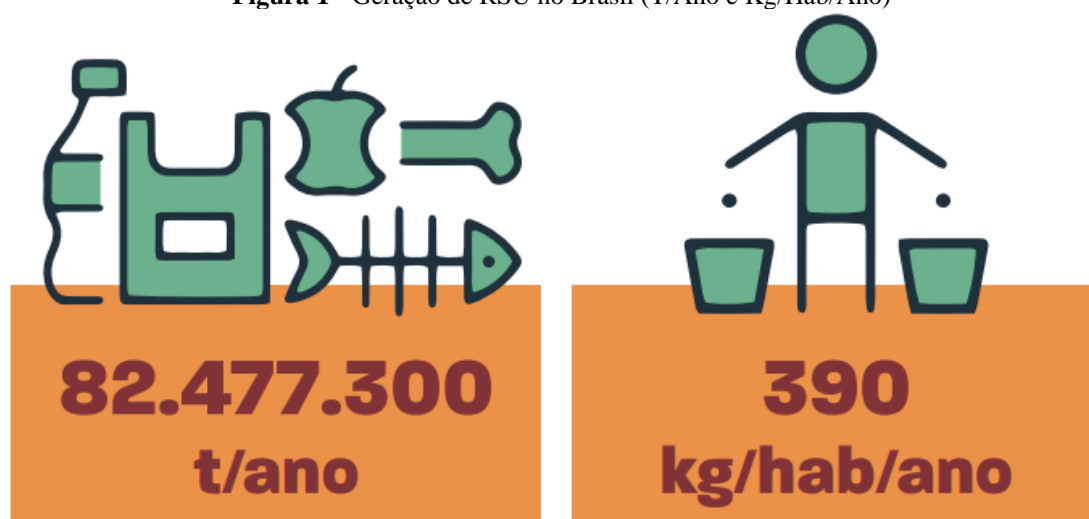
Resíduos Sólidos Urbanos e suas Complicações

À nível nacional, os resíduos sólidos têm sido, desde 2010, objeto de políticas públicas no Brasil na direção de reduzir a sua geração, aumentar o reuso e reciclagem, promover a destinação final adequada e instituir a gestão adequada de Resíduos Sólidos Urbanos (ABRELPE, 2022) nas municipalidades brasileiras. A Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Arantes; Pereira, 2021), representou um marco positivo na legislação brasileira ao exigir ações e maior transparência dos setores públicos e privados na gestão dos seus resíduos.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), antes do período da pandemia, a geração de resíduos acontecia de maneira descentralizada nas diferentes regiões das cidades, uma vez que as atividades diárias eram desempenhadas em diferentes locais (escritórios, escolas, centros comerciais etc), servidos por diferentes estruturas de manejo de resíduos sólidos (ABRELPE, 2022). Com a maior concentração das pessoas em suas residências, observou-se uma concentração da geração de resíduos nesses locais, atendidos diretamente pelos serviços de limpeza urbana.

Os dados coletados mostram que a geração de resíduos sólidos domésticos foi diretamente afetada pela pandemia do COVID-19 em 2020, com valor total gerado de cerca de 82,5 milhões de toneladas, equivalente a 225.965 toneladas por dia. Como resultado, cada brasileiro gera em média 1,07 kg de resíduos por dia. Como mencionado, uma possível razão para este aumento acentuado é que as novas dinâmicas sociais foram, em grande parte, transferidas quase inteiramente para as famílias, uma vez que o consumo nos restaurantes foi substituído pela entrega de alimentos. A Figura 1 representa a geração de RSU no Brasil.

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil (T/Ano e Kg/Hab/Ano)



Fonte: ABRELPE (2022)

Com o aumento na geração dos resíduos domiciliares, a quantidade de materiais dispostos para coleta junto aos serviços de limpeza urbana também cresceu, levando a um total de 76,1 milhões de toneladas coletadas no ano de 2020, o que implicou em uma cobertura de coleta de 92,2%. Regionalmente e nos moldes dos anos anteriores, a região com maior geração de resíduos continua sendo a Sudeste, com 113 mil toneladas diárias (50%) e 460 kg/hab/ano, enquanto a região Norte representa aproximadamente 7,4% do total gerado, com cerca de seis milhões de toneladas/ano e 328 kg/hab/ano. A Figura 2 apresenta a participação das regiões na geração de RSU.

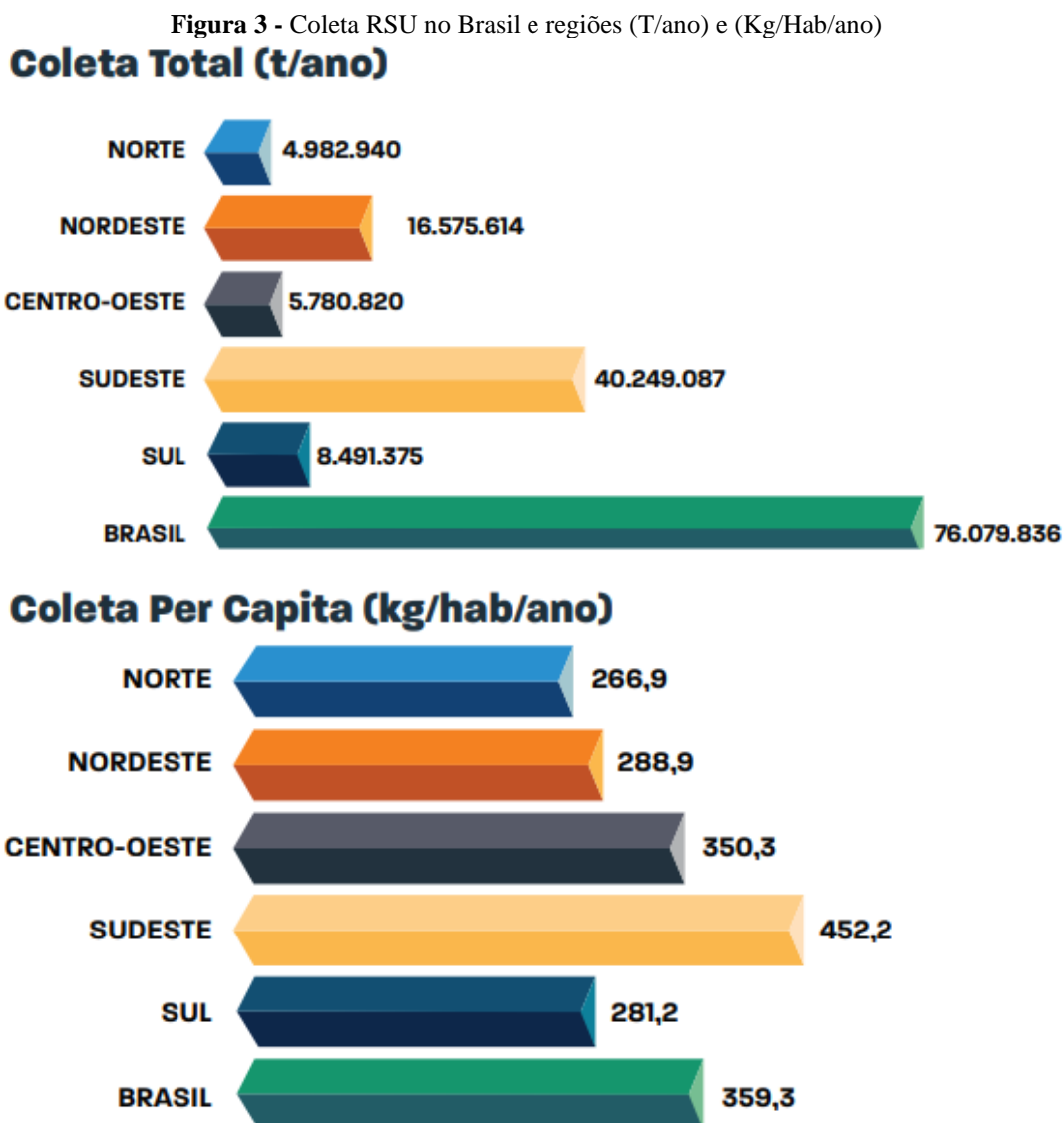
Figura 2 - Participação das regiões na geração de RSU (%)



Fonte: ABRELPE (2022)

A região Sudeste é responsável pela maior massa coletada dentre as demais regiões do país, com pouco mais de 40 milhões de toneladas por ano, seguida das regiões Nordeste, com pouco mais de 16,5 milhões de toneladas e Sul, com cerca de 8,5 milhões de toneladas coletadas. Importante ressaltar que, conforme já verificado anteriormente, enquanto as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste já alcançaram índice de cobertura de coleta superior à média nacional, as regiões Norte e Nordeste ainda apresentam pouco mais de 80%, o que significa que

em torno de 20% dos resíduos gerados não são alcançados pelos serviços de coleta regular nos municípios localizados nessas regiões. A Figura 3 apresenta a coleta de RSU no Brasil.



Fonte: ABRELPE (2022)

Dinâmica de Sistemas

Para Rebs, Brandenburg e Seuring (2019) conceitos empregados às palavras “dinâmica” e “sistemas” podem ser variados quando se leva em conta a área de aplicação, adicionado a isto, se considerada a expressão “dinâmica de sistemas”, a mesma também pode ser utilizada em várias áreas da ciência. Este contexto vem ao encontro da área de aplicação com enfoque no estudo de sistemas dinâmicos sócio tecno-econômicos, isto é, sistemas constituídos por componentes humanos, técnicos e econômicos. Esta área ficou conhecida como dinâmica de sistemas e originou-se a partir da adaptação da engenharia de controle clássica, do Professor Jay W. Forrester do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que, nos anos 50, interessou-se em estudar processos de negócio dinâmicos e seus impactos no sucesso ou fracasso das organizações (Malczynski; Lane, 2023).

Com base em sua experiência na área de controle e realimentação, o Prof. Forrester evidenciou que diversos fenômenos de realimentação dos sistemas de controle físicos, também eram encontrados em problemas de produção e operações, especialmente no que se refere à realimentação de informações para o ajuste e balanceamento do sistema de produção (Sterman *et al.*, 2015).

Como resultado de seus estudos, o Prof. Forrester publicou um artigo em 1958, com resultados e aceitação positivos, de tal forma que, anos mais tarde, ele publicou um livro, intitulado “*Industrial Dynamics*”, no

qual explicava com detalhes cada uma das fases do modelo de cadeia de suprimentos que foi implantada na General Electric (Forrester, 1958; 1961).

Após a publicação de tal obra, a área, que originalmente denominou-se “*Industrial Dynamics*”, passou por uma evolução, objetivando englobar outros tipos de sistemas e problemas sócio tecno-econômicos, além daqueles contidos no ambiente industrial tais como: problemas ambientais, problemas de planejamento urbano e econômicos. Tal evolução ocasionou a alteração da nomenclatura, passando a se chamar “*System Dynamics*” ou dinâmica de sistemas. Desde então, a aplicação de Dinâmica de Sistemas cresceu substancialmente, abrangendo soluções a problemas de gestão de negócios e economia, indo até ecologia, fenômenos sociais e de educação. Todavia, a sua utilização ainda não é massiva na área de gestão em geral, inclusive no Brasil. A razão, está relacionada à pouca disseminação do campo nos canais de publicação científicos no País (Vaz; Inomata Maldonado, 2016).

Dinâmica de sistemas (DS) é uma abordagem baseada na teoria de controle e da dinâmica não linear (Hafezi *et al.*, 2021). Essa abordagem permite aos analistas e modeladores contabilizarem as interações entre os sistemas inter-relacionados e que conduzem os comportamentos dinâmicos de um sistema ao longo do tempo (Delgado et al, 2020). Baseia-se no pressuposto de que não linearidades, feedbacks de sistema e relacionamentos entre os elementos de um sistema podem ser mais significativos na determinação do comportamento do sistema agregado do que os próprios componentes individuais (Forrester, 1970). A capacidade de incorporar atrasos de tempo, ampliações, relações casuais e estruturais e feedbacks do sistema no procedimento de modelagem tornaram a DS popular para analisar e compreender sistemas temporais complexos (Sterman, 2018).

Barati, Pour e Sardooei (2023) destacam que a Dinâmica de Sistemas é um método de modelagem e simulação do comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo, possibilitando assim a avaliação de mudanças em partes do sistema de forma que tais alterações afetem o comportamento do todo. Portanto, a aplicação da metodologia de dinâmica de sistema torna possível examinar a interação entre as forças presentes no sistema e, com isso, possibilitar uma visão holística do processo em questão (Forrester, 1961).

III. Material E Métodos

Nesse artigo, o método de pesquisa adotado para o desenvolvimento do modelo computacional foi baseado na metodologia proposta por Sterman (2018), que consiste nas seguintes etapas: (1) busca de estudos exploratórios e artigos científicos, manuais de referência e documentos demonstrativos sobre a gestão de RSU e seu relacionamento com as emissões de CO₂; (2) desenvolvimento da solução, pela construção de modelos formais capazes de representar o problema; (3) implementação computacional da solução, utilizando-se o simulador Vensim (2022); (4) validação da solução, através de testes das hipóteses de gestão do RSU e contrastando com a realidade observada e; (5) demonstração dos resultados.

Os cenários que serviram como base para a avaliação do modelo foram gerados a partir de análises, cujos dados foram obtidos no censo populacional de 2010 (IBGE, 2010b), no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2023 (ABRELPE, 2022), no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Ministério do Meio Ambiente, 2011) e na SNIS (2020).

Hipótese Dinâmica

Uma vez que o problema tenha sido identificado e caracterizado em um horizonte temporal apropriado, foi desenvolvida a hipótese dinâmica com o intuito de, explicar o comportamento problemático. A hipótese é dinâmica porque deve fornecer uma explicação da dinâmica que caracteriza o problema em termos de feedback subjacente e estrutura de estoque e fluxo do modelo. É uma hipótese porque é sempre provisória, sujeita a revisão ou abandono à medida que se altera o processo de modelagem com o mundo real. Com isso, desenvolveu-se a seguinte hipótese dinâmica: “*O aumento da coleta de Resíduos Sólidos Urbanos possibilitará a redução na emissão de CO₂*”.

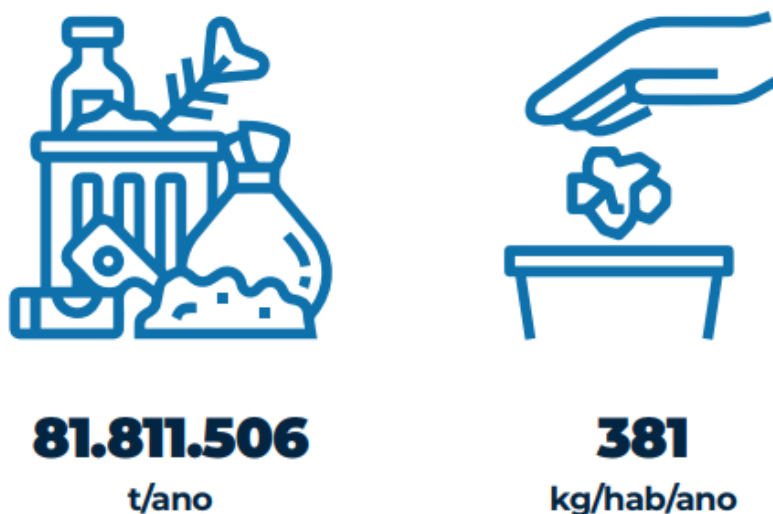
Desenvolvimento do Modelo de Dinâmica de Sistemas

Os gráficos e as tabelas a seguir sintetizam informações sobre a geração de RSU no Brasil durante o ano de 2022, tendo alcançado um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia. A partir dos dados registrados em 2022, observa-se que o montante de RSU gerados no país apresentou uma curva regressiva. As possíveis razões podem estar relacionadas às novas dinâmicas sociais, com a retomada da geração de resíduos nas empresas, escolas e escritórios, com a menor utilização dos serviços de delivery em comparação ao período de maior isolamento social e por conta da variação no poder de compra de parte da população.

Regionalmente e nos moldes dos anos anteriores, a região com maior geração de resíduos continua sendo a Sudeste, com cerca de 111 mil toneladas diárias (aproximadamente 50% da geração do país) e uma média de 450 kg/hab/ano, enquanto a região Centro-Oeste representa pouco mais de 7% do total gerado, com cerca de 6 milhões de toneladas/ano, a menor dentre as regiões.

Em termos de geração diária por habitante, as variações regionais mostram-se bastante latentes, com a região Sudeste apresentando uma geração média de 1,234 kg/hab/dia, a maior do país e, na outra ponta, a região Sul com uma média de 0,776 kg/hab/dia.

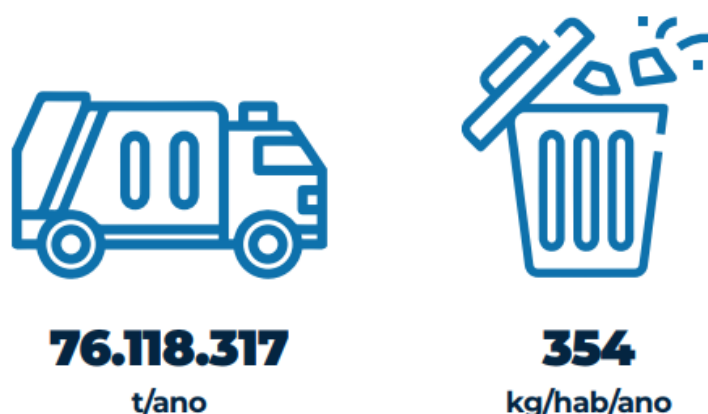
Figura 4 - Geração de RSU no Brasil (t/ano e kg/hab/ano) em 2022



Fonte: ABRELPE (2022)

Com relação à coleta de RSU, em 2022 o país registrou um total de 76,1 milhões de toneladas coletadas, levando a uma cobertura de coleta de 93%. Importante ressaltar que, conforme já verificado anteriormente, enquanto as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste já alcançaram índice de cobertura de coleta superior à média nacional, as regiões Norte e Nordeste ainda apresentam índices que se aproximam de 83%, deixando boa parte da população sem acesso aos serviços de coleta regular de RSU nessas regiões.

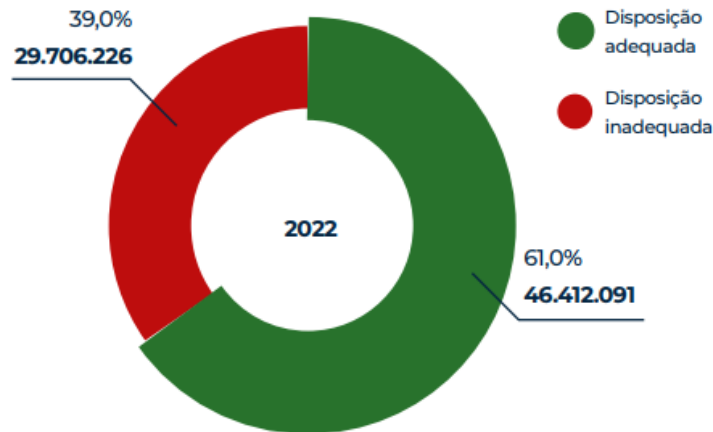
Figura 5 - Coleta de RSU no Brasil (t/ano e kg/hab/ano) em 2022



Fonte: ABRELPE (2022)

Segundo dados do SNIS (2023) a disposição final é uma das alternativas de destinação final ambientalmente adequada, previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). No Brasil, a maior parte do lixo doméstico coletado (61%) ainda é destinada a aterros sanitários e, em 2022, 46,4 milhões de toneladas foram destinadas a um destino ecologicamente correto. Por outro lado, áreas de armazenamento final insuficiente continuam a operar em todas as regiões no país e recebeu 39% de todos os resíduos coletados, um total de 29,7 milhões de toneladas, devido ao descarte insuficiente.

Figura 6 - Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %)



Fonte: ABRELPE (2022)

Em 2021, o setor de resíduos foi responsável pela emissão de 91,12 milhões de toneladas de CO₂, uma oscilação para baixo (0,12%) em relação ao ano anterior. Essa discreta redução está, em grande parte, relacionada com o aumento da queima ou recuperação energética de metano (CH₄) em aterros sanitários (SEEG, 2023).

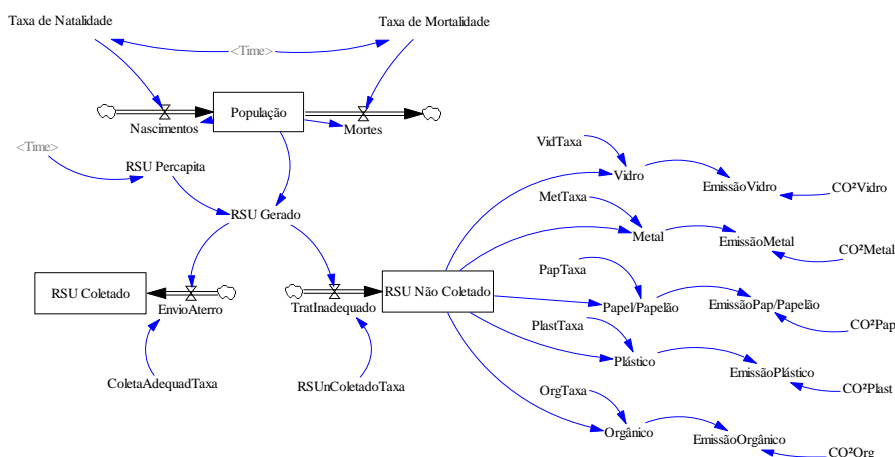
O setor de resíduos é responsável por 4% das emissões brutas do país, e tem o gás metano como o principal contribuinte nas suas emissões. O metano responde por cerca de 97% das emissões do setor.

Do total emitido, a principal contribuição está associada à disposição de resíduos sólidos em aterros controlados, lixões e aterros sanitários (64,1%), seguida pelo tratamento de efluentes líquidos domésticos (28%), tratamento de efluentes líquidos industriais (6,1%), incineração ou queima a céu aberto (1,7%) e, com menor contribuição, o tratamento biológico por meio de compostagem (<1%), como ilustrado na figura seguinte.

A atividade humana, doméstica ou laboral, produz resíduos. Por exemplo, no ano de 2020 a média de geração de resíduos sólidos foi de 1,01 kg/habitante/dia, conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020). Se comparada com o ano anterior, aumentou em 2%, representando um aumento de 1,5 milhão de toneladas de resíduos sólidos coletados.

Em 2021, a disposição final foi responsável pela emissão de 58,4 MtCO₂e. Além do crescimento populacional e do aumento na geração de resíduos verificado desde 1970, também se observa uma ampliação do acesso aos serviços de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), em especial na taxa de coleta e nos índices de disposição final ambientalmente adequada. As emissões de metano em aterros sanitários representam umas das principais atividades emissoras de gases de efeito estufa em regiões metropolitanas (SEEG, 2023). Após esses dados foi desenvolvido o modelo de dinâmica de sistemas para analisar a proposta deste estudo, a Figura 7 apresenta o modelo proposto.

Figura 7 - Modelo de Dinâmica de Sistemas



Fonte: Autores (2023)

Para a definição das variáveis do modelo de simulação (Figura 7) foram utilizados trabalhos acadêmicos e governamentais da área de resíduos sólidos (ABRELPE, 2022; IBGE, 2022). A avaliação dessas foi executada com a participação de gestores ambientais e profissionais da área de resíduos sólidos. As variáveis selecionadas, bem como suas inter-relações com outras variáveis, as quais influenciam nos valores totais de geração e disposição final dos resíduos sólidos urbanos, são:

- A taxa de nascimento anual (Taxa de Natalidade), e a taxa de mortalidade anual (Taxa de Mortalidade), influenciam diretamente os fluxos de entrada e saída populacional (Nascimentos e Mortes), os quais determinam a população total (População) do município. Foi utilizada no modelo a taxa de crescimento natural ou vegetativo (total de nascimentos – total de mortes) a qual corresponde à única forma possível de crescimento ou redução da população mundial e, quando se analisa o crescimento de áreas específicas devem ser consideradas, também, as migrações;
- A quantidade média de resíduos (RSU geração) gerada por cada habitante multiplicada pela população total do município resulta na quantidade total de resíduos (RSU Per Capita) do município;
- A variável responsável pelo armazenamento da quantidade de RSU não coletado é o fluxo “Trat inadequado”, que por sua vez recebe seu valor a partir da multiplicação da quantidade média de resíduos (RSU gerado) pela taxa de RSU não coletado (RSU n Coletado Taxa).

Com essas variáveis desenvolvidas foram geradas variáveis auxiliares para separar os resíduos mais descartados, como papel/papelão, vidro, plástico e resíduo orgânico. A Tabela a seguir apresenta os dados e as seus valores.

Tabela 1 - Variáveis e valores do modelo

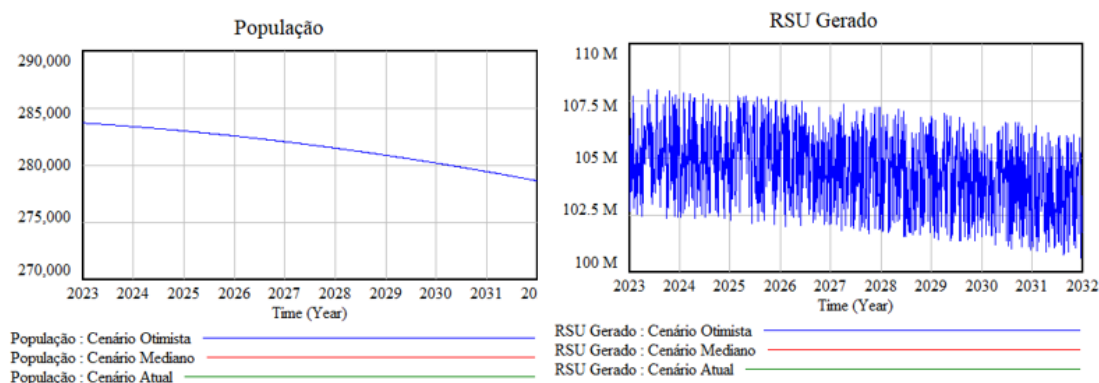
Variável	Valor
Taxa de Natalidade	Time([(0,0)-(3000,10)], (2023,0.0078), (2032,0.0068))
Taxa de Mortalidade	Time([(0,0)-(3000,10)], (2023,0.0088), (2032,0.0098))
População	Nascimentos-Mortes
RSU Gerado	População*RSU Percapita
Envio Aterro	RSU Gerado*Coleta Adequad Taxa
Trat Inadequado	RSU Gerado*RSU n Coletado Taxa
Vidro	RSU Não Coletado*Vid Taxa
Emissão Vidro	Vidro*CO ² Vidro
Metal	RSU Não Coletado*Met Taxa
Emissão Metal	Metal*CO ² Metal
Papel/Papelão	RSU Não Coletado*Pap Taxa
Emissão Pap/Papelão	"Papel/Papelão"*CO ² Pap
Plástico	RSU Não Coletado*Plast Taxa
EmissãoPlástico	Plástico*CO ² Plast
Orgânico	RSU Não Coletado*Org Taxa
Emissão Orgânico	Orgânico*CO ² Org

Fonte: Resultado do Estudo (2023)

IV. Resultadoss

Após a definição dos cenários para a experimentação dos modelos, foram executadas as simulações no simulador Vensim (2023) em um computador com processador Pentium Core i7 e 16 Gb de memória RAM. O tempo de execução da simulação foi na ordem de milionésimos de segundos. O horizonte de tempo simulado no experimento foi modificado em cada modelo, porém a configuração dessa variável fica a cargo do projetista / usuário, pois a mesma depende da análise a ser feita. As decisões, a partir dos resultados gerados pelos modelos, poderão envolver a redução da emissão de CO₂, outras análises e observações de interesse dos gestores ambientais e/ou organizacionais, desde que as mesmas sejam passíveis de execução nos modelos de simulação, poderão ser executadas, pois os modelos foram concebidos buscando simplificar a interação usuário-modelo, para que análises do tipo *what-if* sejam de simples execução. A Figura 8 apresenta o comportamento da população e o resíduo urbano gerado pela mesma.

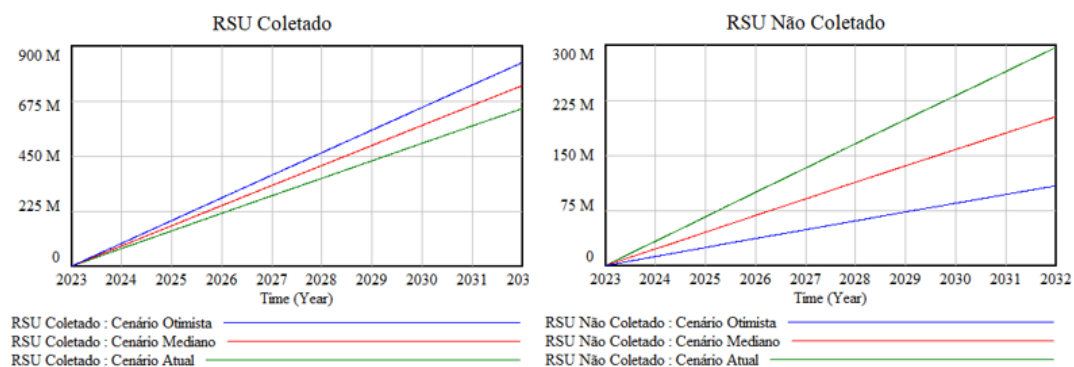
Figura 8 - População / RSU Gerado



Fonte: Autores (2023)

Os resíduos que não são recolhidos muitas vezes são depositados em lixões abertos, ao longo das ruas ou em leitos de rio e, esta prática induz a degradação ambiental e a traz riscos à saúde pública (Bezerra *et al*, 2020). Desta maneira, destaca-se a importância da discussão acerca de procedimentos como reciclagem e coleta seletiva. A Figura 9 apresenta as projeções de resíduo coletado e o não coletado. Percebe-se a proposta do estudo de coletar mais resíduos no decorrer da simulação.

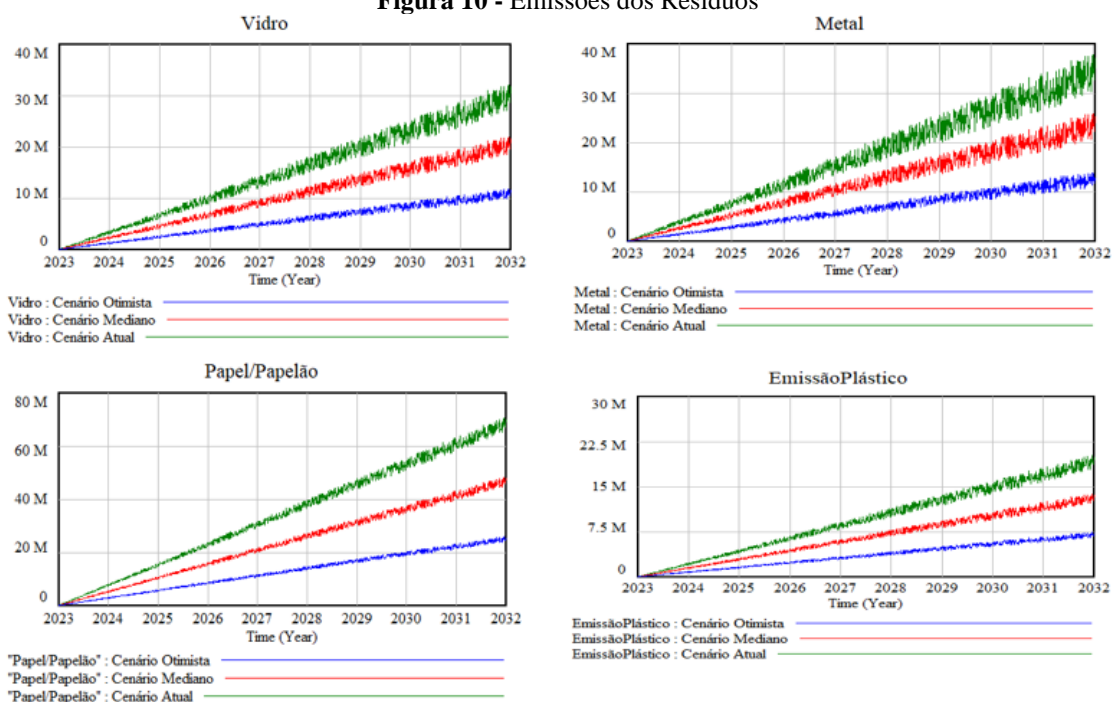
Figura 9 - RSU Coletado / RSU Não Coletado



Fonte: Autores (2023)

A Figura 9 representa a proposta do estudo, onde os cenários simulados foram responsáveis por aumentar a coleta de Resíduos Sólido Urbano em 62% no cenário otimista e 43% no cenário mediano, tais valores foram baseados no estudo de Nanda e Berruti (2021) onde destacam a importância de os governos buscarem alternativas para coletar resíduos de áreas esquecidas pelo poder público. A seguir a Figura 10 apresentam as emissões das variáveis estudadas.

Figura 10 - Emissões dos Resíduos



Fonte: Autores (2023)

Dentre as propostas simuladas o cenário com melhor desempenho ambiental foi o cenário otimista da coleta em maior volume de papel, o mesmo apresentou redução de emissão comparado ao cenário atual de aproximadamente 38%. O papel impacta diretamente no cotidiano dos seres vivos, a redução do descarte incorreto poderá auxiliar no desmatamento causado para produzir papel (Abadia *et al.*, 2022). O vidro coletado em maior quantidade também apresentou resultado significativo, o cenário otimista auxiliará em redução das emissões em até 34%. Ramos *et al.* (2022) destaca a importância da coleta do vidro, para os autores o vidro não é biodegradável e pode levar centenas ou até milhares de anos para se decompor na natureza.

Dentre os resíduos sólidos urbanos simulados, o plástico torna-se parte integrante das nossas vidas e o seu consumo aumentou exponencialmente em nosso cotidiano nos últimos 50 anos, sem quaisquer limitações porque são leves, duráveis, resistentes à corrosão pela maioria dos produtos químicos, fáceis de processar, de baixo custo e com uma diversidade de aplicações (Genc *et al.*, 2019). Os cenários simulados poderão reduzir o impacto ambiental (emissão de CO₂) entre 11% e 23%, tal resultado é importante para reforçar a importância da coleta correta dos resíduos além de reforçar a importância da reciclagem.

Por fim as contínuas emissões das partículas de metais pesados produzidos pelo homem podem ser absorvidas por vegetais e animais, causando intoxicações em todos os níveis da cadeia alimentar, caracterizando como poluentes ambientais significativos, devido a sua toxicidade, sendo um problema de importância crescente (Bezerra, 2021). No estudo o modelo apresentou resultado de redução de emissão de coleta de metais no cenário otimista de 16%, enquanto o cenário mediano apresentou redução de 13%. A Tabela 2 a seguir apresentam o resumo do acumulo de emissões por cenário.

Tabela 2 - Resumo dos resultados

	Atual	Mediano	Otimista
Vidro	5.810 t	4.170 t	2.987 t
Metal	6.954 t	6.008 t	5.981 t
Papel/Papelão	3.006 t	1.978 t	1.787 t
Plástico	7.340 t	6.487 t	5.150 t

Fonte: Autores (2023)

Para Pandit e Kateja (2023) a ampliação da reciclagem dos resíduos sólidos urbanos traz um triplo benefício: ambiental, pois reduz o descarte inadequado e minimiza a extração de recursos naturais; econômico, pois faz girar a economia com novos recursos

V. Conclusão

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) se configuram como uma problemática tanto no Brasil como em outras partes do mundo, exigindo que se pense em alternativas de como amenizar seus impactos negativos.

A destinação adequada dos resíduos sólidos é um dos grandes problemas enfrentados nas cidades brasileiras, sendo estimulada pelo aumento da produção cada vez mais de dejetos. O atual crescimento da população urbana está intrinsecamente ligado ao aumento das taxas de consumo, aumentando assim o uso de matérias-primas e conseqüentemente a geração de resíduos sólidos, refletindo nossos padrões de produção e consumo.

Portanto, considerando a proposta deste artigo e entre as análises realizadas, constatou-se nos dez anos simulados que o número de habitantes da região considerada para fins de estudo atingiu um total de 270.012 ao final do período de simulação. A partir disso foi possível estimar a produção de resíduos per capita no período, onde se constatou que a produção média anual de RSU será em torno de 320.000 toneladas. Considerando as metas da PNRS, visando a diminuir gradativamente a quantidade de material disposto em aterro, foram propostos três cenários com diferentes taxas de destinação correta do resíduo sólido urbano.

Quanto aos cenários simulados atingiram o objetivo proposto e também responderam a hipótese dinâmica gerada, os cenários confirmaram que a coleta com destino correto reduzirá os danos ambientais e também poderá servir de justificativa para o incentivo da reciclagem.

Ao findar este estudo, espera-se que o mesmo tenha contribuído para que os gestores e os governantes busquem novas opções diante do problema enfrentado com os RSU e, ao mesmo tempo, consigam encontrar meios de usufruir das vantagens proporcionadas pela reciclagem do plástico. Visando a continuidade deste estudo, como recomendação para futura pesquisa, indica-se uma investigação com mais resíduos sólidos urbanos levando em conta os benefícios que poderiam ser alcançados com a reciclagem em maior escala.

Referências

- [1]. Abrelpe - Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais. Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil. São Paulo: Abrelpe, Edição 2022.
- [2]. Arantes, Marcus Vinícius Carvalho; Da Silva Pereira, Raquel. Análise Crítica Dos 10 Anos De Criação E Implementação Da Política Nacional De Resíduos Sólidos (Pnrs) No Brasil. Revista Liceu On-Line, V. 11, N. 1, P. 48-66, 2021.
- [3]. Abadia, Gabriel Gomes Et Al. Avaliação Das Propriedades Físicas E Mecânicas Do Concreto Com Adição De Papel Kraft. 2022.
- [4]. Azadi, Saeed Et Al. Optimizing Cropping Pattern To Improve The Performance Of Irrigation Network Using System Dynamics—Powell Algorithm. Environmental Science And Pollution Research, V. 29, N. 43, P. 64547-64559, 2022.
- [5]. Barati, Ali Akbar; Pour, Milad Dehghani; Sardooei, Mohsen Adeli. Water Crisis In Iran: A System Dynamics Approach On Water, Energy, Food, Land And Climate (Weflc) Nexus. Science Of The Total Environment, V. 882, P. 163549, 2023.
- [6]. Brasil. Lei N. 12.305, De 2 De Agosto De 2010. Brasília, Df: Diário Oficial Da União. Seção 1. P. 3, , 2010.
- [7]. Brasil. Snis - Diagnósticos. Disponível Em: <Http://Antigo.Snis.Gov.Br/Diagnosticos>. Acesso Em: 11 Mar. 2023.
- [8]. Brasil. Diagnóstico Temático - Manejo De Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, Df: [S.N.].
- [9]. Brasil. Plano Nacional De Resíduos Sólidos. Brasília: Ministério Do Meio Ambiente, 2022a.
- [10]. Brasil. Diagnóstico Temático Manejo De Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, Df: [S.N.].
- [11]. Bezerra, Daniel Epifânio Et Al. Panorama Dos Resíduos Sólidos Urbanos Sob A Perspectiva De Um Grupo De Moradores Da Cidade De Areia-Pb. Brazilian Journal Of Development, V. 6, N. 1, P. 3472-3483, 2020.
- [12]. Bezerra, Emanuelle Da Silva. Aplicação Da Geoquímica Inorgânica Na Investigação Da Contaminação Ambiental De Sedimentos Do Rio Ipojuca, Caruaru/Pe, Brasil. 2021. Trabalho De Conclusão De Curso. Brasil.
- [13]. Delgado-Maciel, Jesús Et Al. The Evaluation Of Conceptual Design Through Dynamic Simulation: A Proposal Based On Triz And System Dynamics. Computers & Industrial Engineering, V. 149, P. 106785, 2020.
- [14]. Fferreira, Ana Carla; Barros, Raphael Tobias Vasconcelos. Panorama Dos Gastos Públicos Municipais Com Os Serviços De Limpeza Urbana E Manejo De Resíduos Sólidos: Uma Análise Da Região Metropolitana De Belo Horizonte (Mg). Engenharia Sanitaria E Ambiental, V. 26, P. 659-668, 2021.
- [15]. Ferreira, J. A., Costa, M., Tereso, A., & Oliveira, J. A. (2015). A Multi-Criteria Decision Support System For A Routing Problem In Waste Collection. In Evolutionary Multi-Criterion Optimization: 8th International Conference, Emo 2015, Guimarães, Portugal, March 29--April 1, 2015. Proceedings, Part Ii 8 (Pp. 388-402). Springer International Publishing.
- [16]. Forrester, J. W. Industrial Dynamics. Cambridge Ma: Productivity Press, 1961.
- [17]. Forrester, J. W. Industrial Dynamics: A Major Breakthrough For Decision Makers. Harvard Business Review, V. 26, N. 4, P. 37-66, 1958.
- [18]. Forrester, Jay W. Urban Dynamics. Imr; Industrial Management Review (Pre-1986), V. 11, N. 3, P. 67, 1970.
- [19]. Gao, Ge Et Al. A Systems Dynamics Simulation Study Of Network Public Opinion Evolution Mechanism. Journal Of Global Information Management (Jgim), V. 27, N. 4, P. 189-207, 2019.
- [20]. Genc, Ayten; Zeydan, Ozgur; Sarac, Selin. Cost Analysis Of Plastic Solid Waste Recycling In An Urban District In Turkey. Waste Management & Research, V. 37, N. 9, P. 906-913, 2019.
- [21]. Gonçalves, Marilson Alves.; Tanaka, Ana Karolina; Amedomar, André De Azevedo. Destinação Final Dos Resíduos Sólidos Urbanos: Alternativas Para A Cidade De São Paulo Através De Casos De Sucesso. Future Studies Research Journal, V. 5, N. 1, P. 96-129, 2013.
- [22]. Hafezi, Mahshid Et Al. Advanced Hydrogels For Cartilage Tissue Engineering: Recent Progress And Future Directions. Polymers, V. 13, N. 23, P. 4199, 2021.
- [23]. Junqueira, H. S.; Medeiros, D. L.; Cohim, E. Gerenciamento De Resíduos Sólidos Urbanos De Feira De Santana: Demanda Energética E Pegada De Carbono. Engenharia Sanitaria E Ambiental, V. 27, P. 125-139, 2022.
- [24]. Malczynski, Leonard A.; Lane, David C. Sublime Reason: When Isaac Asimov Met Jay Forrester. System Dynamics Review, V. 39, N. 1, P. 64-79, 2023.