

**UTILIZANDO UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANALISAR OS CENÁRIOS DO POTENCIAL DE BIOGÁS NO BRASIL**

**JÉSSICA CARVALHO SOBCZAK**

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**COSME POLESE BORGES**

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC

**CAROLINE RODRIGUES VAZ**

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

# UTILIZANDO UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANALISAR OS CENÁRIOS DO POTENCIAL DE BIOGÁS NO BRASIL

**Palavras-chave:** Biogás, Dinâmica de Sistemas, Simulação.

## 1. Introdução

No atual sistema social, grandes quantidades de resíduos orgânicos são desperdiçadas enquanto cada vez mais recursos fósseis são consumidos para atender às necessidades da sociedade. A razão deste consumo é sustentar os níveis de qualidade de vida, no entanto este sustento não considera o longo prazo. Os níveis atuais de consumo, causam o esgotamento do estoque de recursos e o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), além de outros gases de efeito estufa (GEEs), bem como de outros poluentes que afetam a saúde humana e a qualidade dos ecossistemas. Além disso, a população global é estimada para atingir nove bilhões de pessoas até 2050, como resultado, as sociedades serão cada vez mais confrontadas por desafios relacionados a manutenção do meio ambiente, como perdas de biodiversidade, insegurança de água e alimentos e rupturas econômicas e políticas (Ingrao et al., 2018).

Considerando a realidade do Brasil um país em desenvolvimento com grandes quantidades de emissões de GEE em função do desmatamento e da errônea disposição de resíduos orgânicos, o biogás e o biometano se apresentam como uma opção interessante para auxiliar na mitigação destes problemas, visto seus complementos para economia circular e aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Com o desenvolvimento também deve ocorrer um aumento da população causando um aumento expressivo da produção de resíduos urbanos, resíduos da criação de animais, do processamento da cana-de-açúcar e de estações de tratamento de efluentes. Ainda, segundo de Oliveira & Negro (2019) estes formam as quatro principais rotas tecnológicas que promoveram o desenvolvimento do Sistema de Inovação do Biogás no Brasil.

Tendo conhecimento destes impactos e evidenciando as principais rotas tecnológicas mencionadas, buscamos auxiliar com a questão destacada por Mariani (2018), sobre a necessidade de mecanismos mais específicos para mensurar o potencial de biogás oriundo das diferentes origens de resíduos do país. Sendo assim, nosso objetivo é estruturar uma estimativa do potencial de biogás oriundo de resíduos orgânicos no Brasil a longo prazo. Para isso, desenvolvemos um modelo com base na metodologia de Dinâmica de Sistemas, compreendida em Sterman (2000), tendo como base as formulas destacadas no trabalho de dos Santos, Vieira, de Nóbrega, Barros & Tiago Filho (2018) e dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018) sobre o potencial dos recursos energéticos.

Este artigo está estruturado em seis partes seguindo esta introdução sobre a descrição do problema, o referencial teórico acerca da importância do biogás na cadeia de resíduos e na redução de emissões, a metodologia de simulação utilizada, a construção do modelo, os resultados das projeções para o cenário base, uma discussão dos resultados e a conclusão.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1 Biogás

Trata-se de um gás composto principalmente de CH<sub>4</sub> (40-60%) e CO<sub>2</sub> (30-40%), além de outros gases em menores quantidades. O metano é um combustível valioso, é o principal composto do gás natural e quando é obtido de forma renovável é chamado de biometano. Contudo, a liberação deste gás na atmosfera é uma grande ameaça as mudanças climáticas, considerando seu potencial poluidor cerca de 21 vezes superior ao do CO<sub>2</sub>. A produção biológica de metano ocorre durante a decomposição de matéria orgânica sob condições

estrictamente anaeróbicas (sem a presença de oxigênio) sendo fundamental para a operação do ciclo natural de carbono. Com os métodos adequados de tratamento é possível a produção comercial de metano de forma renovável (Purwantini et al., 2014).

Os principais métodos para obtenção de biometano são biodigestores e aterros sanitários, sendo os resíduos mais comuns: urbanos, de animais e culturas energéticas dedicadas. O biogás é uma fonte de energia muito versátil (contrário as intermitentes como eólica e solar), principalmente devido ao seu valor energético e a facilidade de armazenamento. Portanto, a utilização potencial depende pouco de fatores como localização geográfica e estação do ano. O gás pode ser usado diretamente para aquecimento, geração de eletricidade, assim como substituto para aplicações de combustíveis fósseis como em veículos automotores (Pöschl, Ward, & Owende, 2010).

As tecnologias associadas a produção de biogás variam em três grandes segmentos: i) origem e logística da biomassa; ii) produção e tratamento do biogás; iii) distribuição e utilização. Assim os modelos de negócios permanecem locais e altamente personalizados. Estas variedades promovem um leque de oportunidades no âmbito brasileiro, os que vem ganhando destaque se referem a quatro rotas tecnológicas: o gerenciamento de resíduos urbanos, de resíduos da agricultura, principalmente da suinocultura e das indústria de bebidas, alimentos e cana de açúcar, como mostra a Figura 1 (De Oliveira & Negro, 2019).

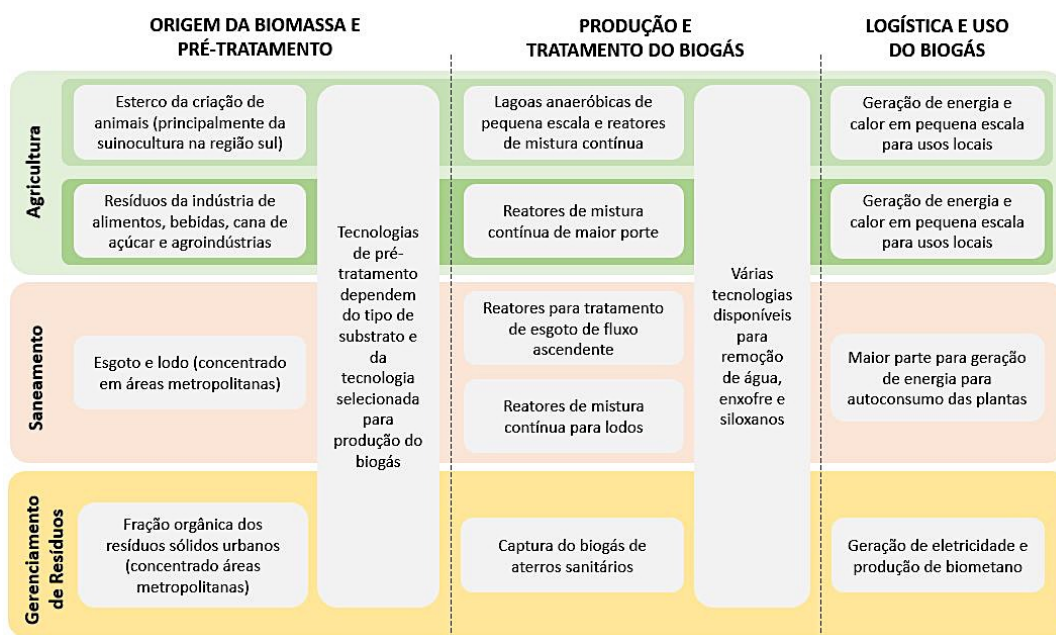


Figura 1. Principais rotas tecnológicas do STIBB. Fonte: Adaptado de Oliveira & Negro (2019)

## 2.2 Emissões de CO<sub>2</sub>

O Acordo de Paris une os países em um esforço comum para combater as mudanças climáticas e seus efeitos. Uma meta chave é a redução de emissões de GEE. Substituir os portadores de energia fóssil por opções renováveis de baixo carbono é um caminho fundamental para reduzir as emissões (Horschig, Welfle, Billig, & Thrän, 2019).

Muitas vezes, o biogás já é produzido naturalmente no tratamento de efluentes ou em aterros, sendo emitido para a atmosfera sem ter sido queimado para transformar o metano em dióxido de carbono. Essas emissões são também relacionadas ao aquecimento global, já que o metano contido no biogás é outro gás causador do efeito estufa, porém com potencial de aquecimento global vinte e uma vezes maior que o CO<sub>2</sub>. Logo, o aproveitamento desse biogás parece ser uma das medidas necessárias para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> (Mariani, 2018).

### 3. Metodologia

A Dinâmica de Sistemas (DS) é uma metodologia de modelagem que combina aspectos quantitativos e qualitativos com base na teoria de sistemas dinâmicos formulada pela primeira vez por Forrester (1961). Isso ajuda a entender sistemas dinâmicos e não-lineares usando estoque e fluxos, estruturas de realimentação e atrasos, tanto de materiais quanto de informações. O processo de modelagem usando DS é um processo iterativo. Os conhecimentos gerados durante cada etapa da modelagem podem ser usados para revisar outra etapa de modelagem (Horschig, Adams, Gawel, & Thrän, 2018). De acordo com Sterman (2000), a modelagem por meio da DS envolve cinco etapas como ilustra a Figura 2.

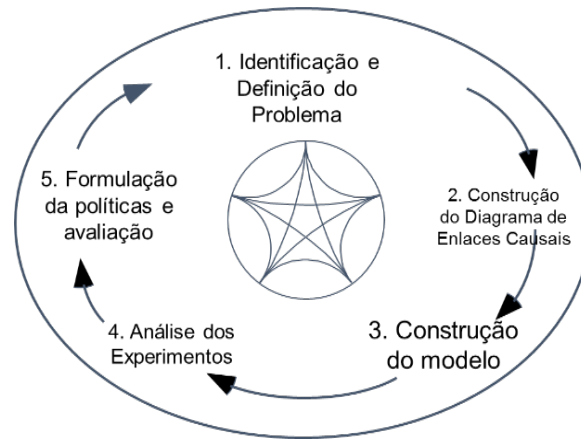


Figura 2. Etapas do processo de modelagem em DS. Fonte: Sterman (2000)

A DS é particularmente útil para obter uma visão sobre sistemas complexos e compostos através de simulações computacionais (Uriona & Grobbelaar, 2018). De acordo com Sterman (2000), os estoques são acumulados, eles caracterizam o estado do sistema e geram as informações sobre as quais as decisões e ações são baseadas. As ações dão inércia aos sistemas e fornecem memória. Os estoques criam atrasos acumulando a diferença entre a entrada para um processo e sua saída. Segundo Amaral (2012) os estoques representam algo que se acumula ao longo do tempo, enquanto o fluxo é algo que causa variação no estoque, fazendo com que ele aumente ou diminua. A Figura 3 e a Equação 1 ilustram como esta dinâmica funciona.

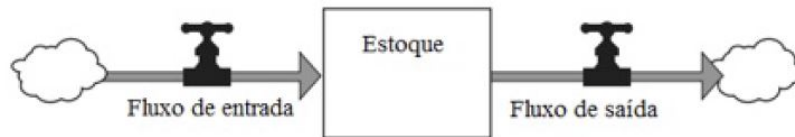


Figura 3. Modelo de estoque e fluxo. Fonte: Meadows (2008)

$$\text{Estoque}(t) = \text{Estoque}(t_0) + \int_{t_0}^t [\text{Fluxo de entrada}(s) - \text{Fluxo de saída}(s)] ds \quad (1)$$

### 4. Construção do Modelo

Dividimos esta seção em duas partes, a primeira ilustra as quatro principais rotas tecnológicas em potencial para a geração de biogás no Brasil nomeados nos seguintes setores: resíduos animais (*Feedstock Sector*), resíduos sólidos urbanos (*Urban Residue Sector*), vinhaça (*Agricultural Vinasse Sector*) e água residuais (*Waste Water Sector*) e exibe alguns dos dados

mais importantes para rodar o cenário base. A segunda parte ilustra o quinto setor que junta o potencial das quatro rotas, chamado de *Biogas Sum*.

#### 4.1. Setor de resíduos animais

A grande quantidade de dejetos animais, assim como os fluxos de resíduos orgânicos úmidos, representa riscos constantes de poluição com um impacto negativo no meio ambiente, se não gerenciados de forma sistêmica e otimizada. Para evitar as emissões de GEEs e a lixiviação de nutrientes e matéria orgânica para o meio ambiente, é necessário fechar os laços da produção para serem usados por medidas ótimas de reciclagem (Francesco, Clelia, Martina, Gaetano, & Giacomo, 2017).

Segundo o USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos), os principais produtores mundiais de carne são os Estados Unidos, a União Europeia, a China e o Brasil. Para o setor de resíduos animais, consideramos três estoques e fluxos referentes as três principais criações (gado, suínos e frangos). Como ilustra a Figura 4, o setor modelado para a produção de animais. Para o cálculo de cada potencial neste setor utilizamos a equação (2).

$$\text{Methane potential feedstock} = N \cdot I \cdot f \quad (2)$$

Onde:

N = número de animais;

I = produção de dejetos por animal;

f = produção de biogás por dejetos.

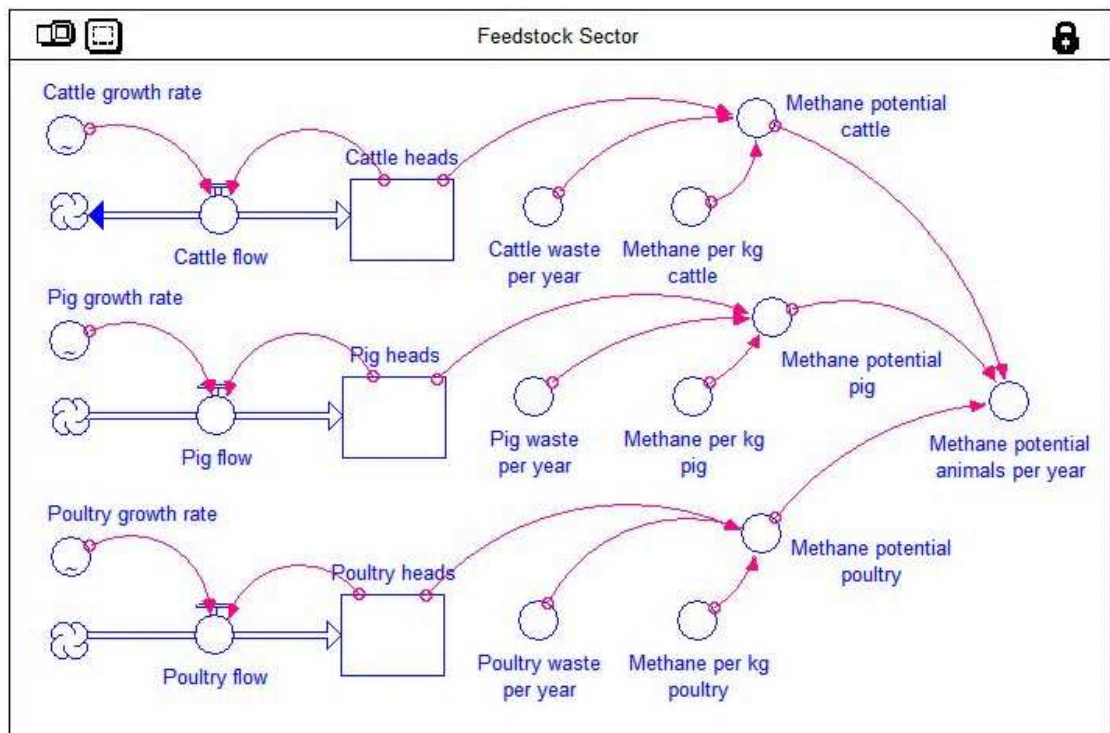


Figura 4. Setor de resíduos animais. Fonte: Elaborado pelos autores.

As variáveis dos fatores que afetam o potencial de metano, são apresentados na Tabela 1 e se referem a quantidade de animais em cada estoque, produção de dejetos e rendimento para a produção específica de biogás a partir de esterco de cada animal. Ao final o valor do potencial é somado antes de ser dirigido ao setor *Biogas Sum*.

Tabela 1 – Parâmetros para o cálculo do potencial oriundo de resíduos animais

<b>Animais</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Bovinos	$N_B (t = 2010)$	205.260,154 un.
	$I_{MB}$	10 kg/d·un.
	$f_{MB}$	12-18 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t
Suínos	$N_S (t = 2010)$	38.045,454 un.
	$I_{MS}$	2.25 kg/d·un.
	$f_{MS}$	12-24 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t
Frangos	$N_F (t = 2010)$	208.871,491 un.
	$I_{MG}$	0.18 kg/d·un..
	$f_{MG}$	27-32 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t

Fonte: Adaptado de dos Santos et al. (2018).

Todos os estoques são esperados para crescer ao longo dos próximos anos, com exceção do estoque de bovinos que permanece estável de 2020 até 2030, quando voltará a crescer (EPE, 2016). Esta pausa de crescimento afeta diretamente o potencial total, devido ao imenso potencial oriundo deste setor em comparação com o de outros animais.

#### 4.2 Setor de resíduos sólidos urbanos

Nas últimas décadas, a disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros está atraindo muita atenção devido ao impacto claramente negativo sobre o meio ambiente decorrente de sua gestão inadequada. Os RSU podem ser vistos como uma fonte amplamente disponível de energia doméstica, devido aos seus importantes conteúdos energéticos e sua produção contínua. A digestão anaeróbica aproveita mais de 90% da energia disponível dos resíduos biológicos através da produção de metano (Fernández-González, Grindlay, Serrano-Bernardo, Rodríguez-Rojas, & Zamorano, 2017).

O Brasil ainda apresenta grandes problemas relacionados a disposição destes resíduos, muito ainda é destinado a lixões abertos e poucos aterros sanitários fazem o aproveitamento do biogás. Mais que isso a coleta urbana ainda não separa adequadamente os resíduos para otimizar a cadeia e tornar o biogás uma realidade, como por exemplo no transporte público urbano como ocorre em países desenvolvidos (Mutter, 2019).

Para simular este crescimento em termos da fração orgânica dos resíduos urbanos, utilizamos da população do país e sua produção específica por habitante, a Figura 5 ilustra o modelo deste setor junto da equação (3) onde calcula-se o potencial. Três fatores merecem destaque, o crescimento populacional desacelera até se tornar negativo em 2047, a fração orgânica dos resíduos urbanos é uma função gráfica onde no início do período simulado é de 56% e no final de 30%, a produção de resíduos por habitante cresce de aproximadamente 1,068kg/dia para 1,35/d (EPE, 2016). Não foi alterada a eficiência da coleta pois não foram encontrados dados para sua evolução. Na Tabela 2 são apresentados os valores populacionais, de geração de resíduo, coleta e valores de potencial de produção de metano a partir de RSU. Utilizamos o valor médio de 170 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de resíduo.

O tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é um processo que tem crescido nos últimos anos. A conversão desses resíduos em metano oferece benefícios ao meio ambiente, como redução dos impactos ambientais e utilização como alternativa energética (Bouallagui, Cheikh, Marouani, & Hamdi, 2003).

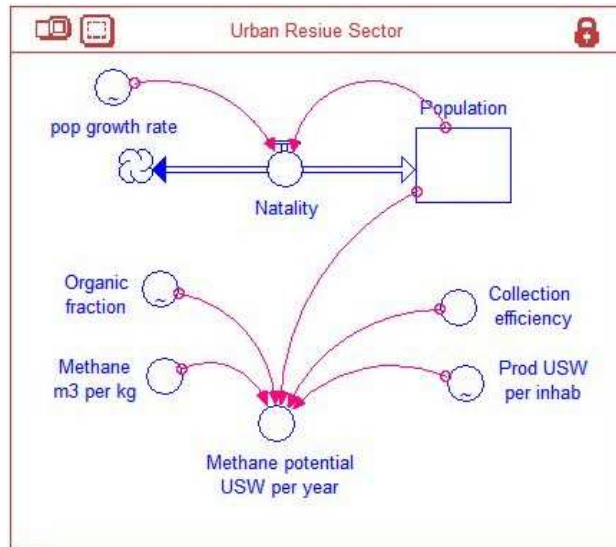


Figura 5. Setor de resíduos sólidos urbanos. Fonte: Elaborado pelos autores.

$$\text{Methane potential USW} = I \cdot P \cdot 365 \cdot E_{\text{MSW}} \quad (3)$$

Onde:

I = volume de geração de resíduos *per capita*;

P = população;

$E_{\text{MSW}}$  = eficiência da coleta de resíduos sólidos municipais;

$F_R$  = fator de produção de metano;

Tabela 2 – Parâmetros para o cálculo do potencial oriundo de RSU.

Parâmetros	Valores
População (t = 2010)	193.946.886 hab
I	1,068 kg/hab.d
$E_{\text{MSW}}$	88,87%
$FR_{\text{médio}}$	170 m <sup>3</sup> /t
$E_{\text{fv}}$	67%
$f_v$	0,312 m <sup>3</sup> /kg COD <sub>rem</sub>

Fonte: Adaptado de dos Santos et al. (2018)

### 4.3 Setor da vinhaça

Devido aos altos volumes de cana-de-açúcar produzidos no país, a vinhaça que é um subproduto do processamento seu processamento, é produzida em abundância no Brasil. A possibilidade de geração de energia a partir da digestão anaeróbica da vinhaça apresenta grande potencial (Bernal, dos Santos, Silva, Barros, & Ribeiro, 2017). Este fator pode ser evidenciado pela única usina de biogás que já venceu um leilão no mercado regulado de energia, no estado de São Paulo com potencial instalada de 20MW e por outro projeto de distribuição de biometano por gasodutos de refinarias até cidades próximas.

O crescimento da produção de cana teve uma retração junto a crise econômica que o país enfrentou nos últimos anos, mas a produção deve voltar a crescer a partir de 2020, é esperado também um aumento no nível tecnológico para reduzir os custos desta rota tecnológica visto que é nova para a indústria local (EPE, 2016). O setor da vinhaça é ilustrado na Figura 6. A Tabela 3 apresenta os dados utilizados para o cálculo do potencial da vinhaça, inicialmente,

como a estimativa da produção de metano a partir da vinhaça é um pouco mais complexa as equações estão em partes (4) a (7). O potencial é estimado pelo volume de cana produzido no país e pela Demanda Química de Oxigênio (DQO) dos resíduos.

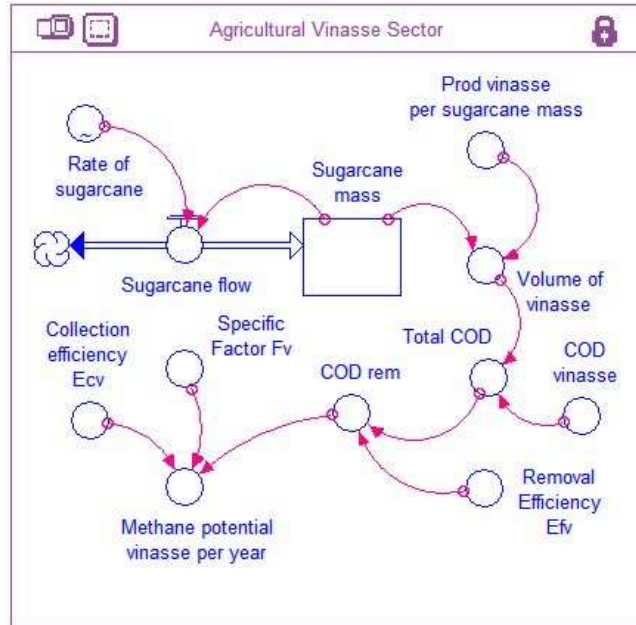


Figura 6. Setor de vinhaça. Fonte: Elaborado pelos autores.

$$V_V = P_V \cdot T_S \quad (4)$$

$$COD_{TOT} = V_V \cdot COD_V \quad (5)$$

$$COD_{REM} = COD_{TOT} \cdot E_{fv} \quad (6)$$

$$Q_{VCH_4} = COD_{REM} \cdot f_v \cdot E_{cv} \quad (7)$$

Onde:

$V_v$  = volume de vinhaça produzido;

$P_v$  = produção de vinhaça por unidade de massa de cana;

$T_s$  = massa de cana produzida no país;

$COD_{TOT}$  = carga total de DQO em todo o volume de vinhaça gerado;

$COD_v$  = valor típico de DQO para vinhaça;

$COD_{REM}$  = carga total de DQO removida por digestão anaeróbia;

$E_{fv}$  = eficiência de remoção da carga orgânica de vinhaça em um reator anaeróbio;

$E_{cv}$  = eficiência de coleta de gás;

$Q_{vch}$  = fluxo anual de biogás produzido a partir da vinhaça;

$f_v$  = fator específico de produção de biogás por massa de DQO removida.

Tabela 3 – Valores das variáveis referente ao setor da vinhaça.

Parâmetros	Valores
$P_v$	0,156 m <sup>3</sup> /t
$T_s$	658. 10 <sup>6</sup> t/ano



COD <sub>V</sub>	35,5 kg/m <sup>3</sup>
E <sub>fcv</sub>	90%
E <sub>fv</sub>	67%
f <sub>V</sub>	0,312 m <sup>3</sup> /kg COD <sub>rem</sub>

Fonte: Adaptado de dos Santos et al. (2018)

#### 4.4 Setor de águas residuais

O tratamento anaeróbio de águas residuais municipais em países em desenvolvimento tem importantes aplicações potenciais, considerando sua enorme falta de infraestrutura de saneamento e suas condições climáticas vantajosas (Noyola, Morgan-Sagastume & López-Hernández, 2006). Esses países que possuem grandes problemas de saneamento e poucos recursos, requerem estações de tratamento de esgotos –ETE– apropriadas e sustentáveis; dado que estes países localizam-se em geral em regiões de clima tropical e subtropical (temperaturas superiores a 20 °C), a digestão anaeróbia é uma tecnologia chave que gera subprodutos com valor agregado, como bioenergia, nutrientes e água para reuso (Torres, 2012).

O esgoto doméstico não tratado causa danos ecológicos severos poluindo a água do solo e da superfície, portanto, é importante descartá-lo com segurança. Sistemas de lodos ativados e reatores anaeróbios estão entre os métodos mais utilizados para tratamento de esgoto doméstico. Os reatores anaeróbios de efluentes podem suportar cargas orgânicas elevadas e simultaneamente produzir biogás como subproduto, nestas estações geralmente a energia gerada é consumida na própria unidade (dos Santos et al., 2016).

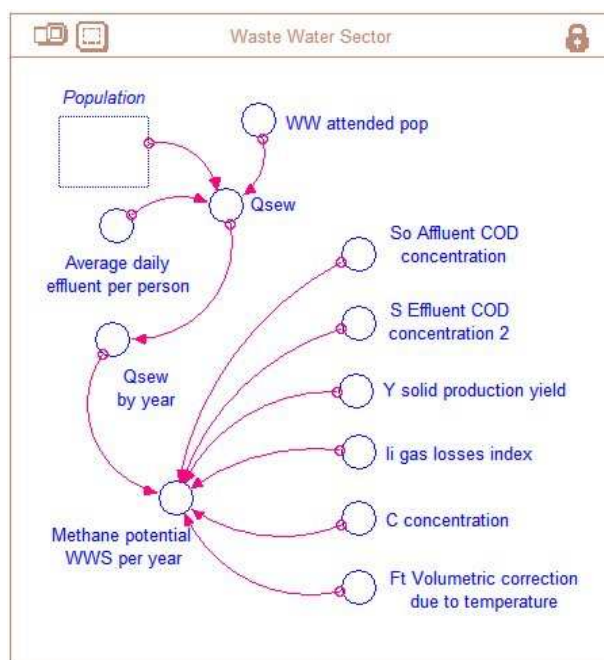


Figura 7. Setor de águas residuais. Fonte: Elaborado pelos autores.

Na tabela 4 estão representados os valores utilizados para os cálculos do potencial de metano do setor de águas residuais. A população atendida é ajustada para aumentar linearmente de 10% para 50% em 2050. A equação do potencial é ilustrada a seguir:

$$\text{Methane potential WWS} = Q_{sew} \cdot \frac{[S_0(1-Y) - S]}{f(T) \cdot c} \cdot (1 - I_i) \quad (7)$$

Onde:

$S_o$  = concentração de DQO no lodo;

$S$  = concentração de DQO do efluente;

$Y$  = rendimento de produção de sólidos;

$F_t$  = fator de correção volumétrico;

$I_i$  = índice de perda de gás no reator;

Tabela 4 – Valores das variáveis referente aos resíduos da vinhaça

Parâmetros	Valores
Geração de efluentes <i>per capita</i>	0,15 (m <sup>3</sup> /hab.dia)
$S_o$	0,715 (kg/m <sup>3</sup> )
$S$	0,251 (kg/m <sup>3</sup> )
$Y$	0,17 (kg <sub>lodo DQO</sub> /kg <sub>efluente DQO</sub> )
$F_t$	2,615
$I_i$	60%

Fonte: Adaptado de dos Santos et al. (2018).

#### 4.5 Potencial de produção de biogás

O biogás é comumente produzido com uma tecnologia de digestão anaeróbica (biodigestor) de diferentes fontes de biomassa. As fontes potenciais de biogás envolvem o uso de esterco animal, resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos e entre outros (Díaz-Trujillo & Nápoles-Rivera, 2019).

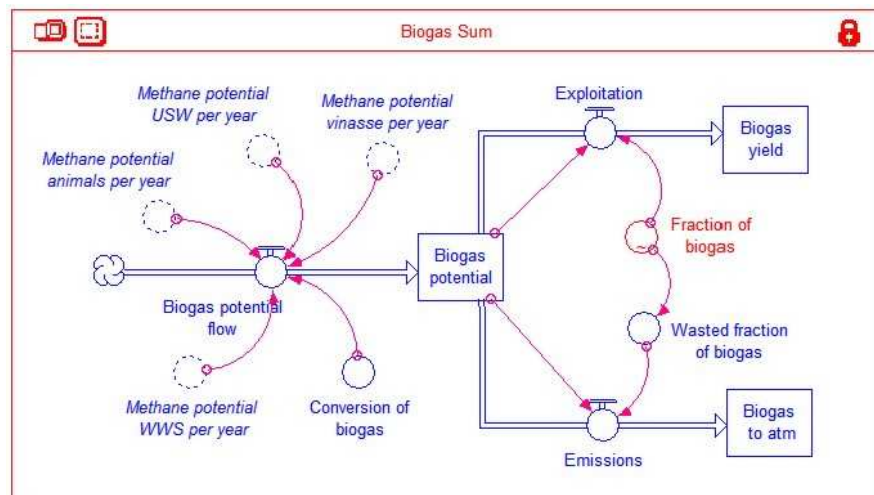


Figura 8. Setor da soma do potencial. Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao final, há um fluxo para o potencial de metano, bem como seu estoque. Há também estoque de metano produzido e um que vai para a atmosfera. Como a fração capturada para a produção de biogás é muito baixa, há também estoque e fluxo de emissões de CO<sub>2</sub>. Outras três variáveis representadas no modelo e que servirão para análise é o potencial de biogás, produção de biogás e fração de captura.

#### 5. Resultados e discussão

Os resultados do modelo são comparados aos encontrados em Santos et al., (2018) e

apresentados na Tabela 5. Embora o período simulado inicie em 2010, comparamos os resultados de 2012 por serem o mesmo que os autores utilizaram. A maioria dos resultados ficaram próximos aos valores máximos de referência. A diferença encontrada pode ser justificada pelos dados de entrada consultados em EPE (2016), principalmente ao observar o setor de RSU.

Tabela 5 – Potencial de biogás para cada tipo de resíduo

Tipo de resíduos	Biogás (10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> /ano)			
	Médio	Máximo	Modelo (t = 2012)	Modelo (t = 2050)
RSU	5956	7575	10004	8811
Vinhaça	1142	1214	1198	2018
Pecuária	16856	20228	20280	22933
Suinocultura	843	1124	1330	2993
Avicultura	607	658	645	1011
Águas residuais	116	148	143	838
TOTAL	25406	30801	33600	36604

Fonte: Adaptado de dos Santos et al. (2018).

Para o setor de RSU incluímos as variações na composição média dos resíduos que inclusive causam o efeito mais notável do modelo onde o potencial acaba sendo reduzido dos aterros sanitários no horizonte de análise (veja o Gráfico 1). Ao considerar a redução da fração orgânica média também deve-se considerar a redução associada a destinação. Em outras palavras o volume de resíduos deve aumentar, mas com a separação adequada, menos irá para aterros e mais para biodigestores.

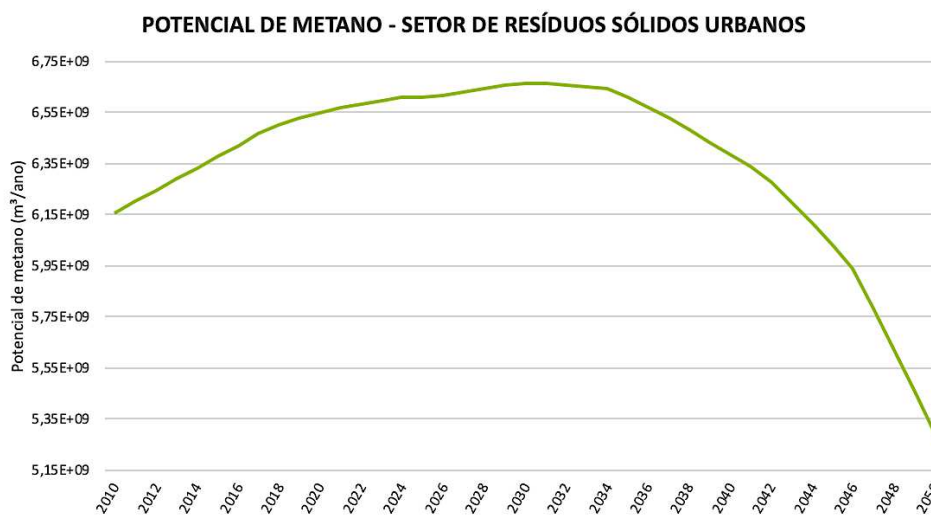


Gráfico 1 – Potencial RSU. Fonte: elaborado pelos autores.

Devido a intensificação da produção de etanol esperada para os próximos anos, o potencial da vinhaça cresce cerca de 68% no horizonte de análise (veja o Gráfico 2). A vinhaça é altamente estratégica para difusão do biogás devido a estrutura da cadeia da cana, onde os resíduos em boa parte são concentrados em grandes usinas de processamento.

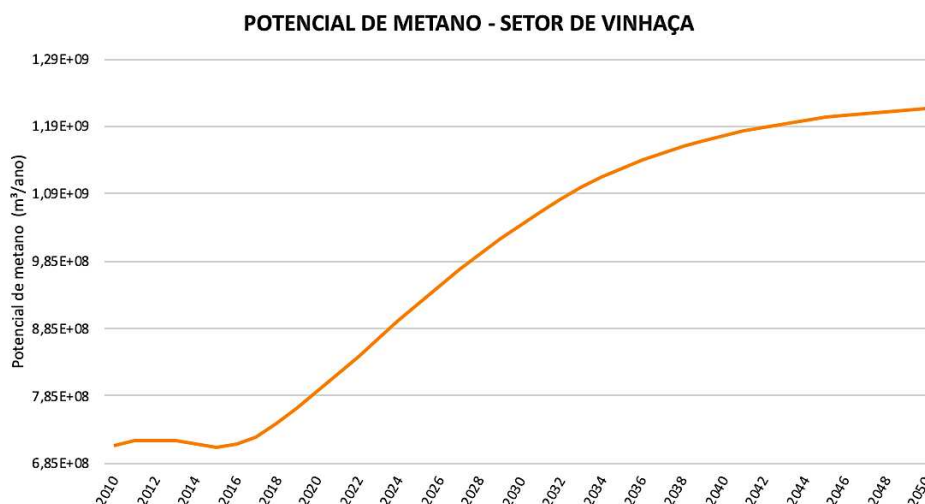


Gráfico 2 – Potencial vinhaça. Fonte: elaborado pelos autores.

A pecuária é destacada com o maior potencial, cerca de 62% no final do horizonte de análise. No entanto a pecuária extensiva, não produz os animais em confinamento, tornando-o também o potencial de mais difícil acesso. A pecuária deve crescer mais lentamente em comparação a avicultura e a suinocultura que apresentaram aumentos de 56% e 125%, respectivamente. Novamente, o crescimento pode ser justificado pelas práticas, pois suínos e aves são geralmente criados em confinamento, facilitando o manejo dos resíduos. O Gráfico 3 apresenta o potencial oriundo dos setores mencionados.

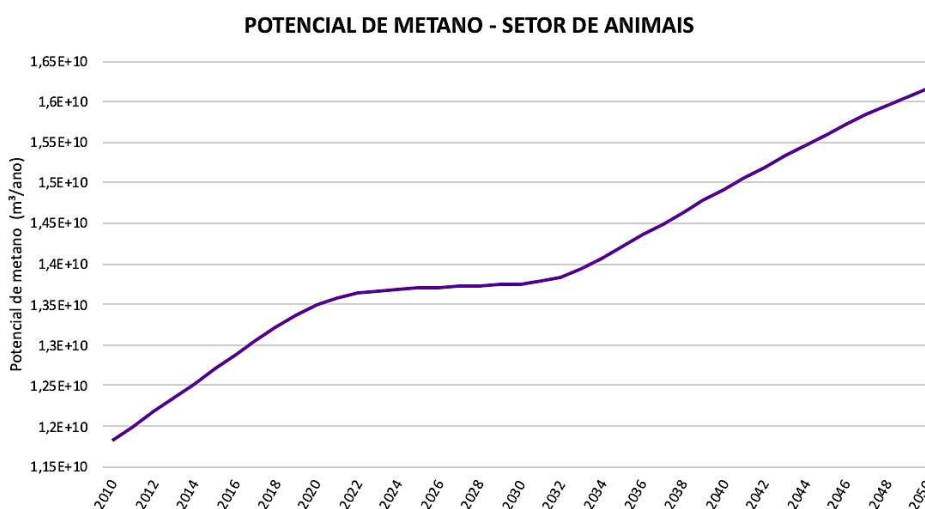


Gráfico 3 – Potencial resíduos animais. Fonte: elaborado pelos autores

O setor de águas residuais apresentou o maior aumento relativo, cerca de 482% como ilustra o Gráfico 4. Isso ocorre pela evolução no saneamento considerada no modelo, o crescimento linear de 10% a 50%. A participação deste setor no potencial é baixa, apenas cerca de 2,3%.

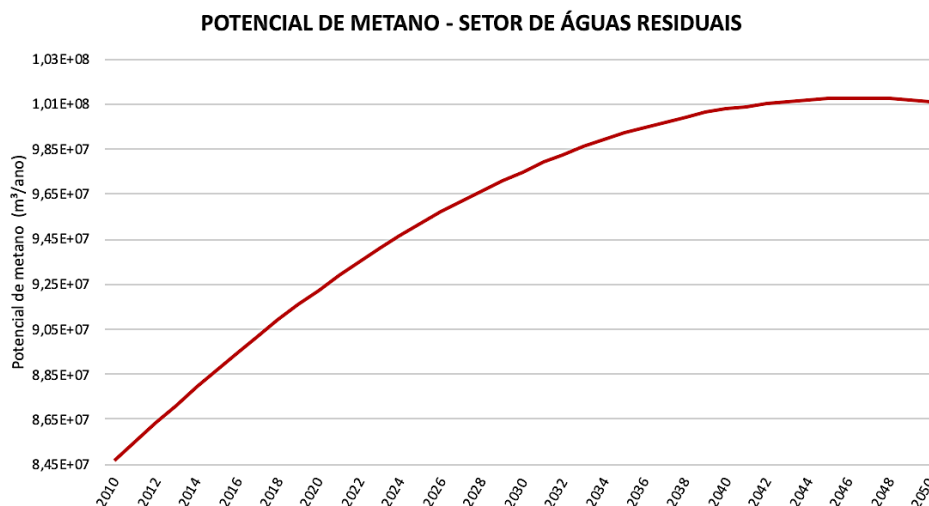


Gráfico 4 – Potencial águas residuais. Fonte: elaborado pelos autores.

### 5.1 Produção de biogás

Para apresentar os resultados em biogás convertimos o metano com um fator de 0,6 como ilustra o Gráfico 5 os resultados retratam uma situação hipotética onde a fração de captura, ou o biogás realmente explorado é função gráfica que ajustamos para crescer de 1% para 5% em 2030, depois para 20% em 2050. A estimativa de produção atingiu 7,8 bilhões de m<sup>3</sup> por ano em 2050 como ilustra o Gráfico 6.

A produção diária seria de 21 milhões de m<sup>3</sup>, este valor está de acordo com as expectativas da EPE. Em termos de energia, pode-se utilizar para conversão o equivalente a 1,42kWh por m<sup>3</sup> de biogás, este rendimento é associado a máquina térmica mais simples com aproveitamento de 22%. Portanto o modelo apresentou o potencial energético de 11TWh por ano por ano, cerca de 1,5% do consumo projetado para 2030. As estimativas projetadas por Santos (2018) indicam que o Brasil possi um potencial de produção de biogás entre 54 e 136 milhões de m<sup>3</sup>/d (70TWh/a). Portanto o cenário base indica uma exploração para 2050 ainda muito aquém do potencial atual do país.

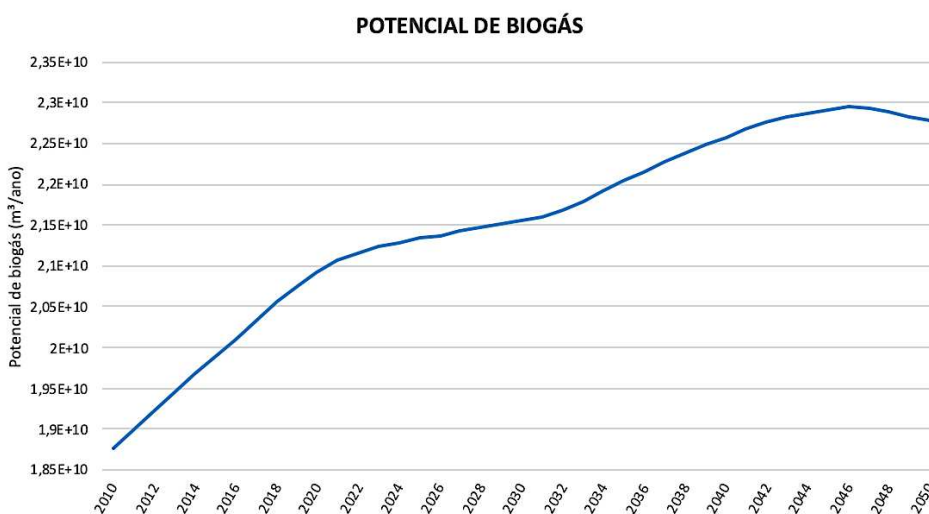


Gráfico 5 – Potencial oriundo das principais rotas tecnológicas do STIBB. Fonte: elaborado pelos autores.

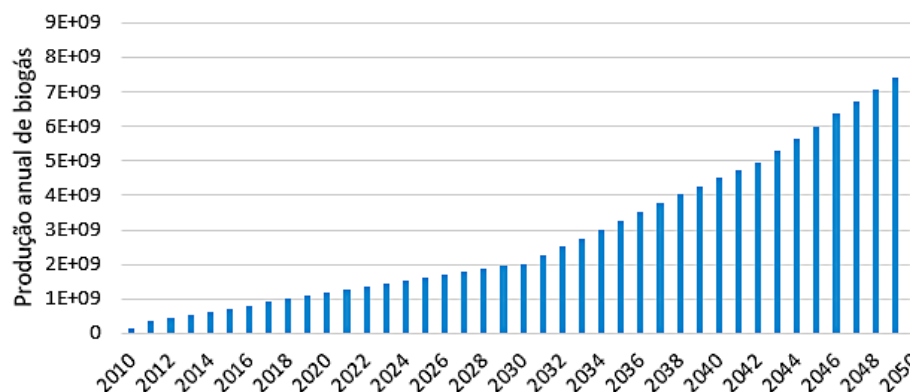


Gráfico 6 – Produção estimada no horizonte de análise. Fonte: elaborado pelos autores.

O Brasil tem um grande potencial de biogás, principalmente pela grande produção de resíduos orgânicos advindos dos animais, resíduos sólidos urbanos e da vinhaça. Por se tratar de um país onde todos esses setores são amplos, toneladas de resíduos são mal geridos e acabam por trazer diversos transtornos, além do desperdício de um valioso produto, visto que o biogás pode ser utilizado para geração de energia elétrica, energia térmica, biofertilizantes e biometano.

Os resultados explicitaram a necessidade de políticas relacionadas as práticas da pecuária, para facilitar o acesso ao potencial e sustentar o crescimento do setor no longo prazo. O biogás produzido é apenas uma aproximação, a produção deveria atingir 20% do potencial já em 2030 para uma efetiva difusão tecnológica.

## 6. Conclusão

Neste trabalho buscamos auxiliar a necessidade de sistematizar dados relacionados ao potencial de biogás no Brasil. O modelo proposto incluiu o desenvolvimento das principais rotas tecnológicas destacadas no Sistema Tecnológico de Inovação Brasileiro do Biogás. O resultado deste modelo pode ser utilizado para desenvolver perspectivas norteadoras para modelos de difusão tecnológica a partir da produção média de cada rota tecnológica e do número de novas plantas de biogás.

O cenário base deste modelo mostram que há um grande potencial a ser explorado, visto que a fração de tratamento ainda é muito baixa comparada ao que poderia ser. O desenvolvimento tecnológico da cadeia do biogás deve trazer benefícios ambientais, sociais e econômicos para o país, eis a importância de mapear ainda mais cadeias de resíduos por meio de modelos de simulação.

## 7. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEP - UFSC).

## Referências

- Amaral, J. A. A. d. (2012). *Desvendando sistemas*. São Paulo.
- Bernal, A. P., dos Santos, I. F. S., Silva, A. P. M., Barros, R. M., & Ribeiro, E. M. (2017). Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO2 emissions. *Journal of cleaner production*, 151, 260-271.
- Bouallagui, H., Cheikh, R. B., Marouani, L., & Hamdi, M. (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource technology* 86(1), 85-89.
- De Oliveira, L. G. S. D.; Negro, S. O. (2019) Contextual structures and interaction dynamics in the

- brazilian biogas innovation system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 107, p. 462–481.
- Díaz-Trujillo, L. A., & Nápoles-Rivera, F. (2019). Optimization of biogas supply chain in Mexico considering economic and environmental aspects. *Renewable Energy*
- Dos Santos, I. F. S., Vieira, N. D. B., de Nóbrega, L. G. B., Barros, R. M., & Tiago Filho, G. L. (2018). Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation Recycling* 131, 54-63.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2018). Potencial dos recursos energéticos no horizonte de 2050. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro.
- Fernández-González, J. M., Grindlay, A. L., Serrano-Bernardo, F., Rodríguez-Rojas, M. I., & Zamorano, M. (2017). Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. *Waste Management*, 67, 360-374.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. Pegasus Communications, Waltham, MA.
- Francesco, M., Clelia, G., Martina, Z., Gaetano, C., & Giacomo, D. F. (2017). *Biogas production by means of livestock compost*. Paper presented at the 21th International Trade Fair of Material & Energy Recovery and Sustainable Development, Rimini, Italy.
- Horschig, T., Adams, P., Gawel, E., & Thrän, D. (2018). How to decarbonize the natural gas sector: A dynamic simulation approach for the market development estimation of renewable gas in Germany. *Applied Energy*, 213, 555-572.
- Horschig, T., Welfle, A., Billig, E., & Thrän, D. (2019). From Paris agreement to business cases for upgraded biogas: Analysis of potential market uptake for biomethane plants in Germany using biogenic carbon capture and utilization technologies. *Biomass Bioenergy* 120, 313-323.
- Ingrao, C., Bacenetti, J., Bezama, A., Blok, V., Goglio, P., Koukios, E. G., . . . Zabaniotou, A. (2018). The potential roles of bio-economy in the transition to equitable, sustainable, post fossil-carbon societies: Findings from this virtual special issue. *Journal of cleaner production*
- Mariani, L. (2018). Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil.
- Meadows, D. (2008) *Thinking in Systems: a primer*. [S.l.]: Vermont: Chelsea Green Publishing, 2008.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., López-Hernández, J. E. (2006). Treatment of Biogas Produced in Anaerobic Reactors for Domestic Wastewater: Odor Control and Energy/Resource Recovery. *Review in Environmental Science and Bio/Technology*. 5(1), 93-114.
- Pöschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, 87(11), 3305-3321.
- Purwantini, E., Torto-Alalibo, T., Lomax, J., Setubal, J. C., Tyler, B. M., & Mukhopadhyay, B. (2014). Genetic resources for methane production from biomass described with the Gene Ontology. *Frontiers in microbiology*, 5, 634.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*.
- Torres, P. (2012). PERSPECTIVAS DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN PAÍSES EN DESARROLLO. *Revista EIA*, (18), 115-129.
- Uriona, M., & Grobbelaar, S. S. (2018). Innovation system policy analysis through system dynamics modelling: A systematic review. *Science Public Policy* 46(1), 28-44.