

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Ana Cristina Ruoso

**MODELO DE DIAGNÓSTICO PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS EM
ATERROS SANITÁRIOS**

Santa Maria, RS
2021

Ana Cristina Ruoso

**MODELO DE DIAGNÓSTICO PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS
SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Macklini Dalla Nora
Coorientador: Prof. Dr. Julio Cezar Mairesse Siluk

Santa Maria, RS
2021

Ruoso, Ana Cristina
Modelo de diagnóstico para a geração de biogás em
aterros sanitários / Ana Cristina Ruoso.- 2021.
187 p.; 30 cm

Orientador: Macklini Dalla Nora
Coorientador: Julio Cezar Mairesse Siluk
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, RS, 2021

1. Aterro sanitário 2. Biogás 3. Metano 4. Fatores
operacionais. 5. Modelo de Diagnóstico I. Dalla Nora,
Macklini II. Mairesse Siluk, Julio Cezar III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a Ana Cristina Ruoso. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: anacristinaruso@gmail.com

Ana Cristina Ruoso

**MODELO DE DIAGNÓSTICO PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS
SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 16 de março de 2021:

Macklini Dalla Nora, Dr. (UFSM) - Videoconferência
(Presidente/Orientador)

Julio Cezar Mairesse Siluk, Dr. (UFSM) - Videoconferência
(Coorientador)

Vinícius Jacques Garcia, Dr. (UFSM) - Videoconferência

Paulo Smith Schneider, Dr. (UFRGS) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram, inspiraram e torceram por cada conquista, assim como sempre me apoiaram para melhorar como indivíduo e profissional, promovendo todas as oportunidades da minha vida por meio do seu amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me contemplar com saúde para o desenvolvimento deste trabalho. Assim como agradeço aos meus pais pelo apoio e amor incondicionais, que me proporcionam oportunidade de buscar crescimento profissional e, também, por serem meus exemplos de vida como pessoas e profissionais.

Agradeço ao professor orientador Macklini Dalla Nora por guiar meu desenvolvimento científico, profissional e pessoal. Além disso, agradeço por ter me dado a oportunidade de ser sua orientada, pela confiança em meu trabalho, atenção para com minhas dúvidas e apoio durante toda a pesquisa.

Agradeço ao meu coorientador Júlio Cezar Mairesse Siluk por todo o auxílio no desenvolvimento deste trabalho, confiança depositada e, também, pela oportunidade de ser integrante do Núcleo de Inovação e Competitividade, onde me desenvolvi como profissional e indivíduo.

Agradeço todos os colegas do Núcleo de Inovação e Competitividade, os quais se tornaram amigos e fizeram grande diferença no meu cotidiano. Agradeço pela colaboração, discussões e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, aprendi muito com todos e almejo meu crescimento profissional juntamente com o de vocês.

Agradeço os amigos que fiz durante esse período e as amigadas que se fortaleceram. Agradeço as minhas amigas de apartamento, as quais sempre me apoiaram quando necessário.

Por fim, é impossível expressar em palavras a gratidão por ter compartilhado minha vida durante esse período com todas as pessoas. A todos, muito obrigada!

RESUMO

MODELO DE DIAGNÓSTICO PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

AUTORA: Ana Cristina Ruoso
ORIENTADOR: Prof. Dr. Macklini Dalla Nora
COORDENADOR: Prof. Dr. Julio Cezar Mairesse Siluk

O crescimento demográfico, a urbanização e a industrialização são os principais fatores para o aumento expressivo da produção de resíduos sólidos urbanos. Concomitante a esse cenário, o atual desafio dos países é atender à crescente demanda por energia, mitigando as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e abdicando do uso de recursos não renováveis. Assim, os sistemas de recuperação de energia a partir do biogás em aterros sanitários representam uma solução. Todavia, o cenário brasileiro de recuperação de gás de aterro é pouco eficiente devido às incertezas da taxa de geração, tendo em vista que o impacto dos fatores que influenciam nesse processo é vinculado a relações empíricas. Portanto, a decisão sobre a recuperação de biogás pelos gestores é uma tarefa difícil que deve ser tomada com base em fatores objetivos e mensuráveis. Diante do contexto, o objetivo deste estudo é construir uma modelagem capaz de mensurar o impacto dos diversos fatores internos dos aterros sanitários na produção de biogás no Brasil com foco no aprimoramento da geração de metano. A modelagem dos fatores em uma estrutura que calcula o impacto de cada fator na geração de biogás e sua interrelação foi conduzida pela Análise Multicritério de Apoio a Decisão (MCDA), fazendo-se uso do método de *Analytic Hierarchy Process* (AHP). A estrutura hierárquica foi utilizada para a construção do mapa estratégico da relação de causa e efeito entre os fatores operacionais e os fatores da biodegradação na geração de metano. Para complementar a modelagem de diagnóstico, foi realizada a mensuração do desempenho das empresas, quanto ao sistema de geração de biogás, a partir de um Sistema de Mensuração de Desempenho (SMD) baseado em *Key Performance Indicators* (KPI). A obtenção dos valores necessários para a modelagem do diagnóstico ocorreu pela aplicação de três instrumentos de pesquisa, que correspondem à validação dos fatores, ponderação dos fatores e avaliação do desempenho das empresas. Os resultados demonstraram que o fator operacional que mais impacta no sistema de geração de metano é o sistema de revestimento, seguido do sistema de drenagem de gás e gerenciamento de líquidos. Enquanto que os fatores da biodegradação (grandezas do sistema) que mais impactam no processo são o teor de umidade e a fração de carbono orgânico. Quanto aos resultados da mensuração de desempenho, uma das empresas apresentou desempenho plenamente satisfatório, enquanto que as outras empresas alcançaram desempenho potencialmente satisfatório com relação ao nível de atingimento dos fatores operacionais. A menor contemplação ocorreu para o fator de aprimoramento da atividade microbiana. Por fim, foi desenvolvida uma ferramenta de autodiagnóstico, afim de auxiliar empresas na mensuração do desempenho quanto à geração de biogás e aprimoramento do sistema.

Palavras-chave: Aterro sanitário. Biogás. Metano. Fatores operacionais. Modelo de Diagnóstico.

ABSTRACT

DIAGNOSTIC MODEL FOR BIOGAS GENERATION IN SANITARY LANDFILLS

AUTHOR: Ana Cristina Ruoso

ADVISOR: Prof. Dr. Macklini Dalla Nora

CO-ADVISOR: Prof. Dr. Julio Cezar Mairesse Siluk

Demographic growth, urbanization, and industrialization are the main factors for the increase in the production of solid waste. Parallel to this scenario, countries current challenge is to meet the growing energy demand, reducing emissions of greenhouse gases and abdicating the use of non-renewable resources. Thus, energy recovery systems from biogas in landfills represent a solution. However, the Brazilian landfill gas recovery scenario is inefficient due to the uncertainty of the generation rate, considering that the impact of the factors that influence this process is linked to empirical relationships. Therefore, the decision on biogas recovery is a difficult task that must be made based on objective and measurable factors. Given this context, the goal of this study is to build a model to measure the impact of the various internal factors of landfills on biogas production in Brazil with focus on improving methane generation. The modeling of the factors in a structure that calculates each factor's impact in the biogas generation and its interrelation was conducted by Multiple-criteria decision analysis (MCDA), using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. The hierarchical structure was used to build the strategic map of the cause-and-effect relationship between operational factors and biodegradation factors in methane generation. Complementing the diagnostic modeling, the performance measurement regarding the biogas generation system was checked with a Performance Measurement System (SMD) based on Key Performance Indicators (KPI). The obtaining of the necessary values for the diagnosis modeling occurred through the application of three surveys, which correspond to the validation of the factors, weighting of the factors and evaluation of the companies' performance. The results showed that the operational factor that most impacts the methane generation system is the coating system followed by the gas drainage system and liquid management. While the biodegradation factors (system quantities) that most impact the process are the moisture content and the fraction of organic carbon. Regarding the performance measurement results, one of the companies presented a fully satisfactory performance, while the other companies achieved potentially satisfactory performance in relation to the level of achievement of the operational factors. The least contemplation occurred for the factor improvement of microbial activity. Finally, a computational self-diagnosis tool was developed to assist companies measure performance in biogas generation and system improvement.

Keywords: Sanitary landfill. Biogas. Methane. Operational factors. Diagnostic model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de comercialização de créditos de descarbonização.	30
Figura 2 – Esquema do funcionamento básico de um aterro sanitário.....	39
Figura 3 – Estrutura hierárquica da AHP.....	48
Figura 4 – Enquadramento metodológico.	53
Figura 5 – Evolução da quantidade de plantas e volume de biogás no Brasil.	56
Figura 6 – Localização das plantas de biogás no território brasileiro.	56
Figura 7 – Fluxograma do trabalho.	58
Figura 8 – Processo da revisão sistemática da literatura.	60
Figura 9 – Exemplo de questão do IPI1.	63
Figura 10 – Exemplo de questão do IPI2.	64
Figura 11 – Exemplo de questão par-a-par do IPI2.....	65
Figura 12 – Escala ilustrativa para a avaliação dos especialistas.	66
Figura 13 – Matriz de amarração.	81
Figura 14 – Estrutura preliminar da geração de metano e os fatores de influência...87	
Figura 15 – Grandezas do processo de geração de metano.	91
Figura 16 – Sistema de drenagem de gás.	95
Figura 17 – Gerenciamento de líquidos.	98
Figura 18 – Características do local.	99
Figura 19 – Estimativa da geração de metano em aterro sanitário.	101
Figura 20 – Disposição de resíduos.	102
Figura 21 – Sistema de revestimento.....	103
Figura 22 – Aprimoramento da atividade microbiana.	106
Figura 23 – Estrutura hierárquica dos fatores operacionais.	109
Figura 24 – Nível de atingimento do fator operacional pelas empresas.....	116
Figura 25 – Nível de atingimento médio dos fatores operacionais.	118
Figura 26 – Análise de sensibilidade da ponderação.	121
Figura 27 – Relação de causa e efeito na biodegradação.	123
Figura 28 – Tela inicial.	129
Figura 29 – Instrumento de coleta de informações da ferramenta.	130
Figura 30 – Resultados gerais.....	131
Figura 31 – Resultados dos indicadores.	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Evolução do ambiente regulatório quanto ao uso do biogás.	27
Quadro 2 – Pesquisas brasileiras sobre biogás de aterros sanitários.	33
Quadro 3 – Pesquisas internacionais.	34
Quadro 4 – Lista de especialistas.	66
Quadro 5 – Fatores operacionais, indicadores e escala de avaliação IPI3.	68
Quadro 6 – Exemplo de indicador, alternativas e escala de desempenho.	77
Quadro 7 – Fatores operacionais encontrados a partir da revisão sistemática da literatura.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência de coleta de biogás de acordo com o clima e resíduo.	42
Tabela 2 – Escala de comparação do AHP.....	48
Tabela 3 – Grau de impacto dos fatores.	65
Tabela 4 – Processo para aplicação da AHP.....	73
Tabela 5 – Variáveis de comparação.....	74
Tabela 6 – Índice randômico.....	75
Tabela 7 – Escala de avaliação do desempenho das empresas.....	79
Tabela 8 – Composição de resíduo e fração de carbono orgânico degradável. ..	94
Tabela 9 – Ponderação média dos fatores operacionais.	110
Tabela 10 – Mensuração do desempenho das empresas.....	114
Tabela 11 – Desempenho das empresas de acordo com o fator operacional. ..	115
Tabela 12 – Nível de atingimento médio dos indicadores.	118

LISTA DE ABREVIações

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Análise Hierárquica de Processos)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EIA	U.S. <i>Energy Information Administration</i>
GEE	Gases causadores do efeito estufa
IPI	Instrumento de pesquisa de informação
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
LBPP	Usina de biogás ou biotérmica (<i>landfill biogas power plants</i>)
LFG	Gás de aterro (biogás)
MCDA	<i>Multi Criteria Decision Aid</i> (Análise Multicritério de Apoio a Decisão)
MSW	Resíduos sólidos municipais
RSL	Revisão sistemática da literatura
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA	25
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Objetivo geral	25
1.2.2	Objetivos específicos	25
1.3	JUSTIFICATIVA	25
1.4	RELEVÂNCIA	32
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	37
2	REFERENCIAL TEÓRICO	39
2.1	ATERRO SANITÁRIO	39
2.1.1	Biogás	43
2.1.1.1	<i>Biometano</i>	45
2.1.2	Lixiviados	45
2.2	MODELAGEM DE DIAGNÓSTICO	46
2.2.1	Analytic Hierarchy Process (AHP)	47
2.2.2	Key Performance Indicators (KPI)	49
2.2.3	Mapa estratégico	50
3	METODOLOGIA	53
3.1	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	53
3.2	CENÁRIO NACIONAL	55
3.3	ETAPAS DA PESQUISA	57
3.3.1	Revisão sistemática da literatura (RSL)	59
3.3.2	Instrumentos de pesquisa de informações (IPI)	62
3.3.2.1	<i>IPI1-Instrumento de pesquisa para validação de fatores operacionais de aterros sanitários para geração de metano</i>	62
3.3.2.2	<i>IPI2-Fatores operacionais de aterros sanitários: como melhorar a geração de metano?</i>	63
3.3.2.3	<i>IPI3-Qual o desempenho da sua empresa quanto a geração de biogás?</i>	68
3.3.3	Modelagem dos fatores operacionais para a ponderação do impacto	72
3.3.4	Modelagem de mensuração do desempenho por Key Performance Indicators	77
3.3.5	Avaliação da causa e efeito na geração de metano	80
3.4	MATRIZ DE AMARRAÇÃO	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
4.1	FATORES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E VALIDAÇÃO COM OS ESPECIALISTAS	83
4.2	REPRESENTAÇÃO DOS FATORES, SUAS INFLUÊNCIAS E LIMITAÇÕES	90
4.2.1	Fatores relacionados ao processo de biodegradação de RSU	91
4.2.1.1	<i>Temperatura</i>	92
4.2.1.2	<i>Teor de umidade</i>	92
4.2.1.3	<i>pH e alcalinidade</i>	93
4.2.1.4	<i>Potencial redox (Eh)</i>	93
4.2.1.5	<i>Fração de carbono orgânico</i>	94
4.2.1.6	<i>Densidade</i>	94
4.2.2	Fatores e subfatores operacionais	95

4.2.2.1	<i>Sistema de drenagem de gás</i>	95
4.2.2.2	<i>Gerenciamento de líquidos</i>	97
4.2.2.3	<i>Características do local</i>	99
4.2.2.4	<i>Disposição de resíduos</i>	101
4.2.2.5	<i>Sistema de revestimento</i>	103
4.2.2.6	<i>Aprimoramento da atividade microbiana</i>	105
4.2.3	Barreiras para o aprimoramento da geração e recuperação de biogás no Brasil	107
4.3	PONDERAÇÃO DO IMPACTO DOS FATORES OPERACIONAIS	108
4.4	ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS EMPRESAS QUANTO À GERAÇÃO DE BIOGÁS	113
4.5	MAPA DE CAUSA E EFEITO NA GERAÇÃO DE METANO	122
4.6	FERRAMENTA DE AUTODIAGNÓSTICO.....	127
5	CONCLUSÕES	133
5.1	LIMITAÇÕES	135
5.2	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	135
	REFERÊNCIAS	137
	APÊNDICE A – INSTRUMENTO DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO 1 ..	157
	APÊNDICE B – INSTRUMENTO DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO 2 ..	163
	APÊNDICE C – INSTRUMENTO DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO 3 ..	177

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico, a urbanização e a industrialização são os principais fatores para o aumento expressivo da produção de resíduos sólidos urbanos. Até 2025, serão gerados 6 milhões de toneladas de resíduos por dia, isto é, 4 bilhões de toneladas até 2100 (WEC, 2016). Assim, a gestão de resíduos é um grande desafio, principalmente nos países em desenvolvimento, sendo que a falta de gerenciamento adequado de resíduos pode resultar em impactos negativos ao meio ambiente e sistemas de energia e água (YUAN; CHIUEH; LO, 2019).

O descarte é a etapa final no gerenciamento de resíduos, sendo que três quartos dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são coletados e não são tratados de forma sustentável (KHAN; KABIR, 2020). Globalmente, cerca de 71% dos RSU são descartados em aterros sanitários (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018). Estes, evoluíram de lixões a céu aberto para instalações projetadas a fim de conter e tratar os resíduos, evitando danos à saúde e segurança pública e minimizando os impactos ambientais (RAHIMI *et al.*, 2020). A degradação dos resíduos nos aterros sanitários produz dois produtos basicamente, o lixiviado e o biogás. Afim de conter os impactos ambientais que os produtos do aterro podem causar, o local de instalação do aterro é escavado e revestido com um sistema que inclui camadas para proteger as águas subterrâneas, sistemas de drenagem e tratamento para o lixiviado e biogás (BRASIL, 2015).

O gás de aterro é composto principalmente por dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), ambos gases causadores do efeito estufa (GEE). O metano tem potencial de aquecimento global de 21 a 25 vezes maior que o CO_2 e constitui de 40 a 60% em volume de gás do biogás (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020). Dessa maneira, os aterros são as maiores fontes de emissões antrópicas de gás metano no mundo, representando quase 30% do total de emissões deste gás (EL-FADEL; ABI-ESBER; SALHAB, 2012).

Uma solução para as emissões de metano nos aterros sanitários é a implementação de sistemas de recuperação de energia de biogás (PURMESSUR; SURROOP, 2019). O biogás pode ser convertido em calor, eletricidade e/ou “combustível verde”, devido ao seu elevado poder calorífico, de aproximadamente 21 MJ/m^3 (AMINI; REINHART; MACKIE, 2012). Conforme Mohsen, Abbassi e Dutta (2019), a coleta de biogás e a geração de energia elétrica reduzem 78% das emissões

de GEE em relação a queima direta de metano em *flares*. Portanto, se gerenciado adequadamente, o biogás representa fonte de energia renovável e distribuída para atender a várias demandas populacionais e, conseqüentemente, estratégias de mitigação de GEE (LI *et al.*, 2020; SALIHOGLU *et al.*, 2018).

A geração de energia a partir de uma tonelada de RSU é de aproximadamente 6,5 a 10,0 GWh de eletricidade anualmente (YECHIEL; SHEVAH, 2016), o equivalente ao consumo de até 62500 casas no mesmo período, considerando o consumo médio residencial de 160 kWh/mês (EPE, 2017a). No Brasil, são gerados 79 milhões de toneladas de RSU por ano, das quais 59,5% são destinadas aos aproximados 700 aterros sanitários em operação (ABRELPE, 2019). Apesar do número significativo de aterros sanitários, o país possui apenas 22 usinas de biogás (*landfill biogas power plants* - LBPPs). A capacidade total das LBPPs é em torno de 178 MW, o que representa somente 0,0946% na matriz energética brasileira, já que o país tem potência instalada de 173 GW (ANEEL, 2020b). Por outro lado, o Reino Unido, cerca de três vezes menor que o Brasil em população, possui 442 LBPPs, com capacidade de 1,05 GW (LIMA *et al.*, 2018). Essas informações destacam o considerável potencial inexplorado de geração e utilização do biogás em aterros no Brasil.

A geração e captação de biogás nos aterros sanitários brasileiros é pouco eficiente devido à incerteza da taxa de geração e falhas na captação, resultando em decisões receosas e, conseqüentemente, ferramentas mal aplicadas que influenciam nos fatores operacionais dos aterros. O impacto de cada um dos fatores operacionais e internos dos aterros sanitários (umidade, degradação, estrutura, fator de oxidação, sistemas de drenagem, idade do aterro, entre outros), ou o efeito sinérgico destes na geração de biogás, entretanto, não é avaliado. Assim, a tomada de decisão pelos gestores é uma tarefa difícil devido à incerteza da geração de biogás e a falta de informações técnicas e econômicas para alterações dos sistemas operacionais. Com isso, é imprescindível que os fatores operacionais sejam objetivos e mensuráveis para auxiliar os gestores em projetos desse segmento, a fim de se maximizar a geração de biogás e aumentar a competitividade na matriz energética brasileira.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Diante da necessidade de se aprimorar o processo de geração de biogás em aterros sanitários, elaborou-se a seguinte questão de pesquisa: como medir o impacto dos fatores operacionais na geração de biogás em aterros sanitários do Brasil?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Construção de uma modelagem capaz de mensurar o impacto dos diversos fatores internos dos aterros sanitários na produção de biogás no Brasil, com foco no aprimoramento da geração de metano.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre a geração de biogás em aterros sanitários;
- b) construir o mapa da relação de causa e efeito, interrelacionando os fatores operacionais com a produção de metano;
- c) mensurar o desempenho das empresas quanto à geração de biogás, mais especificamente metano, a partir de uma ferramenta de autodiagnóstico.

1.3 JUSTIFICATIVA

O crescimento econômico e industrial está estritamente relacionado a disponibilidade de energia. Assim, para se impulsionar o crescimento populacional, a urbanização e a industrialização, é crucial atender com eficiência a demanda crescente de energia por meio de fontes menos dispendiosas. A demanda mundial de energia é mais de 85% atendida por combustíveis fósseis (IEA, 2020), o que justifica muitos países buscarem novas soluções para garantir o fornecimento seguro de energia a preços baixos (BENATO; MACOR, 2019).

A recuperação de energia em aterros sanitários, a partir do biogás, gera receitas através dos mercados de carbono e da venda de energia distribuída na forma de eletricidade, combustível a veículos, cogeração de eletricidade e calor, tratamento e subsequente injeção na rede de gás, entre outros (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020; MENIKPURA; SANG-ARUN; BENGTTSSON, 2013). Além disso, o desenvolvimento do setor de biogás também colabora para a criação de empregos “verdes”, que chegam a 5,04 pessoas-ano por GWh. (HONDO; MORIIZUMI, 2017).

A recuperação de energia em aterros sanitários não é, em geral, um objetivo explícito do projeto do aterro. Dessa maneira, os sistemas de coleta de gás não são voltados para maximizar a geração de energia, sendo desenvolvidos para a conformidade com a regulamentação que enfatiza a minimização de emissões (FEI; ZEKOS; RASKIN, 2016). Mesmo em aterros onde a energia é recuperada, os procedimentos de projeto e gerenciamento são amplamente empíricos, levando à recuperação e produção de energia abaixo do ideal. Dessa maneira, da geração anual de biogás, somente 35% é convertida em energia através da combustão, 30% é queimada e liberada na atmosfera, e 35% não é capturada, sendo conseqüentemente emitida para o meio ambiente (US EPA, 2019).

Além das LBPPs em funcionamento, há previsão de construção de outras duas unidades, somando 45,7 MW de potência (ANEEL, 2020a). Com esses empreendimentos construídos, o país teria uma potência instalada de aproximadamente 215 MW. Conforme Rosa Pin *et al.* (2018), o Brasil tem potencial de gerar 660 MW a partir dos aterros sanitários, enquanto para Santos *et al.* (2018) o potencial energético das usinas de biogás de RSU é de cerca de 2 GW. Contudo, pesquisadores apontam que a viabilidade econômica dessas usinas é alcançada somente em aterros que atendam uma população de 200.000 habitantes ou mais. Isso porque os custos de geração de energia a partir do biogás, no Brasil, são geralmente mais altos que os valores da tarifa praticada na venda de energia (BARROS; TIAGO FILHO; DA SILVA, 2014).

No Brasil, é evidente que o número de aterros sanitários está aumentando e, conseqüentemente, o uso do biogás torna-se uma excelente opção para a geração descentralizada. Essa opção é favorecida porque os aterros sanitários geralmente estão localizados a distâncias próximas dos centros de geração de resíduos sólidos. Dessa maneira, uma das alternativas possíveis para aumentar a atratividade

financeira da geração de energia a partir do biogás é a inserção dessa fonte no mercado de geração e distribuição. O Quadro 1 apresenta a evolução do ambiente regulatório, juntamente com incentivos, afim de se inserir o biogás na matriz energética nacional, seja como eletricidade ou como biometano (resultante da purificação do biogás).

Quadro 1 – Evolução do ambiente regulatório quanto ao uso do biogás.

(continua)

Assunto	Requisito	Descrição
União		
Incentivos fiscais	Lei 11.196/05	A “Lei do Bem” cria a concessão de incentivos fiscais às pessoas jurídicas que realizarem pesquisa e desenvolvimento de inovação tecnológica.
Energia elétrica	Resolução normativa ANEEL nº 390/2009	Estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes alternativas de energia, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida e dá outras providências.
Resíduos sólidos	Lei nº 12.305/10	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispendo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.
Energia elétrica	Resolução normativa ANEEL nº 482/2012-687/2015	Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
Biocombustíveis	Lei nº 13.576/2017	Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.
Biometano	Resolução normativa ANP nº 685/2017	Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto, destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional.
Energia elétrica/biometano	PLS 302/2018	Projeto de lei do senado: altera a Lei nº 12.305/ 2010, e a Lei nº 10.865/2004, para incentivar empresas que produzem biogás, metano e energia elétrica a partir de resíduos sólidos em aterros sanitários.

Quadro 1 – Evolução do ambiente regulatório quanto ao uso do biogás.

(conclusão)

Assunto	Requisito	Descrição
Estados		
Biometano	Decreto nº 58.659/2012, SP	Institui o Programa Paulista de Biogás. Entre os objetivos está o percentual de biometano ao gás que pode ser canalizado no Estado.
Biometano	Lei nº 6.361/2012, RJ	Dispõe sobre a política estadual de gás natural renovável – GNR. Distribuidoras são obrigadas a adquirir GN Renovável até o limite de 10% do volume de GN Convencional distribuído por elas
Biometano	Lei nº 14.864/2016, RS	Institui a Política Estadual do biometano, o Programa Gaúcho de Incentivo à Geração e Utilização de biometano - RS-GÁS - e dá outras providências.

Fonte: Adaptado de EPE (2018).

As empresas podem se beneficiar com a “Lei do Bem” a partir dos incentivos fiscais ligados à ela, sendo estes: dedução de 20,4% até 34% no IRPJ (Imposto de Renda de Pessoa Jurídica) e CSLL (Contribuição Social sobre o Lucro Líquido) dos dispêndios com P&D, redução de 50% no IPI na compra de máquinas e equipamentos destinados à P&D e depreciação e amortização acelerada desses bens (BRASIL, 2005). Além disso, as empresas podem se beneficiar das vantagens intangíveis ligadas a essa lei, que estão diretamente relacionadas a imagem que a empresa passa a sociedade. Dentre as principais vantagens, tem-se: possibilidade de reinvestir os valores deduzidos na área de Pesquisa e Desenvolvimento, maior competitividade no mercado, geração de inovação, e ser considerada uma empresa inovadora pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC).

No Brasil, no final de 2009, a Aneel regulamentou a geração de eletricidade a partir do biogás e sua comercialização. Pela Resolução Normativa Nº 390/2009, qualquer distribuidora de energia elétrica pode fazer chamadas públicas para comprar eletricidade produzida por biodigestores (ANEEL, 2009). Seguindo as exigências da Aneel em relação à qualidade da energia, os produtores poderão enviar a eletricidade para a linha de distribuição, em vez de somente consumir (CCEE, 2019).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída como resposta do País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos, possuindo uma visão sistêmica sobre as diversas variáveis que influenciam na gestão de resíduos

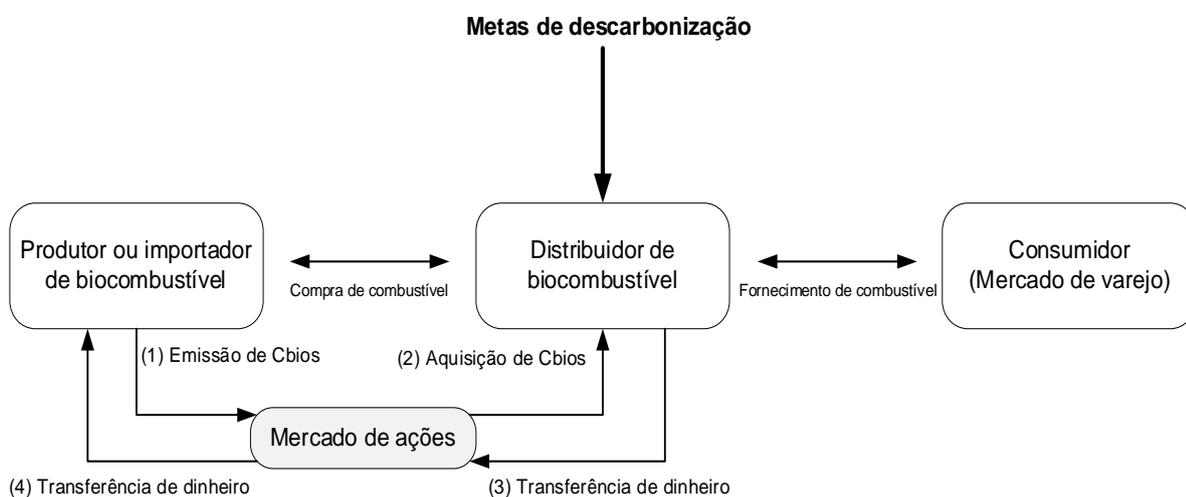
(CETRULO *et al.*, 2018). Seus objetivos são a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, a gestão integrada de resíduos sólidos, a reutilização e reciclagem, e o estímulo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e de negócios que visem a melhoria dos processos produtivos e a reciclagem de resíduos sólidos, incluindo recuperação de energia (BRASIL, 2010). O Plano Nacional de Resíduos Sólidos é o principal instrumento da PNRS, porém existe um descompasso entre os princípios da PNRS e o Plano Nacional (BRASIL, 2010, 2012b). Isso ocorre pois o atual Plano Nacional não apresenta metas de não geração, redução e reciclagem e, também, sua primeira versão não é totalmente válida e está bastante desatualizada (BRASIL, 2017b). Em 2020, foi lançada a consulta pública do Plano Nacional dos Resíduos Sólidos, o qual já possui uma proposta para sua atualização. Na proposta do plano foram descritas metas, entre elas a meta 8, que corresponde ao aumento da recuperação e aproveitamento energético de biogás de RSU. Seu indicador global descreve que, até 2040, mais de 60% do biogás gerado será aproveitado energeticamente, com potencial para abastecer 9,5 milhões de domicílios com eletricidade (BRASIL, 2020).

A geração distribuída no Brasil começou a ser desenvolvida nos últimos anos e é regulamentada pela ANEEL através das resoluções 482/2012 e 687/2015, que estabelecem incentivos e oportunidades para mini e microgeração (ANEEL, 2012, 2015). Uma vez que o consumidor/investidor começa a fornecer energia à rede de distribuição, ele reúne créditos durante o mês e desconta esses créditos da conta de energia (sistema de compensação de energia elétrica) (ANEEL, 2015). Ainda de acordo com as definições, existem três formas de usufruir: a) condomínios (empreendimentos em um mesmo local, com múltiplas unidades consumidoras), onde a administração do sistema é de responsabilidade do condomínio; b) geração compartilhada, que permite que um grupo de pessoas ou empresas se unam em um consórcio ou cooperativa, mas que devam ser da mesma área de concessão para ter os créditos compensados e; c) o autoconsumo remoto, que consiste na geração em um local e consumo em outros locais, mas com titularidade de uma mesma pessoa ou empresa (ANEEL, 2015).

A mais nova iniciativa do Brasil de fomento à bioenergia é a Política Nacional de Biocombustíveis, ou simplesmente *RenovaBio*, que objetiva reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética brasileira, tanto para a segurança energética quanto para a redução de emissões de GEE (BRASIL,

2017a). Diferentemente de medidas tradicionais, o RenovaBio não propõe a criação de imposto sobre carbono, subsídios, crédito presumido ou mandatos volumétricos de adição de biocombustíveis a combustíveis (MME, 2020). Um dos seus objetivos é criar mecanismos para impulsionar o potencial do Brasil na produção comercial e bioquerosene de aviação e a produção competitiva de etanol celulósico, assim como acelerar o aproveitamento racional do biogás e do biometano (EPE, 2017b). Em suma, o RenovaBio criará um mercado controlado de créditos de descarbonização vinculados à intensidade de carbono de diversos biocombustíveis (COLLING *et al.*, 2019). O Crédito de Descarbonização (CBIO) é um ativo ambiental emitido pelo produtor ou importador de biocombustível, certificado por meio de bancos ou instituições financeiras. Uma unidade de CBIO corresponde à emissão evitada de uma tonelada de carbono no meio ambiente (BRASIL, 2019). Assim, os aterros que produzem biogás ou biometano também poderão se beneficiar da comercialização de créditos de carbono. A Figura 1 apresenta o processo de comercialização de CBIOs.

Figura 1 – Processo de comercialização de créditos de descarbonização.



Fonte: (COLLING *et al.*, 2019).

A inovação do programa é relacionada aos CBIOs que uma entidade pode emitir na bolsa de valores brasileira, que estará diretamente ligada à redução das emissões de GEE associadas à produção de um determinado biocombustível em relação ao seu concorrente fóssil (COLLING *et al.*, 2019). O modelo para verificar o desempenho ambiental dos produtores de biocombustíveis, denominado RenovaCalc,

está atualmente disponível ao público após ser desenvolvido por várias instituições brasileiras (ANP, 2019). A ferramenta é baseada na metodologia de Avaliação do ciclo de vida (LCA), essa ferramenta também identifica gargalos de processo e prepara a empresa para a certificação (MATSUURA *et al.*, 2018). O Programa RenovaBio também estabelecerá metas de descarbonização para as distribuidoras de combustíveis, que serão obrigadas a reduzir sua pegada de carbono, seja por meio da compra de biocombustíveis de baixo impacto, seja pela aquisição da CBIOs no mercado de ações. No final da cadeia, o dinheiro dessa troca é redirecionado para produtores ou importadores de biocombustíveis (GRASSI; PEREIRA, 2019).

Desde o início do RenovaBio até agosto de 2020, foram registradas a emissão de lastro para 7,8 milhões de créditos de descarbonização, CBIO. Assim, o RenovaBio já conta 222 produtores certificados, sendo 200 empresas de etanol, 21 de biodiesel e uma dedicada ao biometano (RENOVABIO, 2020). A resolução normativa da ANP nº 685/2017 estabelece as especificações de qualidade para o biometano (ANP, 2017), encorajando sua produção e injeção na rede de gás natural do país.

Por outro lado, existe o mercado tradicional de carbono, que consiste em um ambiente de troca, regulado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, o qual permite que países com elevadas emissões de carbono comprem o “excedente” das cotas de nações que produzem menos dióxido de carbono (LEME *et al.*, 2014). No Brasil, a comercialização dos créditos de carbono é feita por meio de leilões, a pedido de entidades públicas ou privadas. O regramento de cada leilão é divulgado em anúncios públicos e editais (BRASIL, 2012a).

Frente a isso, o ambiente regulatório vai ao encontro dos projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O Brasil é o terceiro maior país do mundo em relação ao número de projetos de manuseio e disposição de resíduos, correspondendo a 34% do total. Nesse contexto, a mitigação das emissões de metano correspondem a 56% dos projetos, enquanto a recuperação de biogás alcança 44% (MORI-CLEMENT, 2019). As reduções de emissão de CO₂ são o único objetivo do MDL, recompensado pelo mercado por meio da geração de créditos de carbono (ELLIS; WINKLER; CORFEE-MORLOT, 2007).

Por fim, a proposta de lei do senado, PL 302, propõe que aterros sanitários que contemplem a geração de energia elétrica entre as iniciativas podem ser atendidos por linhas de financiamento do poder público. Além disso, esta lei permite que empresas dedicadas a gerar energia a partir do aproveitamento dos resíduos sólidos

em aterros sanitários possam receber incentivos fiscais da União, do estado ou do município. É também proposto que a energia elétrica gerada a partir de RSU fique isenta do recolhimento de tributos (como Pis/Pasep e Cofins), incidentes sobre a receita bruta decorrente da sua venda no mercado interno (BRASIL, 2018).

As resoluções e políticas citadas são favoráveis para tornar os projetos de LBPPs economicamente viáveis em aterros menores, porque permitiriam um sistema de créditos de energia. Assim, empreendimentos de biogás com até 5 MW podem ter suas receitas aumentadas, uma vez que essas receitas se referem à economia na compra de energia, que é uma função da tarifa de distribuição, em geral superior às taxas do mercado. No entanto, para se obter uma elevação desse valor tarifário, deve haver uma unidade consumidora de energia com demanda alta o suficiente para usar os créditos gerados pela energia convertida na usina de biogás. Além disso, a presente pesquisa é contextualizada no cenário brasileiro, onde existem expectativas trazidas pelo programa RenovaBio, que é substancial para o setor de bioenergia, mesmo com a atual incerteza de precificação do carbono no novo marco regulatório, o que aumenta a importância de estudos na área.

1.4 RELEVÂNCIA

Com o intuito de justificar a relevância deste estudo em âmbito acadêmico, apresentar a lacuna de conhecimento que existe e colaborar para a constituição do escopo da pesquisa, buscou-se por trabalhos relacionados à pesquisa através de duas revisões da literatura. Primeiramente, a investigação dos trabalhos relacionados partiu da questão de pesquisa: “como medir o impacto dos fatores operacionais na geração de biogás em aterros sanitários do Brasil?”. Foi realizada uma pesquisa na plataforma *Science Direct*, afim de se caracterizar o cenário de pesquisas no Brasil sobre o tema deste trabalho, com a *string* de busca: “TITLE-ABS-KEY (landfill AND (biogas OR "landfill gas" OR lfg OR methane) AND Brazil)”. Foram encontrados 38 artigos de pesquisa e revisão, dos quais 21 são apresentados no Quadro 2, por serem considerados relevantes. E um segundo momento, foi utilizado o resultado da busca da revisão sistemática (Seção 3.3.1), afim de demonstrar a lacuna de conhecimento no âmbito internacional. Nas principais bases de periódicos (Scopus, Web of Science e Science Direct) foi submetida a *string*: “TITLE-ABS-KEY (landfill AND (biogas OR "landfill gas") AND (generation OR production) AND (factor OR aspect OR influence

OR criteria OR key OR decision))”. O Quadro 3 apresenta os 18 artigos que utilizaram técnicas de Análise Multicritério de Apoio a Decisão (MCDA) em aterros sanitários considerando a geração de biogás, filtrados dos 472 catalogados no *Mendeley*.

Quadro 2 – Pesquisas brasileiras sobre biogás de aterros sanitários.

(continua)

Título	Periódico	Autor
Recuperação de energia a partir do biogás		
<i>Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil</i>	<i>Biomass and Bioenergy</i>	(SALOMON; LORA, 2009) EDUARDO;
<i>Energy and environmental potential of solid waste in Brazil</i>	<i>Energy Policy</i>	(LINO; ISMAIL, 2011)
<i>The electric energy potential of landfill biogas in Brazil</i>	<i>Energy Policy</i>	(BARROS; TIAGO FILHO; DA SILVA, 2014)
<i>Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil</i>	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	(LEME <i>et al.</i> , 2014)
<i>Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill</i>	<i>Waste Management</i>	(SILVA <i>et al.</i> , 2017)
<i>Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil</i>	<i>Waste Management</i>	(LIMA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators</i>	<i>Sustainable Cities and Society</i>	(DOS SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2018)
<i>Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil</i>	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	(SANTOS <i>et al.</i> , 2018)
<i>Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement</i>	<i>Resources, Conservation and Recycling</i>	(DOS SANTOS <i>et al.</i> , 2018)
<i>Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis</i>	<i>Energy Strategy Reviews</i>	(PIN <i>et al.</i> , 2018)
<i>Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	(DALMO <i>et al.</i> , 2019)
<i>Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis</i>	<i>Journal of Environmental Management</i>	(SANTOS <i>et al.</i> , 2019)

Quadro 2 – Pesquisas brasileiras sobre biogás de aterros sanitários.

(conclusão)

Título	Periódico	Autor
Taxa e potencial de geração de biogás		
<i>Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results</i>	<i>Waste Management</i>	(MACHADO <i>et al.</i> , 2009)
<i>Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil</i>	<i>Waste Management</i>	(MACIEL; JUCÁ, 2011)
<i>Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results</i>	<i>Energy Policy</i>	(PENTEADO <i>et al.</i> , 2012)
<i>Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the state and city of Rio de Janeiro</i>	<i>Waste Management</i>	(LOUREIRO; ROVERE; MAHLER, 2013)
<i>Estimates of methane emissions and comparison with gas mass burned in CDM action in a large landfill in Eastern Amazon</i>	<i>Waste Management</i>	(IMBIRIBA <i>et al.</i> , 2020)
<i>A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste</i>	<i>Renewable Energy Focus</i>	(BARROS <i>et al.</i> , 2018)
Conversão de biogás em biometano e utilização		
<i>Energy supply from municipal wastes: The potential of biogas-fuelled buses in Brazil</i>	<i>Renewable Energy</i>	(KUWAHARA; BERNI; BAJAY, 1999)
<i>Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: A review</i>	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	(NADALETTI <i>et al.</i> , 2015a)
<i>Methane–hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport: Potential supply and environmental issues</i>	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	(NADALETTI <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Autora.

Quadro 3 – Pesquisas internacionais.

(continua)

Título	Periódico	Autor
Fatores que influenciam na geração de biogás		
<i>Modeling decomposition of MSW in a consolidating anaerobic reactor</i>	<i>Environmental Engineering Science</i>	(REICHEL <i>et al.</i> , 2007)
<i>A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes</i>	<i>Bioresource Technology</i>	(KARAGIANNIDIS; PERKOULIDIS, 2009)
<i>A decision support tool for landfill methane generation and gas collection</i>	<i>Waste Management</i>	(EMKES; COULON; WAGLAND, 2015)

Quadro 3 – Pesquisas internacionais.

(conclusão)

Título	Periódico	Autor
<i>Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments</i>	<i>Waste Management</i>	(FEI; ZEKOS; RASKIN, 2016)
<i>Prediction of greenhouse gas emissions from Ontario's solid waste landfills using fuzzy logic based model</i>	<i>Waste Management</i>	(MOHSEN; ABBASSI, 2020)
Fatores que influenciam no sistema de coleta de biogás		
<i>Stochastic model for landfill gas transport and energy recovery</i>	<i>Journal of Environmental Engineering</i>	(COPTY; ERGENE; ONAY, 2004)
<i>Characterization of uncertainty in estimation of methane collection from select U.S. landfills</i>	<i>Environmental Science and Technology</i>	(WANG et al., 2015)
<i>A two-dimensional gas flow model for layered municipal solid waste landfills</i>	<i>Computers and Geotechnics</i>	(FENG; ZHENG, 2015)
Gerenciamento de resíduos e recuperação de energia		
<i>Case study of yaoundé (Cameroon)</i>	<i>Journal of Decision Systems</i>	(NGNIKAM et al., 2002)
<i>Quantitative evaluation of alternatives for municipal solid waste treatment in Bulgaria</i>	<i>IFAC Proceedings Volumes</i>	(GRANCHAROVA et al., 2006)
<i>Multicriteria analysis of municipal solid wastes energy recovery technologies in Greece</i>	<i>Global Nest Journal</i>	(KONDILI et al., 2012)
<i>Energy-environment-economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study</i>	<i>Applied Energy</i>	(DONG et al., 2014)
<i>Environmental assessment of waste management scenarios with energy recovery using life cycle assessment and multi-criteria analysis</i>	<i>Energy</i>	(MILUTINOVIĆ et al., 2017)
<i>Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman</i>	<i>Waste Management & Research</i>	(QAZI; ABUSHAMMALA; AZAM, 2018)
<i>Assessing the sustainable municipal solid waste (MSW) to electricity generation potentials in selected Pacific Small Island Developing States (PSIDS)</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	(JOSEPH; PRASAD, 2019)
Localização de aterros		
<i>Towards a sustainable capacity expansion of the Danish biogas sector</i>	<i>Land Use Policy</i>	(BOJESEN; BOERBOOM; SKOV-PETERSEN, 2015)
<i>Site selection for landfill gas extraction plant by fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy analytic network process in the city of Najafabad, Iran</i>	<i>Energy & Environment</i>	(KHADEMALHOSEINY; AHMADI NADOUSHAN; RADNEZHAD, 2017)
<i>Evaluation of landfill gas plant siting problem: a multi-criteria approach</i>	<i>Environmental Health Engineering and Management Journal</i>	(IGHRAVWE; BABATUNDE, 2019)

Fonte: Autora.

No cenário brasileiro foram encontrados 12 artigos que abordam recuperação de energia a partir de biogás de aterros sanitários, além de outros seis artigos que

estimaram a taxa de metano e o potencial de produção de biogás nos aterros sanitários brasileiros. Enquanto isso, três pesquisas discutiram o *upgrade* do biogás de aterros em biometano, para a utilização no transporte rodoviário.

As pesquisas que mais se aproximam da proposta desse trabalho são dos autores Emkes, Coulon e Wagland (2015) e Mohsen e Abbassi (2020), trabalhos internacionais. A primeira apresenta uma ferramenta de apoio à decisão a fim de aprimorar a geração de metano em aterros do Reino Unido. Emkes, Coulon e Wagland (2015) utilizaram AHP para determinar a importância de cada indicador, sendo eles: teor de umidade, temperatura, alcalinidade, pH, DBO (demanda biológica de oxigênio), DQO (demanda química de oxigênio), razão DBO/DQO, amônia, cloreto, ferro e zinco. Enquanto isso, a pesquisa de Mohsen e Abbassi (2020) utiliza a técnica *Fuzzy* para prever a geração de metano em grandes aterros municipais de resíduos sólidos do Canadá, com mais de 1,5 milhões de m³ de resíduos. Os autores consideraram sete parâmetros: total de resíduos depositados no aterro, conteúdo orgânico dos resíduos, temperatura, precipitação anual, idade do aterro, profundidade do aterro e cobertura do aterro. O modelo mostrou melhor precisão que o *LandGEM*, sendo uma alternativa para situações com incertezas relacionadas ao potencial de geração de metano e à taxa de decaimento (MOHSEN; ABBASSI, 2020).

Outras pesquisas foram identificadas no que diz respeito a fatores internos de aterros sanitários, mas que objetivam encontrar a taxa de geração de metano em um determinado aterro sanitário, limitando os fatores a características regionais (AGUILAR-VIRGEN *et al.*, 2014; AMINI; REINHART, 2011; AMOO; FAGBENLE, 2013; AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2018, 2020; AYODELE; OGUNJUYIGBE; ALAO, 2018; MENIKPURA; SANG-ARUN; BENGTSSON, 2013; OGUNJUYIGBE; AYODELE; ALAO, 2017). Os estudos apresentados não avaliam o impacto de estratégias conjuntas em relação à destinação final e tratamento dos RSUs no potencial de geração de biogás. Vale salientar que, no aterro, é produzido biogás, muito embora o que tem valor comercial para a recuperação energética é o metano presente neste gás, então o foco deste trabalho é em relação ao aprimoramento da geração de metano. Portanto, os artigos encontrados não abordam de forma específica o problema investigado, nem se aproximam dos objetivos, metodologia e foco da pesquisa. Apesar desta pesquisa não ser experimental e se ter o conhecimento que o impacto na geração de biogás pelos fatores internos não ocorre de forma linear, como descrito na seção 2.1.1, é garantida a contribuição acadêmica

e prática deste trabalho em sua visão macro e qualitativa sobre o assunto. Esta pode colaborar de forma relevante para as pesquisas da área, podendo ser útil a operadores de aterro, investidores, gestores, engenheiros, ambientalistas e outras partes, atendendo a necessidade de gerenciar aterros sanitários a fim de se aumentar a geração de metano e recuperação energética.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

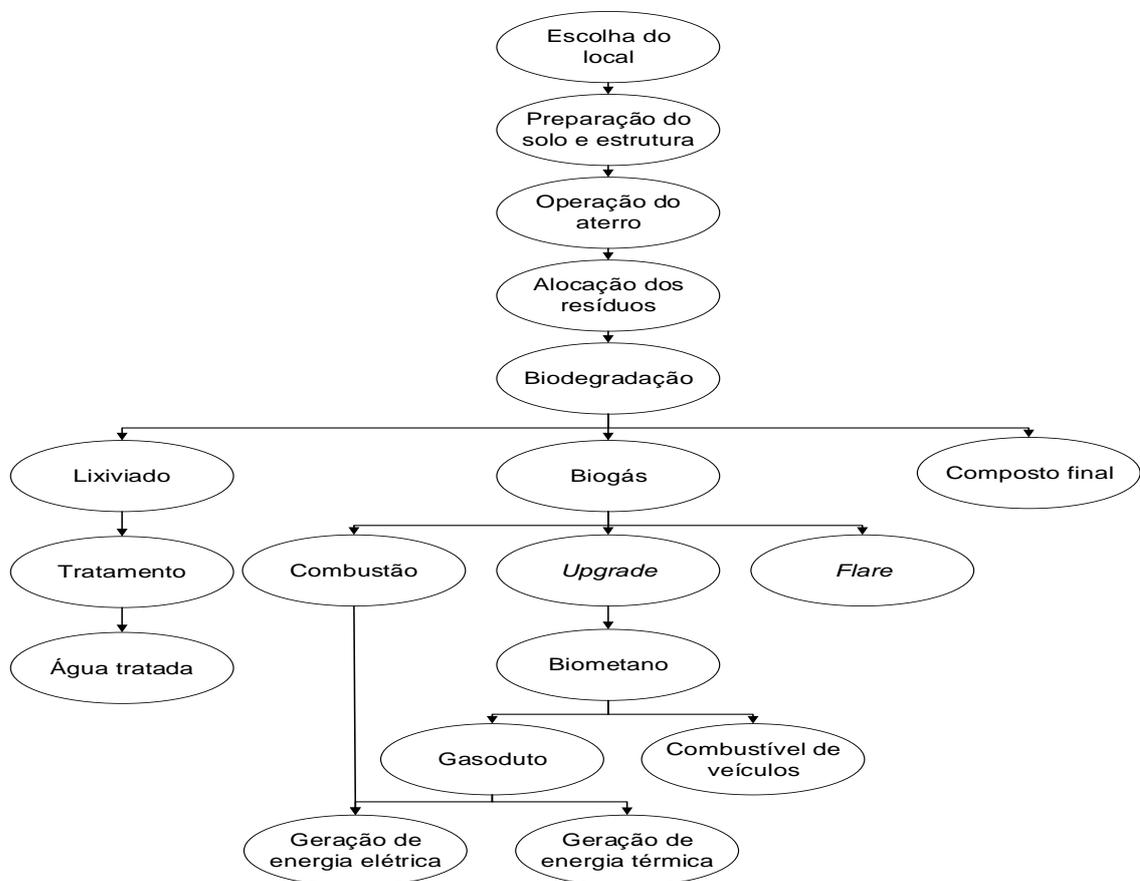
A estruturação do trabalho parte do problema de pesquisa, conteúdos e ferramentas necessários para se atingir o objetivo que foi proposto, que serão desenvolvidos em 5 capítulos. O primeiro capítulo corresponde a introdução do trabalho, onde são apresentados o problema de pesquisa, os objetivos, a justificativa e a relevância. Enquanto o segundo capítulo é referente ao referencial teórico necessário para a fundamentação deste trabalho, o terceiro capítulo corresponde a metodologia de pesquisa, onde são descritas as etapas necessárias para se desenvolver os objetivos deste trabalho. No quarto capítulo os resultados são discutidos e, por fim, no quinto capítulo é realizada a conclusão do estudo, apresentadas as limitações e perspectivas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ATERRO SANITÁRIO

O aterro sanitário é definido como a disposição controlada de resíduos em terra para reduzir o impacto negativo no meio ambiente por meio da recuperação de biogás e do manejo de lixiviados (KUMAR; SAMADDER, 2017). Assim, compreende a compressão de resíduos no solo, na forma de camadas periodicamente recobertas com argila ou outros materiais inertes, além de sistemas de drenagem e tratamento de lixiviados, evitando a contaminação das águas subterrâneas, além de sistemas para coletar e queimar o biogás gerado (TOZLU; OZAHİ; ABUSOGLU, 2016; MAMBELI BARROS; TIAGO FILHO; DA SILVA, 2014). A representação esquemática de um processo típico de aterro com suas etapas é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Esquema do funcionamento básico de um aterro sanitário.



Fonte: Adaptado de Tozlu, Ozahi e Abusoglu (2016).

A composição do RSU disposto nos aterros sanitários varia de acordo com o número de habitantes, nível educacional da população, poder de compra, renda familiar, maneiras e costumes, condições climáticas, e consumo de alimentos industrializados (NADALETTI *et al.*, 2015a). Esses parâmetros, juntamente com a temperatura e umidade, influenciam diretamente na digestão anaeróbica que ocorre durante a biodegradação dos resíduos e, conseqüentemente, influenciam a geração de biogás, lixiviados e composto final (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015).

Quando a umidade dos resíduos aumenta nos aterros, as condições ambientais para a biodegradação melhoram. Geralmente isso ocorre via recirculação de lixiviados ou líquidos suplementares, além do regime de chuvas (BAREITHER *et al.*, 2017). As estratégias de aprimoramento de umidade incluem a quantidade, tipo e frequência de adição do líquido à massa de resíduos sólidos (FRANK *et al.*, 2016). Contudo, a recirculação de lixiviados tem recebido maior atenção devido ao sucesso de aplicação, pois é considerada um tratamento *in situ* de lixiviados, além de acelerar a estabilização de resíduos, promover a redução do espaço no aterro e volume de lixiviados e, também, maximizar a produção de biogás (NAG; SHIMAOKA; KOMIYA, 2018). A recirculação de lixiviado pode ser via aplicação na superfície ou sistema de valas horizontais para recirculação, que consiste em bombear lixiviados para dentro da massa de resíduos através de uma bomba instalada no tanque de armazenamento (NWAOKORIE *et al.*, 2018).

Os RSUs depositados em aterros sanitários estão sujeitos a deformações em torno de 25 a 50% da altura inicial do aterro (SIMÕES; CATAPRETA, 2013). Essa redução de volume é causada pela decomposição de sólidos orgânicos e também pela fluência física do RSU (LEE, 2002). Essas deformações ocorrerem em três estágios: compressão inicial, primária e secundária. A compressão inicial ocorre instantaneamente quando cargas externas são aplicadas e geralmente está associada à compressão imediata de espaços vazios e partículas devido a cargas sobrepostas. A compressão primária é atribuída à drenagem de fluidos (líquidos e gases). O estágio secundário é resultado da decomposição físico-química e bioquímica, que ocasiona perda de massa e continua até que os resíduos sejam totalmente estabilizados (SWATI; JOSEPH, 2008).

Os sistemas de drenagem de gás são uma parte essencial da coleta de biogás. Três tipos de poços são utilizados na prática: poços verticais, horizontais e poços combinados vertical-horizontal. Independentemente do tipo de tecnologia de extração

de gás selecionada, parte do biogás é liberada diretamente no ar (US EPA, 2019). A eficiência de coleta depende do nível da tecnologia, situação de gerenciamento do aterro, área de operação e cobertura do aterro, cronograma de instalação, fatores meteorológicos, entre outros (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020; LEE, U.; HAN; WANG, 2017). Segundo Barlaz *et al.* (2009), durante a operação, quando as células estão ativas (sem cobertura), a eficiência de coleta é de 50%. Quando as células são fechadas com coberturas temporárias, a eficiência aumenta para 75%. Finalmente, quando as células são fechadas com coberturas finais a eficiência é de aproximadamente 95%. As células correspondem ao local no qual o resíduo está alocado, sendo construídas diariamente com altura de 2,0 a 4,0 m e 0,7 a 1,2 t/m³ de resíduo compactado (ABNT, 2010).

Os poços horizontais são geralmente instalados e usados para coletar biogás nos estágios iniciais do desenvolvimento da célula, mesmo enquanto eles ainda aceitam resíduos (LEE; HAN; WANG, 2017). Estes geralmente possuem uma taxa de coleta de biogás mais alta, porém seu custo de construção é mais elevado e é apropriado apenas para grandes aterros. Portanto, possui apenas um pequeno número de casos de aplicação, enquanto os poços verticais geralmente são instalados e operados após a instalação das coberturas finais. Ainda, estes são mais utilizados devido ao menor custo, e são adequados para quase todos os tipos de aterros sanitários (FEI; WEN; DE CLERCQ, 2019).

A Tabela 1 apresenta a eficiência de coleta ao longo da vida útil para quatro tipos de componentes de resíduos em quatro condições climáticas diferentes. Vale salientar que a coleta ativa de biogás começa imediatamente após o descarte de resíduos em uma célula. Enquanto, a moderada inicia anos após o primeiro resíduo ser depositado na célula. Para a decomposição de alimentos em condições tropicais úmidas, a velocidade de decomposição aumenta, o que leva a perdas significativas de biogás antes da operação do sistema de coleta. Por outro lado, a madeira em condições boreais secas tem decomposição lenta e as emissões durante o período pós-fechamento reduzem a eficiência da coleta durante a vida útil. Em geral, a coleta ativa de biogás mostra eficiência muito maior em comparação aos aterros sanitários com estratégias de coleta moderadas para uma dada condição climática e de resíduos (LEE; HAN; WANG, 2017).

Tabela 1 – Eficiência de coleta de biogás de acordo com o clima e resíduo.

Coleta biogás	Ativa				Moderada				
	Condição climática	Boreal Seco (%)	Tropical Seco (%)	Boreal Úmido (%)	Tropical Úmido (%)	Boreal Seco (%)	Tropical Seco (%)	Boreal Úmido (%)	Tropical Úmido (%)
Resíduo									
Papel		78	79	82	83	70	70	71	71
Madeira		68	71	74	76	63	65	67	68
Alimento		82	84	79	72	71	70	59	46
Mix de RSU		79	80	80	78	70	70	66	60

Fonte: (LEE; HAN; WANG, 2017).

Conforme Aghdam, Scheutz e Kjeldsen (2019), os fatores meteorológicos influenciam o fluxo de biogás, enquanto sua recuperação correlaciona-se significativamente com a velocidade do vento durante o inverno, mas não durante o verão. A temperatura ambiente e a radiação solar têm baixos coeficientes de correlação com a recuperação de biogás e, portanto, não são os principais fatores que afetam a coleta.

O fator de oxidação representa a quantidade de CH₄ que é oxidado a CO₂ conforme passa pela cobertura do aterro, logo afeta a quantidade de CH₄ gerado no aterro sanitário (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020). Porém, o fator de oxidação não pode ser expresso como um número fixo pois varia com a quantidade fugitiva de CH₄, tipo e espessura da cobertura do aterro, textura do solo, teor de umidade, temperatura, concentrações de CH₄ e O₂, e nutrientes (LEE; HAN; WANG, 2017). Com isso, é difícil determinar o fator de oxidação e, geralmente, o percentual de 10% é indicado para aterros sanitários de RSUs de acordo com a (US EPA, 2019).

Os aterros possuem três sistemas de cobertura: diários, intermediários e finais. Uma cobertura diária pode ser implementada para cobrir os resíduos descartados em uma célula no final de um dia útil, enquanto uma cobertura intermediária é projetada para cobrir regiões onde os resíduos permanecem por pelo menos um ano (SPOKAS; BOGNER; CHANTON, 2011). Uma cobertura final é normalmente usada para tampar o aterro quando a célula está totalmente cheia de resíduos (MAJDINASAB; YUAN, 2017). Nos últimos anos, diferentes sistemas de cobertura de aterros foram

desenvolvidos e sua combinação com os sistemas de coleta auxilia no gerenciamento de gás e geração de lixiviados (CHIEMCHAI SRI *et al.*, 2012).

2.1.1 Biogás

O biogás é gerado a partir da degradação da matéria orgânica, que ocorre em cinco fases diferentes (NOOR *et al.*, 2013): a primeira fase é a hidrólise/degradação aeróbica, onde bactérias aeróbias quebram os complexos orgânicos e formam CO₂ e H₂O; a segunda fase é a hidrólise e fermentação, quando os componentes orgânicos solúveis são decompostos por de bactérias facultativas em CO₂, H₂, NH₃ e ácidos; a terceira fase é a acidogênese/acetogênese, na qual os ácidos orgânicos são convertidos em ácido acético, ácido fórmico, álcoois, H₂ e CO₂ por bactérias anaeróbias; na quarta fase (metanogênese), a bactéria metanogênica consome o produto da terceira fase e produz principalmente CH₄, CO₂ e H₂S, além de outros gases em menor quantidade; por fim, a fase final é a oxidação, na qual CH₄ é convertido em CO₂ e H₂O sob condição aeróbica (KUMAR; SAMADDER, 2017). A composição média do biogás varia devido às características dos resíduos e condições do processo de digestão, sendo geralmente 55-70% de CH₄, 30-45% de CO₂, além de amônia, ácido sulfídrico e hidrocarboneto em quantidades menores (DOS SANTOS *et al.*, 2018; LEONZIO, 2016).

A produção de biogás no século XXI tornou-se uma das fontes mais importantes para a geração de energia a partir de resíduos (KHADEMALHOSEINY; AHMADI NADOUSHAN; RADNEZHAD, 2017). Isso porque é um gás de valor relativamente alto e pode ser utilizado como combustível para veículos, indústria e necessidades domésticas, além de gerar eletricidade (MINTAH *et al.*, 2017). O potencial de geração de energia elétrica no Brasil a partir de biogás de aterros sanitários aumentou de 2,1 TWh, em 2003, para 7,8 TWh em 2018 (BASTO; PINGUELLI, 2003; DOS SANTOS *et al.*, 2018). As usinas com capacidade de geração superior a 1 MW representam 87% desse cenário (LIMA, Rodolfo M *et al.*, 2018). Dessa forma, os aterros sanitários devem ser bem construídos e projetados para maior eficiência na coleta de gás (DOS SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2018). Conforme Yu (2014), para suprir a demanda de um gerador de 500 kW de potência são necessários 700 m³/h de biogás em condições normais de temperatura e pressão. Por outro lado, para que o *upgrade* de biogás em biometano seja lucrativo, é preciso

que pelo menos 500 m³/h de biogás sejam gerados para a conversão (CLERCQ *et al.*, 2016). Logo, a quantidade de resíduos que o aterro deve tratar é de pelo menos 500 t/dia para produzir biogás suficiente afim de recuperar o investimento (FEI; WEN; DE CLERCQ, 2019; ZUBERI; ALI, 2015).

Quanto aos fatores e práticas dos aterros sanitários para o aprimoramento da geração de biogás destacam-se algumas pesquisas. A pesquisa de Mali, Khare, Biradar (2012), o cenário com maior produção de metano apresentou 36% do total, enquanto que o menor cenário com as condições de contorno de aterros sanitários apresentou 8% dessa produção. Esses dois cenários possuíam práticas operacionais similares, ocorrendo uma pequena diferença na densidade. Porém, analisando-se outros fatores, o teor de umidade foi 6% maior para o primeiro cenário e a fração de resíduos orgânicos neste cenário foi de mais de 90%, ou seja, o cenário com maior produção recebia 20% a mais de resíduos orgânicos. Rasapoor *et al.* (2020) analisaram a adição de nutrientes, quando adicionado fenazina (NR) (70 mg/L) o potencial de geração de metano aumentou 34%, enquanto que quando adicionado 15 g/L e 30 g/L de *biochar* o potencial de metano aumentou 18% e 10%, respectivamente. Esse resultado foi complementado por Rasapoor *et al.* (2021) que concluíram que a concentração de metano atingiu 60,2% e 59,3% da geração total de biogás quando NR e *biochar* foram adicionados, respectivamente. Além disso, a mistura de lixiviado e *biochar* aumentou a taxa de geração de gás em mais de 2,8 vezes para esses autores. Feng *et al.* (2017) relacionaram a profundidade com concentração metano, quando próximo a superfície a quantidade de metano foi zero, pois ocorre oxidação microbiana. Porém, com uma profundidade entre 0,4 e 0,6 m a concentração de metano foi 40% e numa profundidade de até 1,6m a concentração de metano foi 50%. Pantini *et al.* (2015) analisaram a taxa de geração de metano, a qual na temperatura ambiente foi 0,007⁻¹, enquanto que a 37 °C a taxa aumentou para 0,05⁻¹ e em 55 °C essa taxa pode chegar a 0,11⁻¹. Para os mesmos autores, em um ambiente com 75% de umidade a taxa de geração variou entre 56% e 75% e diminuiu para 34% com teor de umidade na capacidade de campo. Ayodele, Alao, Ogunjuyigbe (2020) relacionaram a geração de eletricidade com a eficiência de coleta de gás, um aumento de 33% na geração de energia elétrica foi alcançado quando a eficiência de coleta foi alterada de 50% para 75%. Da mesma forma, cerca de 12% de aumento na geração de eletricidade foi alcançado quando a eficiência de coleta foi 85%, enquanto um aumento de 6% foi obtido quando 90% do biogás foi coletado.

2.1.1.1 Biometano

O biometano é o gás derivado da purificação (*upgrade*) do biogás, onde a quantidade de CH₄ é aumentada através da remoção de CO₂, H₂S e siloxano, o que resulta em 95-97% de CH₄ e 1-3% de CO₂ (HOO; HASHIM; HO, 2018; RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). A conversão do biogás em biometano aumenta o poder calorífico do gás, além de atender à qualidade do combustível para injeção na rede de gás natural nacional (SEMAN *et al.*, 2019). Dessa maneira, o biometano é uma fonte alternativa ao gás natural e, portanto, pode ser usado como combustível em veículos ou para geração de calor em processos industriais (HOO; HASHIM; HO, 2018). O poder calorífico do biogás varia entre 21600 a 30000 kJ/m³ aproximadamente, enquanto o poder calorífico do biometano determinado como parâmetro pela ANP varia entre 34000 e 43000 kJ/m³ (9,47 a 11,94 kWh/m³) dependendo da localização no país (ANP, 2017). A purificação do biogás, afim de se atingir os padrões de qualidade estabelecidos para o biometano, pode se dar de diferentes maneiras, as quais incluem lavagem com água a alta pressão, lavagem química com amina, adsorção por oscilação de pressão, separação criogênica, separação por membrana, e lavagem física orgânica. Todas essas tecnologias ajudam a isolar o metano e capturam impurezas (STARR *et al.*, 2015).

2.1.2 Lixiviados

Chorume é o nome usualmente utilizado para caracterizar o líquido gerado durante o processo da decomposição, predominantemente anaeróbia, de resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários (SCANDELAI *et al.*, 2019). Após a precipitação pluviométrica sobre a massa de resíduos, o fluxo da água pelos vazios da massa sólida se mistura com o chorume (BRASIL, 2015). O líquido resultante é o lixiviado, que apresenta vários tipos de poluentes, a saber: compostos orgânicos biodegradáveis e não biodegradáveis, compostos nitrogenados, sólidos em suspensão e, em alguns casos, metais pesados e compostos tóxicos, entre outros (BIDONE, 2017).

De forma geral, os métodos utilizados para estimar a quantidade de lixiviado são o Método Suíço e o Método do Balanço Hídrico. Porém, não existe uma metodologia que assegure uma exata previsão de vazão. Essa dificuldade de

quantificar o lixiviado deve-se ao tempo de retardo (atenuação do líquido no âmbito do aterro), nível de compactação da massa de resíduos, material de recobrimento das frentes diárias de serviço e drenagens superficial e subsuperficial deficientes, que são fatores que influenciam a geração do mesmo (BIDONE, 2017).

As alternativas de tratamento do lixiviado são processos químicos, biológicos ou térmicos, realizados dentro ou fora da planta, que provocam um custo importante na operação do aterro sanitário (PATIÑO, 2017). A recirculação de lixiviados pode ser considerado um tratamento, já que colabora para elevar a umidade no aterro, aumentar a velocidade de degradação e, conseqüentemente, diminuir o volume de lixiviado e resíduo. Na pesquisa em escala experimental de Chan, Chu e Wong (2002), a taxa de produção de biogás em locais com recirculação de lixiviados foi aproximadamente três vezes maior do que no local que não contava com a recirculação. Também, no trabalho de Mali e Khare e Biradar (2012), alguns fatores operacionais foram combinados em um biorreator, incluindo a recirculação de lixiviados, onde a produção de metano aumentou 25%. Por outro lado, Nwaokorie *et al.* (2018) realizaram sua pesquisa em um aterro sanitário com capacidade projetada para 2,7 milhões de m³ de RSUs, onde o lixiviado foi aplicado nos resíduos com uma barra de pulverização e, também, recirculado nas valas horizontais. Nesse estudo, a taxa de geração de biogás do local aumentou duas vezes em comparação a taxa de aterros sem recirculação. Além disso, a taxa de produção da célula que recebeu 54401 m³ de lixiviado foi 5 vezes maior que a taxa da célula que recirculou 7071 m³ de lixiviado.

2.2 MODELAGEM DE DIAGNÓSTICO

Esta seção aborda os conceitos necessários para o desenvolvimento da modelagem do diagnóstico. A primeira subseção conceitua o método de análise de decisão multicritério que foi utilizado para a modelagem do impacto dos fatores na geração de biogás. Já a segunda e a terceira subseções conceituam dois métodos para a mensuração de desempenho, nas quais um foi relacionado ao desempenho da empresa quanto a geração de biogás de acordo com os fatores operacionais, e o outro representa o impacto desses fatores no processo de biodegradação e, conseqüentemente, na geração de biogás com um mapa de causa e efeito. Assim,

com a associação desses métodos foi construído o modelo de diagnóstico para a geração de biogás em aterros sanitários.

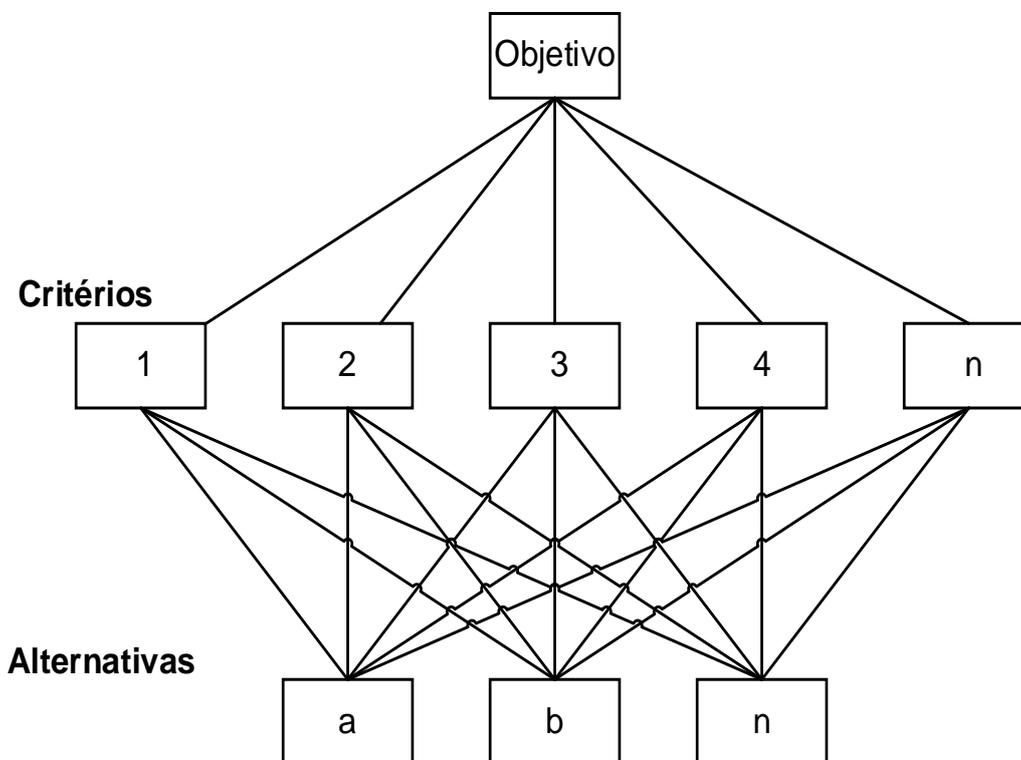
2.2.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Analytic Hierarchy Process (AHP) é uma das técnicas de análise de decisão de múltiplos critérios (MCDA) que foi desenvolvido por Saaty (1977) e é a técnica mais popularmente utilizada do MCDA (SOLTANI *et al.*, 2015). Esta permite uma síntese de muitas variáveis complexas em situações do mundo real e é aplicável em uma variedade de contextos, incluindo negócios, indústria, saúde, governo, etc (BEHREND; KRISHNAMOORTHY, 2017).

No AHP o problema é decomposto na forma de uma hierarquia, onde atributos e planos são delineados em uma ordem elementar inter-relacionada com objetivo, critérios, subcritérios e alternativas, sendo que o objetivo permanece no topo (GÜLER; YOMRALIOĞLU, 2017; HALILU *et al.*, 2013). Assim, a estrutura hierárquica é muito importante na tomada de decisões, indicando uma relação entre elementos de um nível com os do nível imediatamente abaixo, classificadas de acordo com sua contribuição para o objetivo geral da análise (DEMESOUKA; VAVATSIKOS; ANAGNOSTOPOULOS, 2013). Com isso, são realizadas comparações que podem ser tomadas a partir de medidas reais de uma escala fundamental que reflete a força relativa de preferências. A avaliação das comparações ocorre aos pares, sendo concluída por meio de julgamento de especialistas. O AHP tem uma preocupação especial com a saída da consistência, a sua medição e a dependência dentro e entre os grupos de elementos (SAATY, 1990). Portanto, é um método para a tomada de decisão a partir de vários critérios para se calcular o peso do índice comparando fatores relativos entre si, que correspondem às características dos processos atuais (SHABBIR; AHMAD, 2016).

Em resumo, de acordo com Saaty (1994), o método AHP consiste basicamente em: estruturar um problema com um modelo que mostre os elementos-chave e conexões, conforme representado na Figura 3; obter os julgamentos dos envolvidos e representar com números significativos, conforme Tabela 2; produzir matrizes de comparação pareada; calcular dos valores dos pesos dos critérios e pontuação do desempenho das alternativas e avaliar a relação de consistência.

Figura 3 – Estrutura hierárquica da AHP.



Fonte: Adaptado de Saaty e Vargas (2012).

Tabela 2 – Escala de comparação do AHP.

Intensidade de impacto	Recíproca inversa	Definição
1	1	Mesma importância
3	1/3	Importância pequena de um sobre o outro
5	1/5	Importância grande ou essencial
7	1/7	Importância muito grande ou demonstrada
9	1/9	Importância absoluta
2,4,6,8		Valores intermediários entre os valores adjacentes

Fonte: (SAATY, 1990).

A AHP possui flexibilidade e facilidade de implementação, podendo ser combinada com outras técnicas, como por exemplo, TOPSIS, QFD, BSC. As pesquisas que utilizaram essas técnicas do MCDA para selecionar locais ótimos afim de instalar os aterros sanitário com o mínimo de impacto ambiental associado ao

Sistema de Informações Geográficas são: (AJIBADE *et al.*, 2019; DEMESOUKA; VAVATSIKOS; ANAGNOSTOPOULOS, 2013; FEO; GISI, 2014; GUIQIN *et al.*, 2009; KAMDAR *et al.*, 2019; KHADEMALHOSEINY; AHMADI NADOUSHAN; RADNEZHAD, 2017; KHAN; VAEZI; KUMAR, 2018; MOEINADDINI; KHORASANI; DANEHKAR, 2010; SENER *et al.*, 2010). Enquanto isso, outras pesquisas avaliaram a sustentabilidade do gerenciamento de RSU e, também, as opções de recuperação de energia em aterros sanitários (GORSEVSKI *et al.*, 2012; MILUTINOVIĆ *et al.*, 2017; NIXON *et al.*, 2013; PASALARI; NABIZADEH, 2019; MILUTINOVIĆ *et al.*, 2014; YAP; NIXON, 2015; ZHOU *et al.*, 2019). Assim como alguns autores também analisaram os tratamentos dos RSU e lixiviados (CHALLCHAROENWATTANA; PHARINO, 2016; HERVA; ROCA, 2013; ZHANG *et al.*, 2019).

2.2.2 Key Performance Indicators (KPI)

A mensuração do desempenho, por meio de indicadores, é importante para verificar se os objetivos estabelecidos pela empresa, a partir da estratégia, estão sendo alcançados, ajudando na melhor aplicação dos recursos e na identificação dos ajustes necessários (CAMILLIS *et al.*, 2018). No âmbito empresarial, Fortuin (1988) destaca que os indicadores de desempenho passaram a ser utilizados com maior frequência a partir da década de 1990, sendo empregados para monitorar o resultado de ações voltadas aos processos de melhoria contínua.

Os indicadores demonstram como se encontra um determinado processo e mostram como as tarefas são desenvolvidas (CAMILLIS *et al.*, 2018). Especificamente, o *Key Performance Indicator* (KPI) reflete de maneira quantitativa e condensada o desempenho de um setor específico da organização como um todo abordando várias perspectivas (PARMENTER, 2015). Portanto, o KPI corresponde a uma ferramenta para avaliar o estado de determinada atividade, de maneira que os níveis de uma empresa compreendam a forma como seus trabalhos influenciam no negócio (POPOOLA *et al.*, 2018). Os indicadores são medidas mensuráveis que precisam estar alinhados com os objetivos da empresa, no intuito de avaliar ou comparar os seus desempenhos para atingir metas estratégicas e operacionais (JAHANGIRIAN *et al.*, 2017). A partir disso, um indicador chave de desempenho pode ser entendido como a relação entre produtos e insumos, com variantes como

intensidade, conteúdo, produtividade e benchmarking (PERRONI *et al.*, 2020). Todavia, a escolha de KPIs é parcialmente subjetiva e depende do contexto e da finalidade da avaliação (FEIZ *et al.*, 2020).

Quando as palavras chaves KPI ou *Key performance indicators* são relacionadas as palavras *landfill*, *biogas* ou LFG pouquíssimos artigos científicos são encontrados. Cetrulo *et al.* (2018) avaliaram a eficácia da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil a partir dos KPIs. Enquanto que Feiz *et al.* (2020) utilizaram indicadores-chave de desempenho para comparação de diferentes sistemas de produção de biogás a partir resíduos alimentares, com perspectivas de impacto climático, uso de energia primária, reciclagem de nutrientes e custo. Já Parra *et al.* (2017) identificaram os principais indicadores de desempenho para sistemas *power-to-gas* (P2G) que geram hidrogênio ou metano (gás natural sintético - SNG) como produtos principais.

Neste trabalho, os KPIs definidos representam aspectos importantes relacionados aos fatores operacionais dos aterros sanitários e, conseqüentemente, ao desempenho do sistema de geração de biogás com foco na produção de metano. Com isso, pode-se aprimorar a geração de metano nos aterros sanitários, além da geração de relatórios e tomada de decisão para melhoria contínua em relação ao sistema de produção de biogás existente.

2.2.3 Mapa estratégico

O mapa estratégico tem como finalidade decodificar os complexos processos de escolha frente aos quais os gestores de todos os níveis são expostos diariamente, vinculando o planejamento estratégico e o planejamento operacional (MENDES *et al.*, 2012). Dessa maneira, este descreve o caminho que será percorrido para cumprir a estratégia da empresa, explicando as hipóteses que os gestores levantaram sobre os relacionamentos de causa e efeito entre as ações e a estratégia. Além disso, os objetivos contidos devem refletir a previsão dos gestores, quanto à magnitude e velocidade de resposta, entre mudanças nos direcionadores de desempenho futuro e as mudanças associadas em uma ou mais medidas de resultado (de esforços despendidos no passado) (COSTA, 2008).

A partir do mapa estratégico, as relações de causa e efeito são construídas, fazendo-se presentes no desdobramento da estratégia em medidas, metas e planos

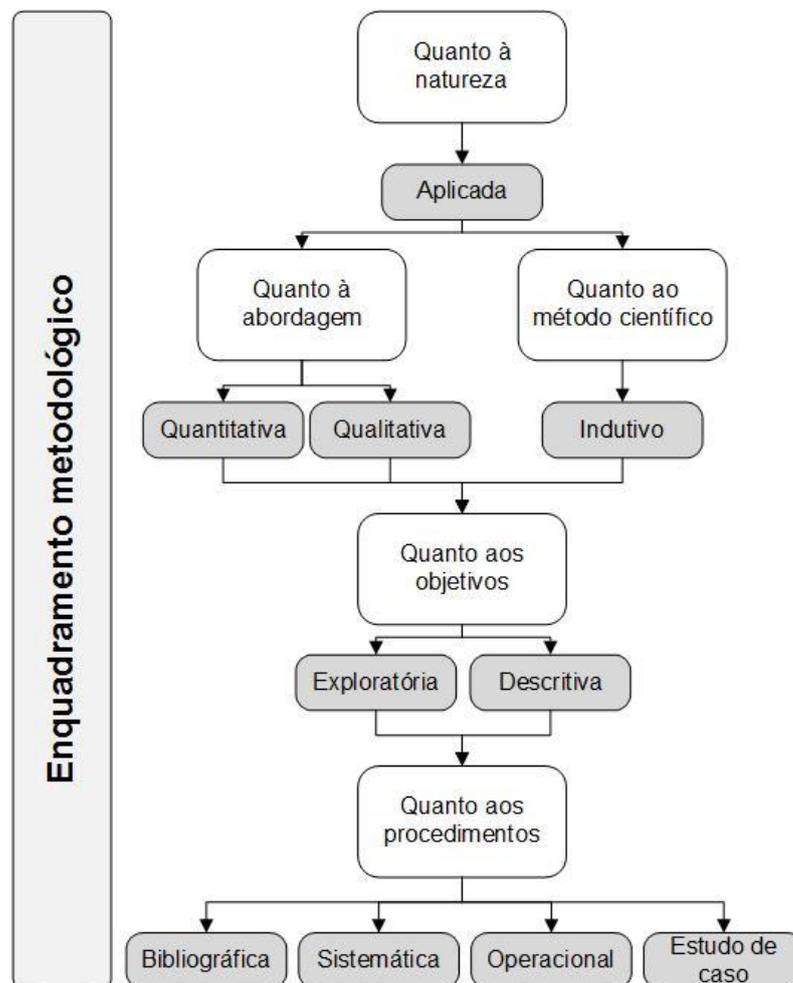
de ação, e na relação desses componentes entre as perspectivas (KAPLAN, R.S.; NORTON, 1996). A integração do mapa deve ser tanto vertical quanto lateral entre as áreas, ou entre as perspectivas/dimensões da gestão. Esse processo pode ser dividido em três etapas: descrever, alinhar/integrar, e medir (KAPLAN; NORTON, 2004). O desenvolvimento do mapa de causa e efeito, neste trabalho, relaciona as influências dos fatores operacionais nos fatores da biodegradação de resíduos, os quais podem ser medidos durante a operação do aterro e assim aprimorados para atingir seu nível ideal.

3 METODOLOGIA

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

Quanto a sua natureza, a pesquisa é classificada como aplicada, pois abrange estudos que visam resolver problemas identificados no meio em que o pesquisador reside (GIL, 2017). Assim, tem como objetivo gerar e adquirir conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos (MATIAS-PERIRA, 2019), como representado na Figura 4.

Figura 4 – Enquadramento metodológico.



Fonte: Adaptado de Marconi e Lakatos (2010).

A pesquisa contempla o viés quantitativo e qualitativo em relação à abordagem, visto que serão coletadas informações quanto aos fatores operacionais de aterros sanitários e, posteriormente, serão realizados procedimentos que avaliaram o impacto dos fatores afim de se obter a relação de causa e efeito na geração de metano. Dessa maneira, o viés qualitativo é utilizado para se compreender o contexto do fenômeno estudado (RAMOS, 2009). Enquanto isso, o viés quantitativo se baseia em dados objetivos passíveis de mensuração, construindo as relações de dependência funcional entre variáveis para tratar de como os fenômenos ocorrem (RAMOS, 2009).

Quanto ao método científico, a pesquisa se enquadra como indutiva, pois através de evidências encontradas por uma fração da população estudada, são buscados aspectos que podem estar presentes também em outros indivíduos (MORABITO *et al.*, 2018). Nesse método, o conhecimento é fundamentado na experiência. Nele, a generalização deriva de observações de casos da realidade concreta e as constatações particulares levam à elaboração de generalizações (MATIAS-PERIRA, 2019). Portanto, esse método possui três etapas: observação dos fenômenos, descoberta da relação entre eles e generalização da relação (MARCONI; LAKATOS, 2017a).

Em relação aos objetivos, a pesquisa é classificada como exploratória e descritiva. Exploratória porque envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e, também, análise de exemplos que estimulem a compreensão (MATIAS-PERIRA, 2019). Já descritiva porque visa descrever as características de determinada população ou fenômeno, ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática (GIL, 2017). Dessa maneira, as técnicas padronizadas no trabalho serão as coletas de dados a partir de questionários e observação sistemática.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa foi classificada em bibliográfica, de revisão sistemática, operacional e estudo de caso. Dessa forma, a pesquisa bibliográfica concentra-se nas seções 1 e 2, e foi realizada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e informações disponibilizadas na internet (GIL, 2017; MARCONI; LAKATOS, 2017b). Para a elaboração da estrutura hierárquica, construída a partir dos fatores encontrados na literatura, foi utilizada a metodologia de revisão sistemática, por proporcionar uma visão abrangente e robusta do tema estudado (DRESCH;

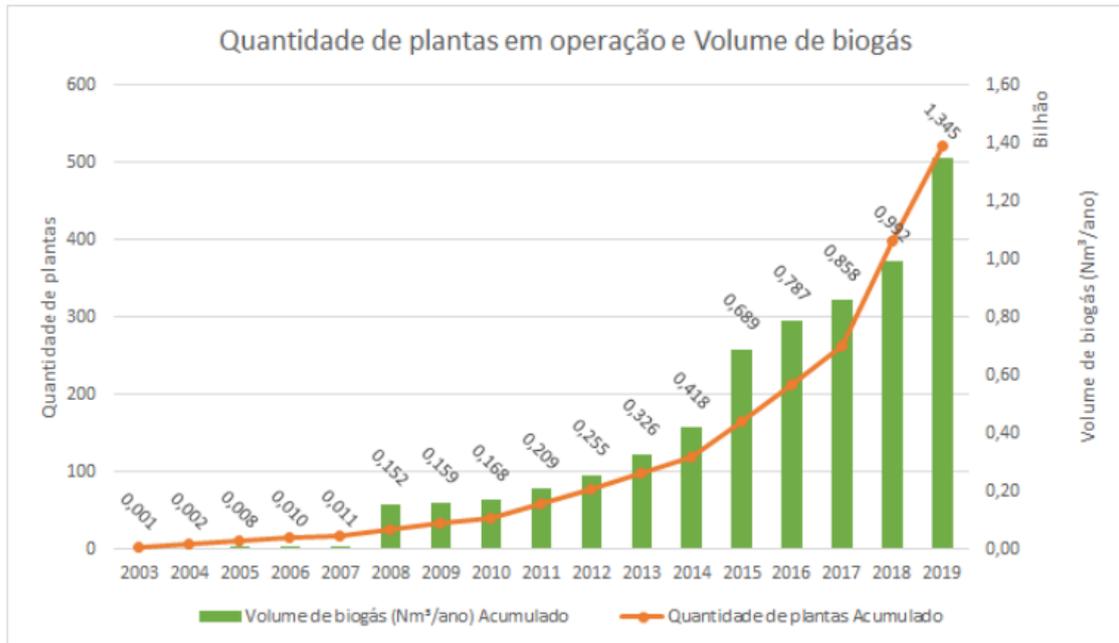
LACERDA; JÚNIOR, 2015). Enquanto a pesquisa operacional, ou modelagem como alguns autores denominam, corresponde a representações simplificadas da realidade que permitem uma compreensão do ambiente estudado (MORABITO *et al.*, 2018). Esse procedimento refere-se a modelagem de diagnóstico, composta pela modelagem do impacto dos fatores, modelagem de desempenho e relações de causa e efeito que serão estudadas para a aplicabilidade em aterros sanitários a fim de aprimorar a geração de biogás, com foco na quantidade de metano. Além disso, a pesquisa é um estudo de caso quanto aos procedimentos, pois foram coletadas informações de algumas empresas para o desenvolvimento e implantação do modelo de diagnóstico para a mensuração de desempenho.

3.2 CENÁRIO NACIONAL

O presente trabalho foi desenvolvido a partir da perspectiva brasileira de geração de biogás em aterros sanitário a partir de RSU. Porém, foi considerado de suma importância demonstrar não somente a evolução do cenário de produção de biogás em aterros sanitários, mas também em ETE, indústria e agropecuária. A Figura 5 ilustra a quantidade de plantas e volume de biogás produzido nas plantas em operação no Brasil entre 2003 e 2019 provenientes da indústria, agropecuária, RSU e ETE. Conforme a CIBiogás (2020), o número de usinas de biogás cresceu de forma exponencial nesse período. Assim como a quantidade de plantas, o volume de biogás produzido aumentou, de 2014 a 2015, em 65% e, entre 2018 e 2019, o índice de crescimento atingindo foi 36% a.a (CIBIOGÁS, 2020).

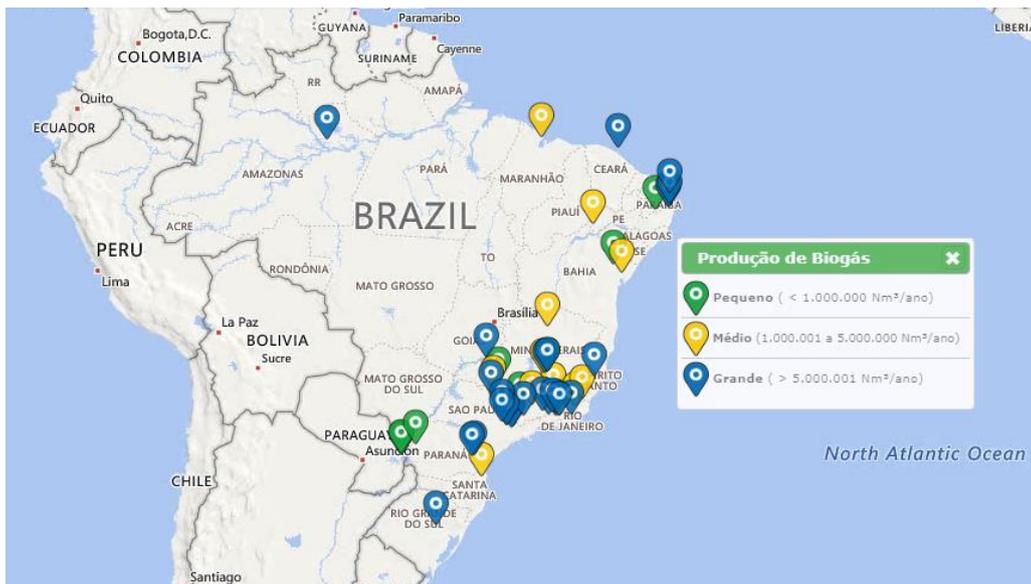
Apesar do crescimento da quantidade de plantas e biogás gerado no período de 2003 a 2019, a ABiogás e a ABRELPE estimam que o Brasil captou 4,2 bilhões de m³ de biogás no ano de 2018, quando foram destinados 43,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos para aterros sanitários (ABRELPE, 2019). Porém, apenas 9% deste potencial foi utilizado para geração de eletricidade (751 GWh) e menos de 2% produziu 35 milhões de m³ de biometano, caso toda a capacidade de geração de energia elétrica ou biometano fosse utilizada, seriam gerados 7981 GWh/ano de energia elétrica e 2,1 bilhões de Nm³/ano de biometano (ABIOGÁS, 2018). A Figura 6 apresenta a localização das plantas de biogás a partir de RSU ou ETE em operação. Segundo a CIBiogás (2020) são 43 plantas de geração de biogás em operação, com uma produção total de 1.026.527.529 m³/ano.

Figura 5 – Evolução da quantidade de plantas e volume de biogás no Brasil.



Fonte: (CIBIOGÁS, 2020).

Figura 6 – Localização das plantas de biogás no território brasileiro.



Fonte:(CIBIOGÁS, 2019).

As plantas de biogás, a partir de resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto, representam 8% das plantas em operação, quando comparadas a indústria e agropecuária. Porém, aquelas são responsáveis por 76% do biogás produzido no país. Das plantas em operação, cinco são destinadas a geração de energia térmica, 35 a geração de energia elétrica e três plantas de RSU e uma de ETE produzem biometano como aplicação energética principal no RJ, PR, CE e SP. Além dessas plantas em operação, existe uma planta de RSU que produz biometano como aplicação secundária no RJ, i.e., gera energia elétrica e/ou térmica em maior volume e em menor volume refinam o biogás, obtendo-se o biometano (CIBIOGÁS, 2020). De acordo com a ANP, atualmente são produzidos 330.000,00 m³/dia de biometano, e com a operação das plantas que estão em construção, a capacidade de produção aumentará para 127.224,00 m³/dia (ANP, 2020).

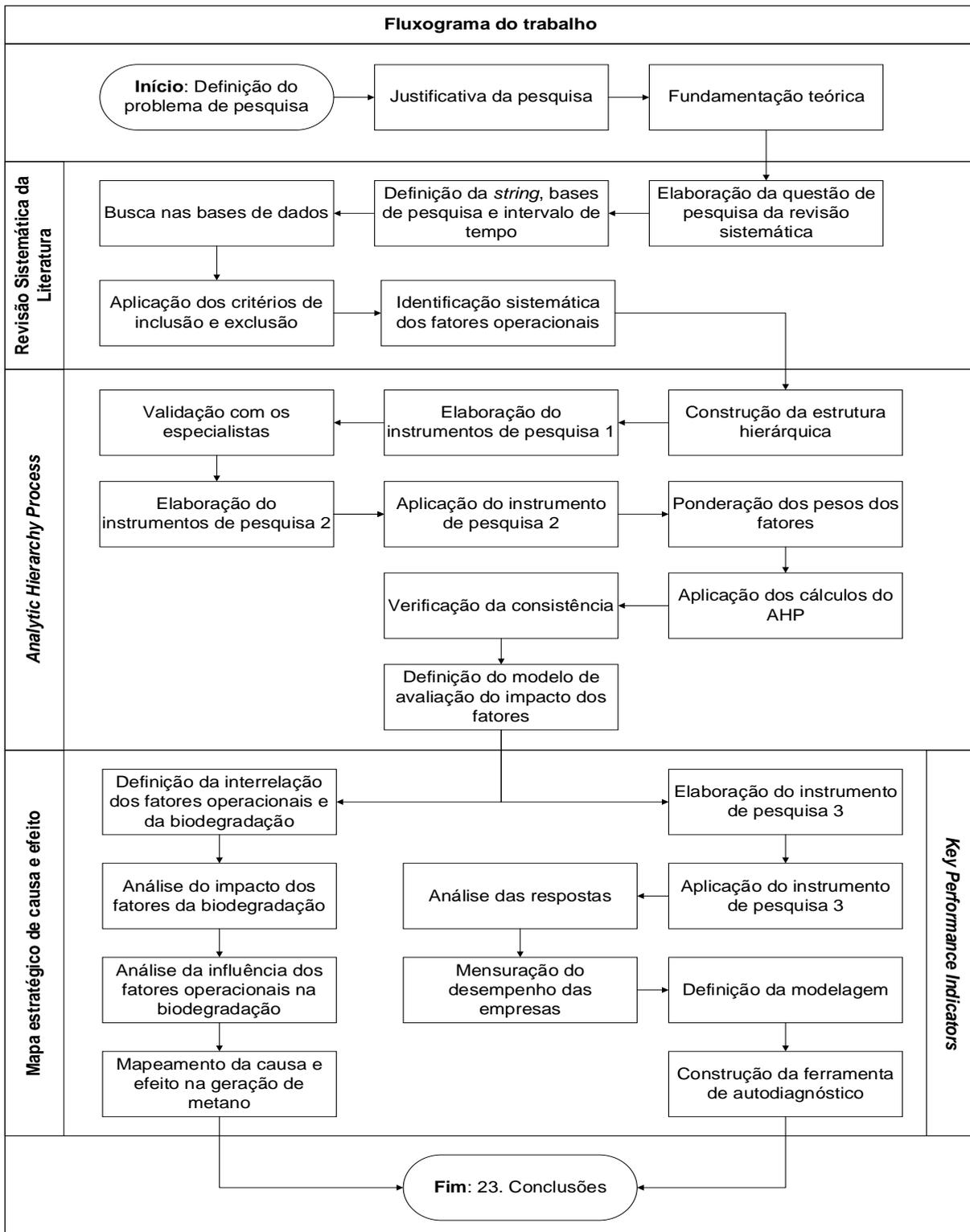
3.3 ETAPAS DA PESQUISA

O trabalho foi constituído basicamente por 28 etapas, demonstradas na Figura 7. As primeiras etapas correspondem ao processo de pesquisa bibliográfica. Com elas, o problema de pesquisa foi definido e foram realizadas pesquisas bibliográficas que o justificassem e, também, que oferecessem suporte para estruturar as delimitações e objetivos do estudo, apresentados na Seção 1. A seguir, foi desenvolvida a fundamentação teórica do escopo da pesquisa, dessa maneira o conhecimento sobre aterros sanitários, biogás e sua utilização, fatores operacionais dos aterros e os métodos utilizados para atender o objetivo do trabalho foram apresentados no Seção 2.

Uma revisão sistemática da literatura foi realizada a fim de elencar os fatores operacionais dos aterros sanitários que influenciam na geração de biogás, com foco na quantidade de metano, descritos na seção 3.3.1. Sequencialmente, a próxima etapa consistiu na elaboração da estrutura hierárquica a partir das informações encontradas na revisão sistemática da literatura. A estrutura hierárquica elaborada passou por um processo de validação, onde para isso foi desenvolvido o instrumento de pesquisa 1, seção 3.3.2.1. Dessa forma, o instrumento de pesquisa 1 foi utilizado para validar os fatores operacionais encontrados e selecionar mais critérios de acordo com a experiência dos respondentes, caso necessário. Conforme Hasson, Keeney e Mckenna (2000), para esse instrumento de pesquisa, é sugerido consultar de 5 a 20

especialistas, não mais que 50, sendo estes pesquisadores da área, nacionais e internacionais, e gestores de aterros.

Figura 7 – Fluxograma do trabalho.



Após a validação dos fatores e análise, foi realizada a elaboração da nova estrutura hierárquica e do instrumento de pesquisa 2, seção 3.3.2.2. Esse instrumento consiste em questionários referentes ao impacto que cada fator tem na geração de metano e, também, a dinâmica desse impacto quanto a idade do aterro e o clima. Após o pré-teste do instrumento de pesquisa, este foi revisado de acordo com as sugestões e, então, aplicado a especialistas, colaboradores de aterros e pesquisadores. Conseqüentemente, foi realizada a ponderação desses fatores e aplicação dos cálculos que compõem o método AHP na seção 3.3.3.

Após a aplicação do AHP e modelagem matemática, o trabalho contou com uma estrutura hierárquica dos fatores operacionais elencados de acordo com o peso do impacto de cada um e suas interrelações. A partir da ponderação do impacto dos fatores operacionais, foi realizada a mensuração do desempenho das empresas quanto a geração de metano. Para isso, um terceiro instrumento de pesquisa (seção 3.3.2.3) foi aplicado com colaboradores de diferentes empresas que operam aterros sanitário e recuperam biogás. Dessa maneira, o desempenho das empresas foi avaliado de acordo com o método *Key Performance Indicators*, seção 3.3.4. Além disso, a estrutura hierárquica possibilitou a construção do mapa estratégico de relação de causa e efeito, seção 3.3.5, no qual os fatores operacionais e subfatores foram interligados com os fatores da biodegradação dos resíduos.

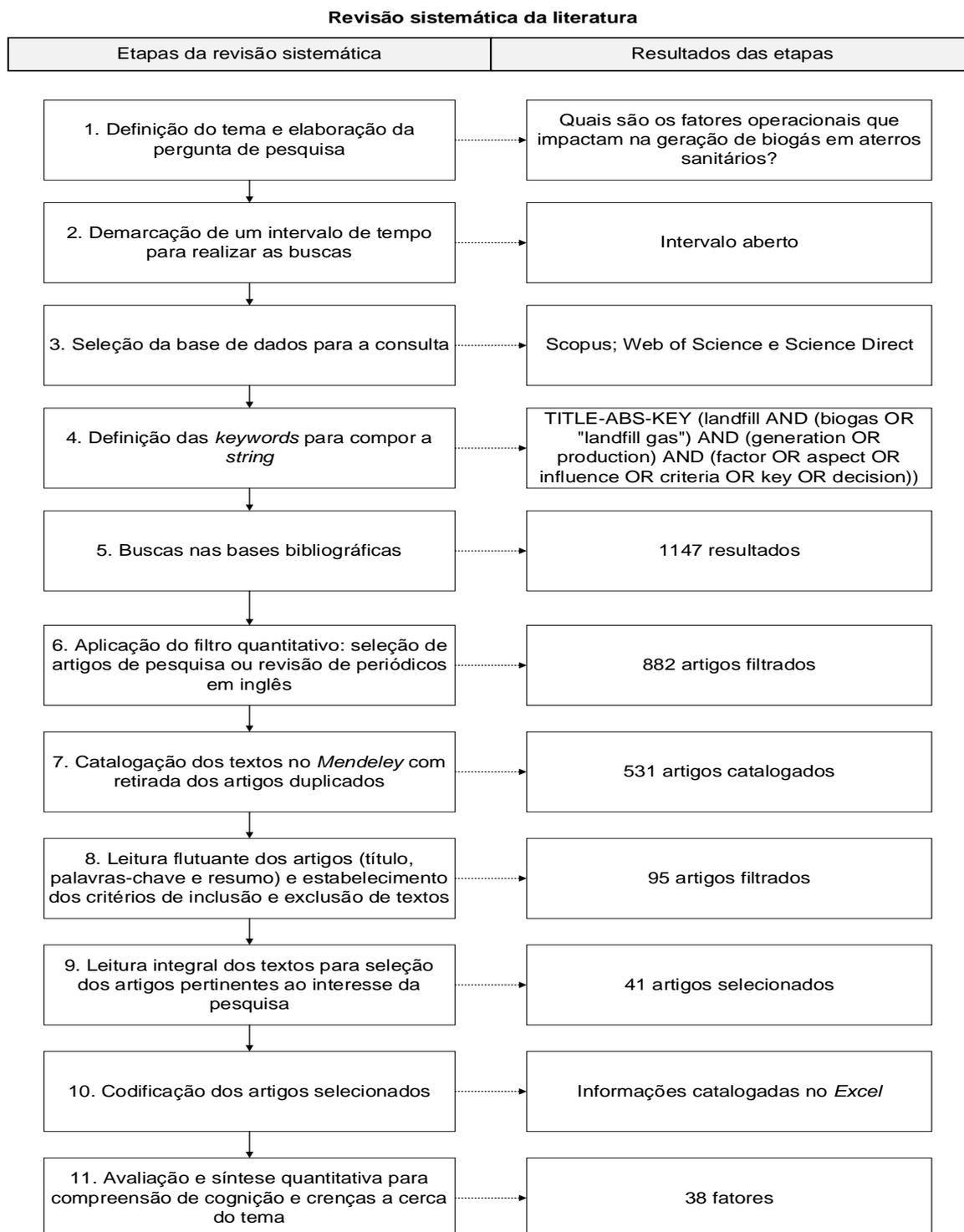
Em suma, a partir de todas as etapas da Figura 7, foi criado um modelo para a mensuração dos impactos operacionais dos aterros sanitários e, também, esse modelo foi complementado pelo desenvolvimento de uma ferramenta de autodiagnóstico do desempenho do sistema de geração de metano, com a visualização das possíveis práticas de melhoria a partir do atingimento dos indicadores.

3.3.1 Revisão sistemática da literatura (RSL)

As revisões sistemáticas buscam responder perguntas específicas de forma objetiva e imparcial (WASSIE; ADARAMOLA, 2019). Para isso, foram utilizados métodos sistemáticos, definidos a priori, para a identificação e seleção dos estudos, extração dos dados e análise dos resultados. No processo de revisão sistemática foi feito o mapeamento de um protocolo que traça explicitamente os objetivos da revisão, os critérios de inclusão e exclusão, e o modo como os estudos são identificados de

acordo com Babatunde et al. (2017). As principais etapas desenvolvidas para obtenção dos resultados estão organizadas na Figura 8.

Figura 8 – Processo da revisão sistemática da literatura.



Inicialmente foi buscada a lacuna a ser preenchida sobre o tema (DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015), o que resultou na seguinte questão para a revisão sistemática: quais são os fatores operacionais que impactam na geração de biogás em aterros sanitários? Assim, a revisão sistemática de literatura buscou identificar esses fatores.

Na segunda etapa, foi definido que não seria delimitado um intervalo de tempo. Nas etapas três e quatro, as principais palavras-chaves foram elencadas juntamente com os sinônimos e palavras relacionadas a essas, além das bases de busca. Com isso, foi definida as estratégias de busca, ou seja, foram escolhidas as palavras-chaves e bases que retornaram resultados significativos e textos relacionados (DRESCH; LACERDA; JÚNIOR, 2015). Consequentemente, as bases escolhidas foram: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*, com a *string* de busca: TITLE-ABS-KEY (landfill AND (biogas OR "landfill gas") AND (generation OR production) AND (factor OR aspect OR influence OR criteria OR key OR decision)). Logo, a etapa cinco foi realizada e a *string* foi calibrada de acordo com cada base, retornando 1147 textos. Esse processo de busca ocorreu em dois períodos, janeiro/2020 e setembro/2020, a fim de analisar todos os artigos relacionados a temática e manter a pesquisa atualizada. Dessa maneira, em janeiro de 2020, haviam somente 6 artigos publicados naquele ano, enquanto na consulta do mês de setembro de 2020, haviam 51 artigos publicados naquele ano e dois artigos para o ano de 2021.

As etapas subsequentes consistiram em aplicar os filtros de inclusão e exclusão. Assim, na sexta etapa foram incluídos artigos de pesquisa e revisão provenientes de periódicos em inglês. Com isso, foram encontrados 882 artigos, que em seguida foram adicionados ao *Software Mendeley*. Por conseguinte, na etapa sete, os artigos duplicados e sem acesso preliminarmente foram retirados, o que resultou em 531 artigos catalogados. Além disso, foram adicionados aos resultados de busca dois artigos julgados relevantes para serem analisados de acordo com o protocolo seguido pela revisão sistemática, porém não foram selecionados com a *string* de busca definida i.e. Rasapoor *et al.* (2020) e Xu, Qin e Ko, (2019). A etapa oito consistiu na leitura flutuante desses artigos, ou seja, a leitura do título, palavras-chaves e resumo, a fim de verificar a relevância dos artigos para a revisão. Os critérios de inclusão aplicados foram: (a) serão incluídos trabalhos publicados e disponíveis integralmente em bases de dados científicas; (b) serão incluídos artigos publicados que apresentem a relações entre os fatores operacionais de aterros sanitários e a

geração de biogás e; (c) serão incluídos artigos publicados que possuam métodos que mensurem os impactos de cada fator operacional na geração de biogás em aterros sanitários. Enquanto os critérios de exclusão foram: (a) serão excluídos trabalhos com menos de cinco páginas e; (b) serão excluídos trabalhos que não estão relacionados com a temática da revisão e; (c) serão excluídos artigos sem acesso na integra. Esse filtro resultou na seleção de 95 artigos.

O resultado da etapa oito não garante que todos os artigos estejam alinhados com o escopo da pesquisa, então os 95 artigos foram analisados integralmente na etapa 9. Essa etapa é denominada etapa analítica, na qual foi aplicado novamente os filtros anteriores (ADLER; VAN DOREN, 1972). Assim, 41 artigos apresentaram discussão sobre os fatores operacionais que influenciam na geração de biogás em aterros sanitários. Esses fatores foram retirados do texto e organizados em uma planilha, resultando em 38 fatores operacionais. Durante o processo de revisão, alguns fatores foram citados apenas uma vez, porém foram julgados importantes e mantidos na revisão.

3.3.2 Instrumentos de pesquisa de informações (IPI)

3.3.2.1 IPI1-Instrumento de pesquisa para validação de fatores operacionais de aterros sanitários para geração de metano

O objetivo do IPI1 foi de validar a estruturação preliminar dos fatores, oriunda da RSL, com o auxílio do painel de especialistas (APÊNDICE A). Na estrutura preliminar foi demonstrada a influência de cada fator na geração de metano e a influência entre os fatores, na qual foram definidos cinco fatores no primeiro nível, seis fatores no segundo nível e 23 subfatores. Esse instrumento de pesquisa, composto por dez questões, foi encaminhado via *Google forms* para especialistas internacionais e brasileiros da área de resíduos sólidos e recuperação de biogás, sendo pesquisadores e colaboradores de empresas do ramo. Um exemplo de questão é demonstrado pela Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de questão do IPI1.

Quanto ao fator "gerenciamento de líquidos" você possui sugestões? Alteraria, acrescentaria e/ou retiraria algum subfator?

```

graph LR
    A[Gerenciamento de líquidos] --- B[Drenagem de lixiviados]
    A --- C[Recirculação de lixiviados]
    A --- D[Adição de resíduos líquidos]
    A --- E[Irrigação subterrânea]
  
```

A sua resposta

Fonte: Autora.

Este instrumento de pesquisa obteve 10 respostas de especialistas internacionais e 14 de especialistas brasileiros. Em seguida, realizou-se a análise de cada sugestão, principalmente sobre a adição de fatores na estrutura, a influência na geração de metano, entre outros. Uma nova estrutura foi proposta a partir do processo de validação, onde foram representados seis fatores ligados ao processo de biodegradação, seis fatores operacionais e 33 subfatores operacionais.

3.3.2.2 IPI2-Fatores operacionais de aterros sanitários: como melhorar a geração de metano?

O objetivo do IPI2 foi de questionar os especialistas sobre o impacto dos fatores na geração de metano (APÊNDICE B). Esse instrumento foi elaborado a partir da nova estrutura, pós validação. Antes da aplicação desse instrumento, foi realizado um pré-teste, a fim de verificar a aplicabilidade do questionário com professores, alunos de pós-graduação e pessoas não vinculadas a universidade devido a quantidade de

fatores. Por questões de complexidade, foi decidido que o IPI2 questionaria o impacto de cada um dos 33 subfatores operacional separadamente e seis fatores da biodegradação, isto é, foram realizadas 14 perguntas, das quais sete questionaram de forma direta o impacto de cada fator, utilizando a opção de pergunta tipo grelha e uma escala Likert para a ponderação. Um exemplo de questão do instrumento de pesquisa é demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo de questão do IPI2.

Qual o impacto dos fatores relacionados ao gerenciamento de líquidos na geração de metano? A recirculação de lixiviados superficial corresponde a distribuição do lixiviado na superfície da célula.

	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Recirculação de lixiviados	<input type="radio"/>				
Drenagem de lixiviados	<input type="radio"/>				
Drenagem pluvial	<input type="radio"/>				

Fonte: Autora.

As escalas de Likert são confiáveis e simples de construir, onde os sujeitos da pesquisa respondem informando um determinado grau de impacto (ALONSO; BRESSAN, 2016). As questões foram elaboradas para que as respostas dos especialistas obedecessem a uma escala linear de concordância sobre o impacto dos

fatores na geração de metano. As opções de alternativas e a pontuação para as questões são apresentadas conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Grau de impacto dos fatores.

Resposta	Pontuação
Nenhum impacto	1
Impacto fraco	2
Impacto moderado	3
Impacto forte	4
Impacto muito forte	5

Fonte: Autora.

Para complementar as análises, os seis fatores operacionais foram comparados par a par em um segundo momento. Dessa maneira, foram realizadas 15 perguntas comparativas sobre o impacto dos fatores na geração de metano, como exemplificado na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de questão par-a-par do IPI2.

Qual o impacto dos fatores SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS e GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS * na geração de metano?

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS é extremamente superior que do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS.

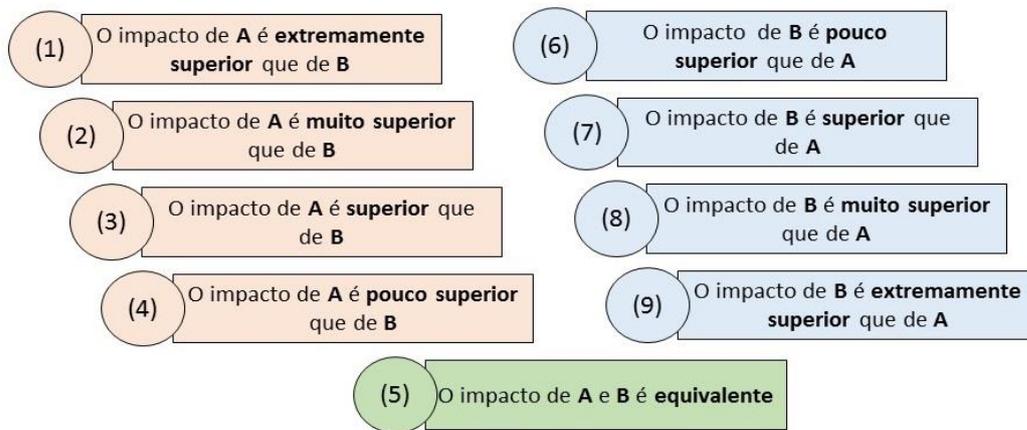
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

O impacto do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS é extremamente superior que do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS .

Fonte: Autora.

A escala utilizada para a avaliação está representada na Figura 12. Nela foi descrita a comparação entre dois fatores, A e B, para auxiliar os especialistas a responder as questões.

Figura 12 – Escala ilustrativa para a avaliação dos especialistas.



Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

No IPI2 também foram realizadas perguntas quanto a dinâmica do impacto de cada fator de acordo com a idade do aterro sanitário e o clima da região na qual o aterro está instalado. Por fim, foi questionado se algum dos fatores apresentados impactavam negativamente na geração de metano e se havia alguma sugestão. Dessa maneira, o segundo instrumento de pesquisa de informação obteve 15 respostas de especialistas brasileiros e 19 respostas de especialistas internacionais, totalizando 34 respostas. A relação de especialistas de acordo com o país de origem, sua ocupação e o clima ou características climáticas nas quais já trabalhou com recuperação de biogás é demonstrado no Quadro 4, de acordo com as respostas de cada especialista.

Quadro 4 – Lista de especialistas.

(continua)

Especialista	Ocupação	Clima/Características climáticas	País
E1	Engenheiro	Tropical	Brasil
E2	Professor	Tropical úmido	Brasil
E3	Engenheiro ambiental	Tropical e subtropical	Brasil
E4	Gerente de operações	Tropical	Brasil
E5	Engenheiro	Tropical	Brasil
E6	Engenheiro ambiental	Tropical de altitude	Brasil
E7	Pesquisador-geoquímico	Tropical (região central, verões chuvosos e inverno seco)	Brasil
E8	Gerente operacional	Tropical	Brasil
E9	Engenheiro ambiental	Tropical e temperado	Brasil

Quadro 4 – Lista de especialistas.

(conclusão)

Especialista	Ocupação	Clima/Características climáticas	País
E10	Engenheiro de energia	Tropical e subtropical	Brasil
E11	Engenheiro	Tropical, equatorial e temperado	Brasil
E12	Engenheiro sanitaria e ambiental	Tropical	Brasil
E13	Engenheiro sanitaria	Tropical e subtropical	Brasil
E14	Engenheiro	Tropical	Brasil
E15	Engenheiro	Tropical úmido	Brasil
E16	Engenheiro (gestão de resíduos sólidos, biotratamento, resíduos orgânicos)	Temperado	França
E17	Engenheiro do Centro de gestão de resíduos	Temperatura média 27 °C e precipitação <1000mm	Índia
E18	Professor	Mediterrâneo	EUA
E19	Professor	Temperado	UK
E20	Professor	Temperado e úmido	UK
E21	Professor	Subtropical úmido	Hong Kong
E22	Engenheiro de aterro sanitário	Principalmente no leste dos EUA, mas também no Líbano e na Índia- Temperado continental, tropical e mediterrâneo.	EUA
E23	Diretor de aterro sanitário	Temperado	França
E24	Gerente de projetos para biogás	Todos	Holanda
E25	Pesquisador	Todos	EUA
E26	Consultor	Tropical	Colômbia
E27	Pesquisador	-	África do Sul
E28	Pesquisador	-	China
E29	CEO do <i>Delaware Solid Waste Authority</i>	Temperado	EUA
E30	Professor	Temperado	Dinamarca
E31	Professor	Úmido e quente	EUA
E32	Diretor- <i>General Waste</i>	Climas quentes	Emirados Árabes Unidos
E3	Engenheiro de aterro sanitário e supervisor	Temperado	UK
E34	Professor	Regiões com precipitação anual de 100-180 cm ou mais.	EUA

Fonte: Autora.

As considerações quanto a ocupação do especialista e quanto ao clima foram necessárias pois, dependendo dessas duas variáveis, o mesmo pode ter tendências quanto ao julgamento dos fatores. Assim, os cálculos para o impacto dos fatores foram

separados quanto a ocupação e quanto ao clima, o que possibilitou a observação do comportamento dos fatores nessas duas perspectivas.

3.3.2.3 IPI3-Qual o desempenho da sua empresa quanto a geração de biogás?

O objetivo do IPI3 foi de avaliar o desempenho das empresas na geração de biogás, com foco no aprimoramento da quantidade de metano (APÊNDICE C). Além disso, o IPI3 auxiliou no desenvolvimento de uma ferramenta que possibilita o autodiagnóstico do sistema de geração de biogás das empresas com a visualização das possíveis práticas de melhoria. Os respondentes foram gerentes operacionais de diferentes empresas que operam aterros sanitários no Brasil, totalizando seis respostas. Nesse instrumento de pesquisa, cada subfator operacional foi questionado uma ou mais vezes sobre sua adequação, realização, importância ou/e satisfação do respondente quanto ao sistema. Em suma, as alternativas apresentadas para cada pergunta aos especialistas eram compostas de cinco pontos, demonstradas no Quadro 5 com sua escala mínima e máxima, juntamente com as 37 questões (indicadores) e fatores.

Quadro 5 – Fatores operacionais, indicadores e escala de avaliação IPI3.

(continua)

<i>p</i>	Fator operacional	<i>k</i>	Subfator	<i>z</i>	Indicador	Escala mínima	Escala máxima
1	Sistema de drenagem de gás	1	Tipo de sistema	1	Qual a eficiência do sistema de coleta de gás?	Menor que 35%	Maior que 80%
				2	Qual o percentual de ar infiltrado no sistema de coleta?	Maior que 10%	Menor que 3%
		2	Tipo de poço	3	Quão satisfeito você está com os tipos de poços de coleta utilizados no aterro?	Insatisfeito	Muito satisfeito
		3	Dimensionamento	4	Quão satisfeito você está com o dimensionamento do sistema de drenagem de gás?	Insatisfeito	Muito satisfeito
				5	Quão satisfeito você está com a frequência das manutenções realizadas no sistema de drenagem de gás?	Insatisfeito	Muito satisfeito

Quadro 5 – Fatores operacionais, indicadores e escala de avaliação IPI3.

(continuação)

<i>p</i>	Fator operacional	<i>k</i>	Subfator	<i>z</i>	Indicador	Escala mínima	Escala máxima
1	Sistema de drenagem de gás	3	Dimensionamento	6	Quão satisfeito está com o sistema de tratamento do gás sulfídrico (H ₂ S)?	Insatisfeito	Muito satisfeito
2	Gerenciamento de líquidos	4	Drenagem de lixiviado	7	Quanto a drenagem de lixiviados:	Não é realizada a drenagem de lixiviados	A drenagem de lixiviados é eficiente com quase 100% sendo drenado
		5	Recirculação de lixiviado	8	Quanto a recirculação de lixiviados:	Não é realizada a recirculação de lixiviados, mas é necessário	Não é realizada e não é necessário
		6	Drenagem pluvial	9	Quanto a drenagem pluvial:	Não é realizada drenagem pluvial	A drenagem pluvial é eficiente
3	Características do local	7	Composição do resíduo	10	Quanto a composição do resíduo recebido para a geração de biogás afim de recuperá-lo energeticamente:	Inadequado	Totalmente adequado
				11	Qual o percentual de metano no biogás?	Menor que 45%	Maior que 70%
		8	Quantidade de resíduo recebido	12	Quanto a quantidade de resíduo recebido visando a geração de biogás para sua recuperação energética:	Inadequada	Totalmente adequada
		9	Condições climáticas	13	Quão adequado o projeto, instalação e operação do aterro é em relação as condições climáticas (precipitação, temperatura e umidade do ar) de onde está localizado?	Inadequados	Totalmente adequados
		10	Profundidade do aterro	14	Quanto a profundidade do aterro e sua relação com a geração de biogás e drenagem de gás:	Inadequada	Totalmente adequada

Quadro 5 – Fatores operacionais, indicadores e escala de avaliação IPI3.

(continuação)

<i>p</i>	Fator operacional	<i>k</i>	Subfator	<i>z</i>	Indicador	Escala mínima	Escala máxima
3	Características do local	11	Condições hidrológicas	15	Quão adequado o projeto, instalação e operação do aterro são em relação as condições hidrológicas de onde está localizado?	Inadequados	Totalmente adequados
		12	Vida útil	16	Quanto a vida útil do aterro:	Menor que 15 anos	Maior que 45 anos
		13	Extensão do aterro	17	Quanto a extensão do aterro:	Inadequada	Totalmente adequada
		14	Tipo de solo	18	Quanto ao tipo de solo presente no local aterro em relação as práticas de impermeabilização:	Inadequado	Totalmente adequado
		15	Condições geográficas	19	Quão adequado o projeto, instalação e operação do aterro são em relação as condições geográficas (topografia e pressão atmosférica) de onde está localizado?	Inadequados	Totalmente adequados
4	Disposição de resíduos	16	Separação	20	Quanto ao processo de separação de resíduos no aterro (considere a segregação das células com resíduos não orgânicos ou outras classes de resíduos, que poderiam impactar negativamente na geração de biogás):	Não importante e não realizado	Importante e realizada totalmente
		17	Secagem	21	Caso o pré-tratamento secagem de resíduos ocorra, quão satisfeito você está visando a recuperação de biogás?	Insatisfeito	Muito satisfeito
		18	Triagem	22	Quanto ao processo de triagem de resíduos:	Não importante e não realizada	Importante e realizada para todos os resíduos que chegam no aterro

Quadro 5 – Fatores operacionais, indicadores e escala de avaliação IPI3.

(continuação)

<i>p</i>	Fator operacional	<i>k</i>	Subfator	<i>z</i>	Indicador	Escala mínima	Escala máxima
4	Disposição de resíduos	19	Incineração	23	Caso o pré-tratamento incineração de resíduos ocorra, quão satisfeito você está visando a recuperação de biogás?	Insatisfeito	Muito satisfeito
		20	Técnica de colocação	24	Quanto a técnica de colocação de resíduos:	Inadequada	Totalmente adequada
		21	Compactação	25	Quanto a compactação dos resíduos:	Inadequada	Totalmente adequada
		22	Trituração	26	Quão importante é o processo de trituração dos resíduos?	Não importante e não realizado	Importante e realizado para todos os resíduos
5	Sistema de revestimento	23	Impermeabilização	27	Quão satisfeito está com a impermeabilização do aterro?	Insatisfeito	Muito satisfeito
		24	Material utilizado	28	Quão adequados são os materiais utilizados nas camadas diárias, intermediárias e finais do aterro?	Inadequados	Totalmente adequados
		25	Técnica utilizada	29	Quão adequadas são as técnicas utilizadas nas camadas diárias, intermediárias e finais do aterro?	Inadequadas	Totalmente adequadas
		26	Frente operacional	30	Quão adequado é o tamanho da frente operacional para o bom funcionamento do aterro, conseqüentemente recuperação de biogás?	Inadequado	Totalmente adequado
		27	Características do solo	31	Quanto as características do solo utilizado nas camadas diárias, intermediárias e finais:	Inadequadas	Totalmente adequadas
		28	Declividade	32	Quão adequada é a declividade das camadas para o bom funcionamento do aterro?	Inadequada	Totalmente adequada
		29	Recuperação da vegetação	33	Quão importante é a recuperação da vegetação	Não importante e não realizada	Muito importante e realizada

Quadro 5 – Fatores operacionais, indicadores e escala de avaliação IPI3.

(conclusão)

<i>p</i>	Fator operacional	<i>k</i>	Subfator	<i>z</i>	Indicador	Escala mínima	Escala máxima
6	Aprimoramento da atividade microbiana	30	Controle do pH/alcalinidade	34	Quanto ao controle interno de pH e alcalinidade:	Não importante e não realizado	Importante e realizado sempre que necessário
		31	Remoção de contaminantes	35	Quanto a remoção de contaminantes, agentes tóxicos e inibidores do processo biológico no aterro:	Não importante e não realizada	Importante e realizada sempre que necessário
		32	Adição de nutrientes	36	32.1 Quanto a adição de nutrientes na massa de resíduos:	Não importante e não realizada	Importante e realizada sempre que necessário
		33	Adição de inóculo	37	33.1 Quanto a adição de inóculo (lodo de estações de tratamento de efluente ou de estações de tratamento anaeróbico de resíduos agrícolas ou industriais) na massa de resíduos:	Não importante e não realizada	Importante e realizada sempre que necessário

Fonte: Autora.

3.3.3 Modelagem dos fatores operacionais para a ponderação do impacto

O desenvolvimento do modelo para mensurar o impacto dos fatores operacionais na geração de metano utilizou os processos da Tabela 4 e os julgamentos dos especialistas do IPI2 da seção 3.3.2.2, onde foram comparados os seis fatores operacionais a partir da escala da Figura 12. Com isso, a Tabela 4 possui dez etapas de cálculo, sendo que com as etapas de um a cinco foi estabelecido o peso de cada um dos fatores operacionais selecionados e julgados pelos especialistas. Enquanto que, nas etapas seis a dez, foi avaliada a consistência dos julgamentos dos fatores operacionais.

Como mencionado na seção 3.3.2.2 *IPI2-Fatores operacionais de aterros sanitários: como melhorar a geração de metano?*, foram realizados quinze questionamentos para a comparação pareada dos seis fatores operacionais diretamente ligados a geração de metano. Assim, cada respondente julgou as quinze variáveis representadas na Tabela 5.

Tabela 4 – Processo para aplicação da AHP.

Processo		Descrição e Julgamento	Equações
1	Construção da matriz de Julgamentos A	Os elementos diagonais da matriz são sempre 1. O critério da linha i é melhor que o critério da coluna j se o valor do elemento a_{ij} for maior que 1 e a_{ji} é o elemento recíproco. O número de critérios é igual a n .	$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \\ a_{1n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$
2	Multiplicação dos elementos de cada linha	Após o julgamento da matriz A, é necessário multiplicar os n elementos da linha i .	$a_i = \prod_{i=1}^n a_{in}$
3	Cálculo da raiz n -ésima	Após determinar o termo a_i , toma-se a raiz n -ésima do termo resultante de cada linha. Isso resultará em uma matriz de peso W_i .	$W_i = \sqrt[n]{a_i}$
4	Normalização da matriz de pesos	Depois de calcular a matriz coluna dos pesos W_i é necessário normalizar os elementos.	$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$
5	Apresentação da matriz dos pesos de cada critério	Com a normalização dos pesos, tem-se a matriz dos pesos dos critérios.	$w' = \begin{bmatrix} w'_1 \\ \vdots \\ w'_n \end{bmatrix}$
6	Verificação da consistência da Matriz A: cálculo do b_i	A consistência da matriz é avaliada através de seu autovalor máximo, que deve ser aproximadamente igual a n . Para isso, calcula-se o parâmetro b_i .	$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \times w'_j$
7	Verificação da consistência da Matriz A: cálculo do c_i	Dividir os resultados de b_i pelos valores da Matriz normalizada, W' .	$c_i = \frac{b_i}{w'_i}$
8	Verificação da consistência da Matriz A: cálculo do autovalor máximo	O autovetor mostra a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento.	$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n c_i}{n}$
9	Verificação da consistência da Matriz A: cálculo do índice de consistência	Índice de consistência do julgamento (IC), onde n é a ordem da matriz dos pesos.	$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$
10	Verificação da consistência da Matriz A: cálculo da relação de consistência	A relação de consistência (RC) é a razão entre o IC e um índice Randômico (IR) médio tabelado. A RC com 0,10 ou menos é aceitável.	$RC = \frac{IC}{IR}$

Fonte: (RIGO *et al.*, 2020).

Onde:

A = Matriz de julgamentos de i linhas e j colunas ($\forall i, j = \{1, 2, \dots, n\}$);

w_i = Peso da linha i não normalizada;

w' = Matriz de pesos normalizada;

λ_{max} = Autovalor máximo da matriz de julgamentos;

IC = Índice de consistência da matriz de julgamentos;

IR = índice Randômico; e

RC = Relação de consistência da matriz de julgamentos.

Tabela 5 – Variáveis de comparação.

	Comparação dos fatores	Variáveis (a_{ij})
1	Sistema de drenagem de gás x Gerenciamento de líquidos	a_{12}
2	Sistema de drenagem de gás x Características do local	a_{13}
3	Sistema de drenagem de gás x Disposição de resíduos	a_{14}
4	Sistema de drenagem de gás x Sistema de revestimento	a_{15}
5	Sistema de drenagem de gás x Aprimoramento da atividade microbiana	a_{16}
6	Gerenciamento de líquidos x Características do local	a_{23}
7	Gerenciamento de líquidos x Disposição de resíduos	a_{24}
8	Gerenciamento de líquidos x Sistema de revestimento	a_{25}
9	Gerenciamento de líquidos x Aprimoramento da atividade microbiana	a_{26}
10	Características do local x Disposição de resíduos	a_{34}
11	Características do local x Sistema de revestimento	a_{35}
12	Características do local x Aprimoramento da atividade microbiana	a_{36}
13	Disposição de resíduos x Sistema de revestimento	a_{45}
14	Disposição de resíduos x Aprimoramento da atividade microbiana	a_{46}
15	Sistema de revestimento x Aprimoramento da atividade microbiana	a_{56}

Fonte: Autora.

A partir dos julgamentos das quinze variáveis, o processo de ponderação foi iniciado a partir da matriz de julgamentos A , a qual possui ordem $n = 6$ ($i, j = \{1, 2, \dots, 6\}$), conforme Equação (1).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{16} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A partir da realização dos processos de um a cinco da Tabela 4, foi obtida a matriz de pesos dos fatores (processo cinco), Equação (2). Essa matriz é composta por uma coluna e seis linhas, onde cada linha corresponde ao peso de um fator operacional, sendo que o índice p representa cada fator ($p = \{1, 2, \dots, 6\}$).

$$w_{FO} = \begin{bmatrix} w_{FO_1} \\ \vdots \\ w_{FO_6} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A fim de encerrar o processo de ponderação, foi calculado a Relação de Consistência (RC) da matriz de julgamentos A , processos seis a dez da Tabela 4. Para o cálculo da relação de consistência foi considerada a Tabela 6, com o índice randômico tabelado (IR). Como a matriz possui ordem seis, o IR utilizado foi 1,25.

Tabela 6 – Índice randômico.

Ordem da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: (SAATY; VARGAS 2012).

As RCs das matrizes encontradas foram iguais ou menores a 0,10, e então a consistência de cada opinião foi considerada aceitável. Porém, caso fosse mais que 0,10 seriam necessários mais especialistas para modificar os pesos subjetivos, a fim de obter uma maior concordância (WANG *et al.*, 2009).

Após o cálculo dos pesos dos fatores operacionais, foi calculado o peso dos subfatores e, conseqüentemente, o peso global dos mesmos, para construir o *ranking* final do impacto dos subfatores na geração de metano. Essa etapa utilizou o julgamento dos especialistas a partir da escala *Likert* apresentada na Tabela 3 da seção 3.3.2.2. O cálculo dos pesos dos subfatores foi realizado a partir da Equação (3), que é o impacto do subfator dividido pelo somatório do impacto dos subfatores de um determinado fator operacional.

$$w_{SF_k} = \frac{i_{SF_k}}{\sum_{k=1}^m i_{SF_k}}, \quad \forall k \in p = \{1, \dots, 6\} \quad (3)$$

Onde w_{SF_k} é o peso do subfator, k é o índice do subfator $\{1,2,\dots,33\}$, i_{SF_k} é o impacto julgado para o SF_k e $\sum_{k=1}^m i_{SF_k}$ é o somatório do impacto de todos os subfatores pertencentes ao fator operacional associado. Finalmente, o peso global do subfator, representado por w_{gk} , consiste em multiplicar o peso do subfator, w_{SF_k} , pelo peso do fator operacional associado a ele, sendo este w_{FO_p} com $p = \{1, \dots, 6\}$, de acordo com a Equação (4).

$$w_{gk} = w_{SF_k} \times w_{FO_p}, \quad \forall k \subset p = \{1, \dots, 6\} \quad (4)$$

Esse processo de ponderação do impacto dos fatores e subfatores foi realizado para a opinião de cada um dos especialistas. Dessa maneira, para o desenvolvimento da pesquisa, foi considerado o julgamento de mais de um especialista, de acordo com a seção 3.3.2.2. Isso porque, a opinião de em um único especialista, pode representar riscos na tomada de decisões devido às limitações pessoais de experiências, preferências, tendências ou vieses. Como consequência, os julgamentos por vários especialistas podem ser dispersos, já que os especialistas podem abordar o mesmo problema de maneiras diferentes. Então, foi realizada a agregação das prioridades individuais, isto é, a agregação do *ranking* final de cada especialista a partir da média geométrica.

A agregação das prioridades individuais foi utilizada pois o grupo de especialista não é homogêneo e consiste de partes interessadas de diferentes campos (colaboradores de empresas, pesquisadores, entre outros) (GROŠELJ *et al.*, 2015). Além disso, o método de média geométrica é utilizado para agregação no modelo proposto por Saaty (1987). Visto que, na AHP, a escala têm precisamente o significado de representar quantas vezes mais uma alternativa domina (em termos de preferência ou julgamento) outra alternativa, logo a média geométrica é mais adequada para agregação, pois satisfaz diretamente a homogeneidade (BERNASCONI; CHOIRAT; SERI, 2014). Também, a média geométrica é menos afetada por valores extremos quando comparada à média aritmética (AULL-HYDE; ERDOGAN; DUKE, 2006), o que reflete adequadamente as informações de preferência contidas nas matrizes de comparação pareadas locais (STOKLASA; KREJ, 2018).

3.3.4 Modelagem de mensuração do desempenho por *Key Performance Indicators*

O processo de modelagem do desempenho das empresas ocorreu a partir da mensuração do desempenho do sistema de geração de biogás, com foco na produção de metano em relação aos 33 subfatores elencados. Para a avaliação desses subfatores, foram delimitadas 37 questões de mensuração, ou seja, indicadores, que foram descritos no Quadro 5, juntamente com o máximo e mínimo da escala de mensuração. Essas questões foram respondidas pelos colaboradores de empresas a partir do IPI3.

A escala de mensuração utilizada foi construída com cinco níveis para todas as questões. Para qualquer questão no IPI3, a primeira alternativa representou a pior possibilidade para o indicador, e a última alternativa refletiu a situação ideal para o indicador. Assim, com o intuito de construir indicadores normalizados para a mesma escala, o que permite compreensão e agregação dos mesmos, foram propostos, para todos os indicadores, funções lineares com pontuações entre 0 e 1, que representam o desempenho alcançado pela empresa no indicador pela perspectiva do respondente. Dessa maneira, a melhor alternativa para as questões realizadas correspondeu a pontuação máxima, 1 ponto, enquanto a pontuação mínima, 0 pontos, refletiu a pior alternativa para a situação proposta. Além disso, para os níveis intermediários, foram consideradas pontuações proporcionais de 0,25, 0,50 e 0,75 pontos. Um exemplo do indicador do subfator operacional “tipo de sistema” está apresentado no Quadro 6, juntamente com a escala de desempenho e as alternativas.

Quadro 6 – Exemplo de indicador, alternativas e escala de desempenho.

Indicador	
Tipo de sistema: Qual a eficiência do sistema de coleta de gás?	
Alternativas	Desempenho (KPI₁)
Menor que 35%	0
Entre 35% e 50%	0,25
Entre 50% e 60%	0,50
Entre 60% e 80%	0,75
Maior que 80%	1

Fonte: Autora.

A partir das respostas do colaborador de cada empresa, de acordo com sua perspectiva quanto ao sistema de geração que trabalha, foi mensurado o desempenho global quanto à geração de biogás. Então, foi calculado o índice global do desempenho da empresa, representado por I_β , de acordo com a Equação (5). Nesta, foi multiplicado o peso do indicador pelo valor da sua mensuração, onde z é o índice do indicador ($z = \{1, \dots, 37\}$) (PARMENTER, 2015).

$$I_\beta = \sum_{z=1}^{37} w_{KPI_z} \times KPI_z \quad \forall z \in k \{1, \dots, 33\} \quad (5)$$

O KPI_z indica o desempenho alcançado pela empresa β no indicador z e w_{KPI_z} corresponde ao peso do indicador z , $\forall w_{KPI_z} \in \{0, \dots, 100\%\}$. Além disso, $\beta \in \{1, 2, \dots, 6\}$ representa as empresas avaliadas e $I_\beta \in \{0, \dots, 100\%\}$.

Para a maioria dos indicadores, o seu peso (w_{KPI_z}) é igual ao peso global do subfator correspondente (w_{g_k}). Porém, quando um subfator é mensurado a partir de dois ou mais indicadores, o seu peso global é dividido pelo número de indicadores para se mensurar o desempenho da empresa naquele indicador. Neste trabalho isso ocorreu com três subfatores: primeiro com o subfator “tipo de sistema”, que foi mensurado pelos indicadores “eficiência de coleta” e “ar infiltrado”, sendo o peso deste subfator $w_{g_1} = 8,40\%$ e o peso dos seus indicadores $w_{KPI_1} = w_{KPI_2} = 4,20\%$. O mesmo ocorreu com o subfator “dimensionamento”, que possui peso global $w_{g_3} = 7,19\%$, o qual foi mensurado pelos indicadores “dimensionamento do sistema”, “frequência de manutenções” e “tratamento de gás sulfídrico (H_2S)” com pesos globais $w_{KPI_4} = w_{KPI_5} = w_{KPI_6} = 2,40\%$. Por fim, ocorreu também com o subfator “composição de resíduos” que foi mensurado pelos indicadores “composição de resíduos recebidos” e “percentual de metano no biogás” e apresentaram pesos globais $w_{g_7} = 0,79\%$ e $w_{KPI_{10}} = w_{KPI_{11}} = 0,40\%$, respectivamente.

Para saber o percentual que o indicador contemplou o valor ideal foi expresso no nível de atingimento deste (N_z). Assim, o N_z corresponde à divisão do desempenho do indicador pelo impacto do mesmo, de acordo com a Equação 6, ou somente o desempenho alcançado pela empresa no indicador z . Enquanto que o nível de atingimento do subfator (N_k) corresponde à média aritmética do atingimento dos indicadores que o compõem. O atingimento do fator operacional (N_p) correspondeu a

divisão do somatório do desempenho dos KPIs (I_{KPI_z}), presentes no fator operacional p , pelo impacto do mesmo fator operacional, Equação 7

$$N_z = \frac{w_{KPI_z} KPI_z}{w_{KPI_z}} = KPI_z \quad z = \{1, \dots, 37\} \quad (6)$$

$$N_p = \frac{\sum_{z=1}^m w_{KPI_z} KPI_z}{w_{FO_p}} = \frac{\sum_{z=1}^m I_{KPI_z}}{w_{FO_p}} \quad \forall z \in p = \{1, 2, \dots, 6\} \quad (7)$$

O valor resultante da Equação 5 é o objetivo do modelo. Cada empresa obteve como resultado um número que correspondeu ao nível de desempenho alcançado, representado pelo índice global de desempenho (I_β). Afim de julgar os sistemas de geração de cada empresa com base neste índice, foi elaborado quatro julgamentos. Assim, foi possível avaliar os resultados quantitativos e, conseqüentemente, converter os mesmos em parâmetros qualitativos conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Escala de avaliação do desempenho das empresas.

I_β	Descrição
0% ----- 25%	Desempenho insatisfatório
25% ----- 50%	Desempenho pouco satisfatório
50% ----- 75%	Desempenho potencialmente satisfatório
75% ----- 100%	Desempenho plenamente satisfatório

Fonte: Adaptado de Rigo *et al.* (2020), Rosa *et al.* (2020) e Zanardo *et al.* (2018).

Para os quartis abaixo da média, o sistema apresentou desempenho pouco satisfatório e assim necessita de melhorias quanto a operação. Porém, quando o índice foi menor que 25%, o desempenho foi considerado insatisfatório e, provavelmente, a empresa nessa faixa, recupera de forma passiva biogás, não desenvolve e/ou enfatiza práticas operacionais visando a geração de biogás para recuperação energética. Conseqüentemente, a viabilidade dos seus sistemas de geração pode ser muito baixa ou inviável. Por outro lado, quando o desempenho de determinada empresa foi observado acima de 50%, seu desempenho é potencialmente satisfatório. Isso porque ela está em conformidade com os critérios

mínimos, porém pode aprimorar e focar seus esforços em algumas ações quanto a melhoria do sistema. Se a empresa optar por desenvolver melhores práticas para o aprimoramento do seu sistema, ela pode aumentar seu desempenho para mais de 75%, que foi considerado plenamente satisfatório.

3.3.5 Avaliação da causa e efeito na geração de metano

A avaliação de causa e efeito utilizou a estrutura construída a partir da RSL e validação dos especialistas, IPI1. Também foi considerado os julgamentos realizados pelos especialistas no IPI2 e os processos de ponderação da seção 3.3.3. Nesta avaliação, foi considerado que existem seis fatores operacionais, 33 subfatores que compõem os fatores operacionais e 6 fatores relacionados a biodegradação nos aterros sanitários, i.e., teor de umidade, densidade, potencial *redox*, fração de carbono orgânico e pH/alcalinidade. Então, foi construída uma segunda estrutura de fatores, na qual os subfatores operacionais são relacionados aos fatores da biodegradação. Isso porque, para que ocorram mudanças nos fatores da biodegradação e, então, impacte diretamente na geração de metano a partir do processo de biodegradação anaeróbica, os subfatores operacionais precisam ser alterados, ou seja, as práticas operacionais impactam no processo de biodegradação.

Os fatores da biodegradação também foram julgados pelos especialistas no IPI2 e, a partir desses julgamentos, seu impacto na geração de metano foi ponderado. Além disso, para representar as influências sofridas pelos subfatores operacionais, foi realizado um somatório destas para cada fator da biodegradação.

3.4 MATRIZ DE AMARRAÇÃO

A Figura 13 corresponde a matriz de amarração do trabalho. Esta apresenta o relacionamento entre o problema de pesquisa e todos os demais processos desta dissertação. O intuito é auxiliar a compreender a relação entre os componentes da dissertação na condução do problema de pesquisa ao objetivo geral do trabalho, e sumariza tudo o que foi apresentado neste documento. Assim como, identificar se existem divergências entre os objetivos, métodos, referencial teórico e pesquisa de campo. Cada uma das colunas recebe uma numeração, e a linha de amarração se refere a qual coluna aquele termo deve estar amarrado.

Figura 13 – Matriz de amarração.

Problema de pesquisa (1)	Questões motivadoras (2)	Objetivo Geral (3)	Objetivos específicos (4)	Metodologia (5)	Coleta de dados (6)	Referencial Teórico (7)	Pesquisa de campo (8)	Título do Trabalho (9)
Como medir o impacto dos fatores operacionais na geração de biogás em aterros sanitários do Brasil?	A: Em aterros sanitários existem fatores que influenciam na geração de biogás, não apenas fatores relacionados a localização	Construir de uma modelagem capaz de mensurar o impacto dos diversos fatores internos dos aterros sanitários na produção de biogás no Brasil, com foco no aprimoramento da geração de metano	A. realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre a geração de biogás em aterros sanitários	Revisão sistemática da literatura	Strings com palavras-chave do objetivo específico B em <i>Data Base de Journals</i>	Aterros sanitários	Instrumentos de pesquisa 1, 2 e 3 que foram elaborados a partir da revisão sistemática (objetivo específico A) e dos métodos selecionados afim de alcançar os objetivos específicos B e C	Modelo de diagnóstico para a geração de biogás em aterros sanitários
	B: O impacto fatores operacionais e internos dos aterros sanitários, ou o efeito sinérgico entre eles, na geração de biogás não é avaliado		B. Construir o mapa da relação de causa e efeito interrelacionado os fatores operacionais com a produção de metano	<i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i> ; Mapa estratégico de relação causa e efeito	Instrumento de pesquisa 1 (validação com especialistas) e Instrumento de pesquisa 2 (Escala AHP) aplicado com especialistas	Modelagem de diagnóstico: <i>Analytic Hierarchy Process</i> e Mapa estratégico		
			C. Mensurar o desempenho das empresas quanto à geração de biogás, mais especificamente metano, a partir de uma ferramenta de autodiagnóstico	<i>Key Performance Indicators</i>	Instrumento de pesquisa 3 aplicado com colaboradores de empresas da áreas	Modelagem de diagnóstico: <i>Key Performance Indicators</i>		
AMARRAÇÃO	(1)	(2)	(3)	(3 e 4)	(5)	(4 e 6)	(7)	(3 e 4)

Fonte: Adaptado de Mazzon (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção 4.1 apresenta o resultado da revisão sistemática da literatura, estrutura preliminar proposta e discussões sobre a validação com os especialistas. Enquanto isso, na seção 4.2, os fatores considerados após a validação dos especialistas são apresentados e discutidos, juntamente com as barreiras no Brasil à expansão da geração de biogás. Por fim, a seção 4.3 versa sobre o impacto de cada fator na geração de metano; a seção 4.4 revela o desempenho das empresas; a seção 4.5 demonstra o mapa de causa e efeito; e a seção 4.6 demonstra a ferramenta de autodiagnóstico desenvolvida.

4.1 FATORES DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E VALIDAÇÃO COM OS ESPECIALISTAS

Os fatores que impactam na geração de biogás e, conseqüentemente, metano, provenientes da revisão sistemática da literatura, estão apresentados no Quadro 7, juntamente com a frequência e suas referências. O fator “Composição dos resíduos ou fração de carbono orgânico” foi mencionado em 19 artigos, enquanto outros 9 fatores foram citados apenas por um artigo. Um dos motivos para a alta frequência do fator “composição de resíduos” é que muitos desses artigos calcularam a taxa de geração de biogás, onde para isso é necessária tal informação. Alguns fatores do Quadro 7 foram apresentados de forma geral, como por exemplo, o sistema de drenagem de gás. Este corresponde a eficiência de coleta, tipo de poços e dimensionamento desse sistema, incluindo o distanciamento dos poços, pressão de sucção, diâmetro dos poços, altura, entre outros parâmetros. Assim como a umidade, a qual muitos autores englobam teor de umidade dos resíduos, umidade do ambiente ou precipitação.

Quadro 7 – Fatores operacionais encontrados a partir da revisão sistemática da literatura.

(continua)

Fatores operacionais	Frequência	Referências
Composição dos resíduos ou fração de carbono orgânico	18	(DI TRAPANI <i>et al.</i> , 2018; FABBRICINO, 2007; FARQUHAR; ROVERS, 1973; FEI; ZEKOS; RASKIN, 2016; FORSTER-CARNEIRO; PEREZ; ROMERO, 2008; LISK, 1991; MOHSEN; ABBASSI, 2020; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2020; REDDY; KUMAR; GIRI, 2017; RODRÍGUEZ-IGLESIAS <i>et al.</i> , 2005; ROSA PIN <i>et al.</i> , 2018; SUN <i>et al.</i> , 2019; RITCHIE; MCBEAN, 2011; AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020; DOS SANTOS <i>et al.</i> , 2018b, 2018c; EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; PANTINI <i>et al.</i> , 2015)
Umidade	14	(DI TRAPANI <i>et al.</i> , 2018; EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; FARQUHAR; ROVERS, 1973; FEI; ZEKOS; RASKIN, 2016; FENG <i>et al.</i> , 2017; LISK, 1991; MOHSEN; ABBASSI, 2020; NWAOKORIE <i>et al.</i> , 2018; PANTINI <i>et al.</i> , 2015; POMMIER <i>et al.</i> , 2007; REDDY; KUMAR; GIRI, 2017; SUN <i>et al.</i> , 2019; RITCHIE; MCBEAN, 2011; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)
Recirculação de lixiviados	13	(BENBELKACEM <i>et al.</i> , 2010; DŽOLEV; VUJIĆ, 2016; FILIPKOWSKA; AGOPSOWICZ, 2004; LISK, 1991; LIU <i>et al.</i> , 2018; NWAOKORIE <i>et al.</i> , 2018; REDDY; KUMAR; GIRI, 2017; RITCHIE; MCBEAN, 2011; SUN <i>et al.</i> , 2019; ZHANG; HE; SHAO, 2008; PANTINI <i>et al.</i> , 2015; XU <i>et al.</i> , 2020; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)
Temperatura	10	(DI TRAPANI <i>et al.</i> , 2018; EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; FARQUHAR; ROVERS, 1973; LISK, 1991; MOHSEN; ABBASSI, 2020; PANTINI <i>et al.</i> , 2015; REDDY; KUMAR; GIRI, 2017; RITCHIE; MCBEAN, 2011; SUN <i>et al.</i> , 2019; VUJIĆ <i>et al.</i> , 2010)
Cobertura e camadas do aterro	10	(AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020; JUNG <i>et al.</i> , 2011; LI <i>et al.</i> , 2012; MANLEY, 1990; MOHSEN; ABBASSI, 2020; SUN <i>et al.</i> , 2019; DI TRAPANI <i>et al.</i> , 2018; PANTINI <i>et al.</i> , 2015; FARQUHAR; ROVERS, 1973; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)
Sistema de drenagem de gás	10	(AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020; FEI; ZEKOS; RASKIN, 2016; FENG; ZHENG, 2015; KUTSYI, 2015; RODRÍGUEZ-IGLESIAS <i>et al.</i> , 2005; SUN <i>et al.</i> , 2019; DOS SANTOS <i>et al.</i> , 2018b, 2018c; XU <i>et al.</i> , 2020; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)
Profundidade dos resíduos/aterro	7	(DI TRAPANI <i>et al.</i> , 2018; LI <i>et al.</i> , 2012; MANLEY, 1990; MOHSEN; ABBASSI, 2020; NOZHEVNIKOVA <i>et al.</i> , 1993; VUJIĆ <i>et al.</i> , 2010; PANTINI <i>et al.</i> , 2015)
Total de resíduos depositados	7	(MOHSEN; ABBASSI, 2020; AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020; DOS SANTOS <i>et al.</i> , 2018b, 2018c; EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; ROSA PIN <i>et al.</i> , 2018; SUN <i>et al.</i> , 2019)
Adição de líquidos	5	(AL-YAQOUT; HAMODA, 2007; FEI; ZEKOS; RASKIN, 2016; NWAOKORIE <i>et al.</i> , 2018; PANTINI <i>et al.</i> , 2015; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)
Ph	5	(EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; FARQUHAR; ROVERS, 1973; REDDY; KUMAR; GIRI, 2017; RITCHIE; MCBEAN, 2011; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)

Quadro 7 – Fatores operacionais encontrados a partir da revisão sistemática da literatura.

(continuação)

Fatores operacionais	Frequência	Referências
Processo de degradação biológica	3	(FEI; ZEKKOS; RASKIN, 2016; LORNAGE <i>et al.</i> , 2007; RODRÍGUEZ-IGLESIAS <i>et al.</i> , 2005)
Idade do aterro	3	(DI TRAPANI <i>et al.</i> , 2018; LI, Y. C. <i>et al.</i> , 2012; MOHSEN; ABBASSI, 2020)
Densidade	3	(DI TRAPANI <i>et al.</i> , 2018; LISK, 1991; KUTSYI, 2015)
Adição de nutrientes	3	(RITCHIE; MCBEAN, 2011; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2020; FARQUHAR; ROVERS, 1973)
Compactação de resíduos	3	(XU; QIN; KO, 2019; REDDY; KUMAR; GIRI, 2017; XU <i>et al.</i> , 2020)
Contaminantes e metais pesados	3	(EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; PANTINI <i>et al.</i> , 2015; FARQUHAR; ROVERS, 1973)
Oxidação (fator de oxidação)	2	(AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020; FENG <i>et al.</i> , 2017)
Tamanho das partículas dos resíduos	2	(FEI; ZEKKOS; RASKIN, 2016; LORNAGE <i>et al.</i> , 2007)
Degradação anaeróbica	2	(PANTINI <i>et al.</i> , 2015; YANG <i>et al.</i> , 2012)
Declividade	2	(FENG, S. <i>et al.</i> , 2017; VARGA, 2011)
Alcalinidade	2	(EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; FARQUHAR; ROVERS, 1973)
Técnica de colocação de resíduos e histórico de tombamento do local	2	(MANLEY, 1990; PANTINI <i>et al.</i> , 2015)
Geometria do aterro	2	(VARGA, 2011; PANTINI <i>et al.</i> , 2015)
Gerenciamento de lixiviados	2	(VARGA, 2011; PANTINI <i>et al.</i> , 2015)
Suplementação enzimática	2	(JAYASINGHE <i>et al.</i> , 2011; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2020)
Adição fenazina (NR) ¹	2	(RASAPOOR <i>et al.</i> , 2020; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)
Adição de <i>biochar</i> ²	2	(RASAPOOR <i>et al.</i> , 2020; RASAPOOR <i>et al.</i> , 2021)
DBO e DQO	2	(EMKES; COULON; WAGLAND, 2015; PANTINI <i>et al.</i> , 2015)
Infiltração	2	(FARQUHAR; ROVERS, 1973; KUTSYI, 2015; XU <i>et al.</i> , 2020)
Adição de inóculo ³	1	(PANTINI <i>et al.</i> , 2015)
Design do sistema de revestimento	1	(VARGA, 2011)
Composição do lixiviado	1	(LISK, 1991)
Irrigação subterrânea	1	(ZHANG, H.; HE; SHAO, 2008)
Camada impermeabilizante	1	(JUNG <i>et al.</i> , 2011)
Aeração	1	(FARQUHAR; ROVERS, 1973)

¹ Fenazina (NR) é uma amina aromática tricíclica que contém átomos de nitrogênio duplos, i.e., o uso desse corante em meio anaeróbico afeta os organismos fermentadores, alterando os padrões metabólicos, aumentando a produção de CH₄ e reduzindo o CO₂.

² *Biochar* (biocarvão) é um produto da decomposição térmica (pirólise) da biomassa em faixas de temperatura de 180 a 950 ° C em atmosfera inerte, que influencia na decomposição anaeróbica.

³ Lodo proveniente do tratamento anaeróbico de resíduos ou efluente abundante de microrganismos (ELBESHISHY; NAKHLA; HAFEZ, 2012).

Quadro 7 – Fatores operacionais encontrados a partir da revisão sistemática da literatura.

(conclusão)

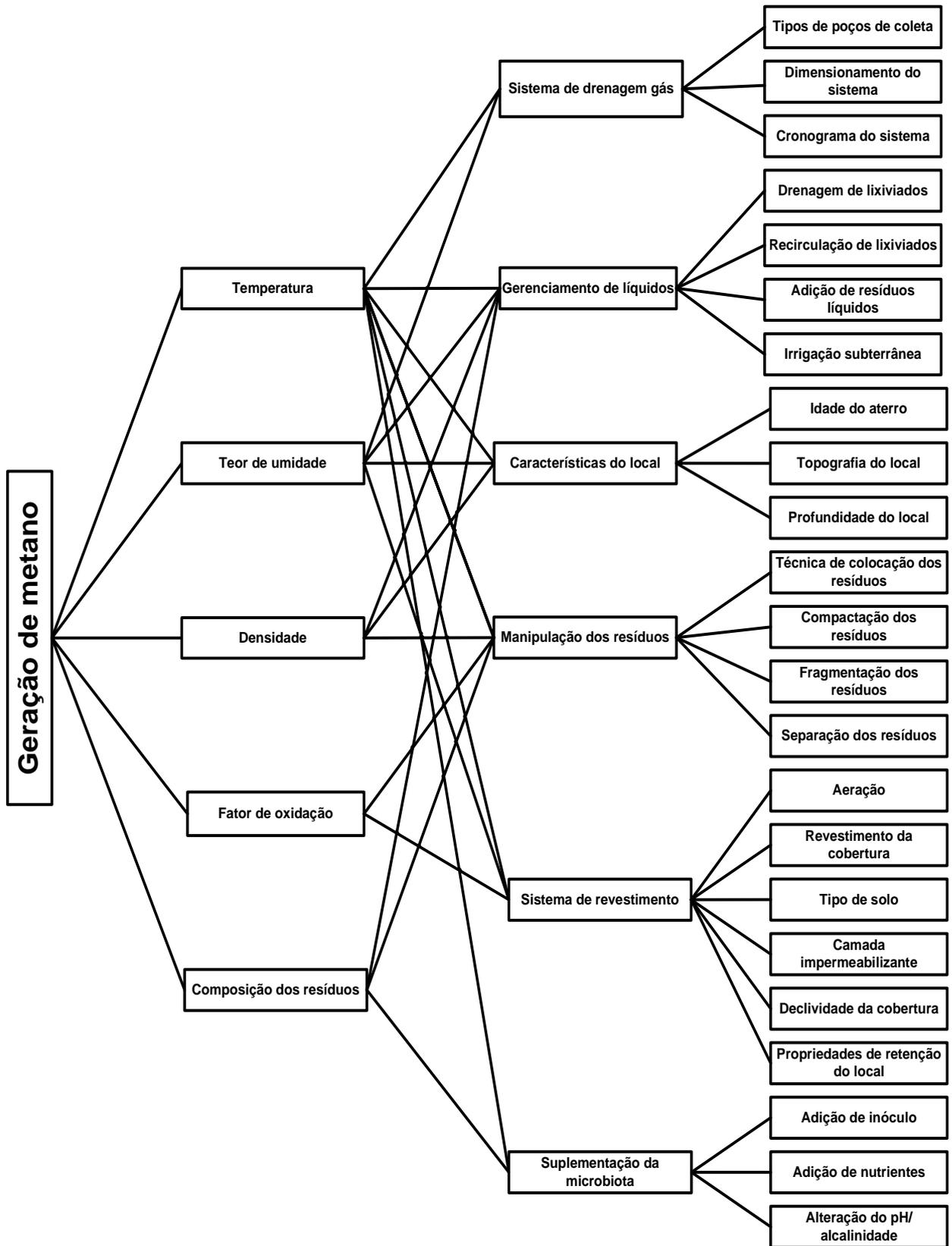
Fatores operacionais	Frequência	Referências
Propriedades de retenção de líquidos do local	1	(MANLEY, 1990)
Cronograma de instalação do sistema de coleta de gás	1	(SUN <i>et al.</i> , 2019)
Potencial <i>redox</i>	1	(FARQUHAR; ROVERS, 1973)

Fonte: Autora.

A partir dos fatores apresentados no Quadro 7, foi elaborada uma estruturação preliminar, apresentada na Figura 14, que representou os fatores, as ligações com a geração de metano e interligações entre os fatores. Nessa figura, a geração de metano está à esquerda e corresponde ao objetivo da estrutura, enquanto as linhas correspondem a influência do fator à direita no objetivo ou em outro fator. O primeiro nível de fatores impacta no processo de biodegradação dos resíduos e estão conectados diretamente a geração de metano. Esses fatores são influenciados operacionalmente pelo segundo nível (fatores operacionais) de acordo com as interligações. O terceiro nível corresponde aos subfatores, os quais podem ser alterados por procedimentos durante o projeto, instalação e operação do aterro.

Segundo os especialistas, no primeiro nível de fatores deveria ser incluído a fração de carbono orgânico e a composição de resíduos deveria ser remanejada para as características do local. Além disso, foi comentado que o pH é um fator crítico para a biodegradação dos resíduos e por isso deveria estar ligado diretamente a geração de metano. Também foi mencionado que o fator de oxidação (assim como a aeração) são fatores inversamente proporcionais a geração de metano, pois o objetivo é a ocorrência de reação anaeróbicas. Então, como sugerido, o fator de oxidação foi substituído pelo potencial *redox*, que representa a condição do meio para a biodegradação, enquanto a aeração foi retirada da estrutura.

Figura 14 – Estrutura preliminar da geração de metano e os fatores de influência.



Fonte: Autora.

Outros especialistas mencionaram a relação de influência entre os fatores do primeiro nível, relacionados ao processo de biodegradação, e os fatores operacionais. Para eles, como está representado na Figura 14, o teor de umidade também depende dos microrganismos, pois eles podem produzir resíduos da decomposição de orgânicos. Além disso, o teor de umidade depende do manuseio dos resíduos, pois os resíduos podem passar por pré-tratamento, como secagem antes do descarte. Por outro lado, a densidade depende do sistema de revestimento, pois esta representa uma sobrecarga adicional de compactação. Microrganismos podem também influenciar a densidade a partir da criação de bioporos.

Na estrutura preliminar, as características ambientais como condições climáticas, geográficas e hidrológicas não foram enquadradas, pois a pesquisa busca elencar os fatores relacionados ao projeto, instalação e operação dos aterros sanitários. Porém, com a validação dos especialistas, a maioria descreveu a importância desses fatores como condições de contorno para o projeto, instalação e operação dos aterros.

Quanto ao sistema de drenagem de gás, este é relacionado de forma indireta a geração de metano, pois considera fatores para o aumento da eficiência da coleta de gás. Logo, os especialistas sugeriram adicionar a forma de execução do sistema, ou seja, o tipo de sistema de coleta, passivo ou ativo, além dos tipos de poços, horizontais ou verticais. Foi mantido na estrutura o fator de dimensionamento, uma vez que este abrange as sugestões de adição de fatores como cronograma de instalação, distância entre drenos, estanqueidade e sucção.

Alguns especialistas demonstraram receio quanto a recirculação de lixiviados, expressando que embora a adição de líquidos aumente a degradação de resíduos e a geração de metano, ela cria problemas com a coleta de metano e pode levar a emissões mais elevadas. Além disso, mencionaram que a gestão de líquidos é crítica no Brasil e em outras áreas chuvosas, representando riscos para a estabilidade do maciço de resíduos. Então, alguns especialistas não recomendam a recirculação de lixiviados como uma boa prática de tratamento em um país de clima tropical como o Brasil. Porém, outros especialistas mencionaram que, para a otimização da produção de metano, o que indiretamente auxilia no tratamento de lixiviado, é a recirculação do mesmo. Isso permite aumentar o rendimento na produção de metano, pois parte do lixiviado coletado ainda tem potencial de ser degradado e gerar metano, ao passo que

age como inoculante nesse processo "fechado". Alguns especialistas sugeriram a distribuição do lixiviado na superfície da célula, enquanto outros questionaram a adição de resíduos líquidos e a irrigação subterrânea. Então, para melhor entendimento, a irrigação subterrânea corresponde a recirculação interna de lixiviados, enquanto que a adição de resíduos líquidos corresponde à adição do condensado de água dos drenos de gás, que também pode ser considerada na recirculação de lixiviados. Por fim, devido às sugestões e a importância observada quanto a drenagem de líquidos, foi adicionado como fator a drenagem pluvial na estrutura.

Quanto às características do local, os especialistas sugeriram a inclusão da composição do resíduo nesse item e condições ambientais, como climáticas, geográficas e hidrológicas. De acordo com a opinião dos especialistas, essas condições têm grande influência na geração de metano, pois englobam temperatura, precipitação, umidade, pressão atmosférica, topografia etc. Segundo alguns especialistas, a pluviometria e regime de chuvas local influenciam fortemente o gerenciamento de lixiviados e velocidade de produção de metano. Além disso, foi mencionado a importância do tipo de solo do local para o projeto e operação do aterro, a extensão e profundidade do aterro, assim como sua vida útil e volume recebido de RSU.

Alguns especialistas sugeriram a adição do pré-tratamento dos resíduos, especialmente a trituração, pois é a forma de diminuir o tamanho da partícula dos resíduos, o que aumenta a taxa de geração de metano. Por outro lado, fatores relacionados à seleção também foram sugeridos, tendo a pesagem como primeira "manipulação" dos resíduos, pois norteia significativamente a gestão do aterro. Porém, esse fator não influencia na geração de metano, então não foi considerado na estrutura. Outro fator sugerido foi a triagem dos resíduos, uma vez que a diminuição da entrada de recicláveis e a proibição da entrada de outros resíduos inertes, perigosos e de saúde, potencializam a produção de metano, aumentando a eficiência e vida útil do aterro.

Para os especialistas, uma boa prática é a preparação de células de disposição de resíduos com a impermeabilização do fundo e das laterais do aterro, além da utilização de geomembrana em sua parte superior no fechamento do aterro, perfurada apenas pelos dutos coletores de biogás. Isso inibe qualquer influência de pluviosidade e torna o ciclo o mais hermético possível, além de garantir maior estabilidade do aterro

a longo prazo. Além disso, aeração e propriedades de retenção do local foram retiradas, como sugerido, enquanto outros fatores, como material utilizado, recuperação da vegetação e frente operacional, foram adicionados. Alguns especialistas argumentaram que aterros podem trabalhar com uma frente operacional muito grande ou muito pequena, porém nesta frente não é possível captar o gás, sendo assim interessante considerá-la como fator operacional. Vale salientar que o sistema de revestimento não corresponde somente aos fatores relacionados a cobertura final do aterro, mas também corresponde aos fatores interligados as camadas diárias e intermediárias do aterro.

A suplementação da microbiota foi modificada para aprimoramento da atividade microbiana, porém alguns especialistas não a recomendavam para aterros sanitários. Contudo, a maioria dos especialistas concordaram com a estruturação e fatores apresentados, e comentaram sobre a necessidade de remoção de contaminantes para a melhoria do processo de biodegradação. Além disso, sugeriram a inclusão da injeção de lodo de estações de tratamento de esgotos, porém este fator corresponde à adição de inóculo, que pode ocorrer da forma apresentada ou por lodo de tratamento anaeróbico de resíduos agrícolas e industriais.

Em resumo, após a análise da validação dos fatores a partir do painel de especialistas, neste trabalho foram considerados seis fatores relacionados ao processo de biodegradação: temperatura, teor de umidade, densidade, potencial *redox*, fração de carbono orgânico e pH/alcalinidade. Enquanto isso, seis fatores operacionais foram considerados: sistema de drenagem de gás, gerenciamento de líquidos, características do local, disposição de resíduos, e sistema de revestimento e aprimoramento da atividade microbiana. Esses seis fatores são conectados a 33 subfatores operacionais, abordados na seção 4.2.

4.2 REPRESENTAÇÃO DOS FATORES, SUAS INFLUÊNCIAS E LIMITAÇÕES

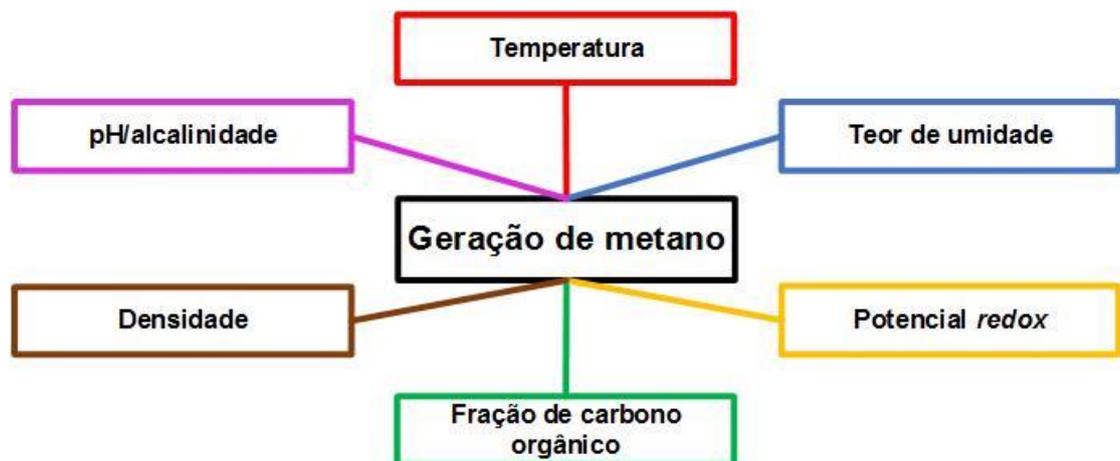
Nas próximas subseções são discutidos os fatores e seus impactos na geração de metano direcionada ao contexto brasileiro. Para isso, a subseção 4.2.1 corresponde aos fatores que estão relacionados ao processo de biodegradação dos RSU, e a 4.2.2 correspondendo aos fatores e subfatores operacionais, de instalação e de projeto. A discussão é baseada em leis, notícias, relatórios e artigos que apresentaram aspectos relevantes para a recuperação do biogás em aterros

sanitários. A seção 4.2.3 aborda as barreiras e limitações encontradas no Brasil para o aprimoramento da geração de metano a partir dos fatores operacionais.

4.2.1 Fatores relacionados ao processo de biodegradação de RSU

A fim de se aumentar a quantidade de biogás gerado e, principalmente, o percentual de metano, os fatores que impactam diretamente na sua geração são: temperatura, teor de umidade, densidade, potencial redox e fração de carbono orgânico, conforme mostrado na Figura 15. Tais grandezas, entretanto, necessitam que algum fator operacional seja modificado para que ocorra sua alteração e, conseqüentemente, impacto na geração de metano.

Figura 15 – Grandezas do processo de geração de metano.



Fonte: Autora.

De acordo com Barros et al. (2018), a taxa de geração de metano, nas condições brasileiras, deve variar entre 0,05 e 0,15 ano⁻¹. Esta taxa é uma constante utilizada para calcular a geração de metano e está relacionada a meia-vida dos resíduos. Quanto maior o seu valor, mais rápida a geração total de metano em um aterro sanitário aumenta (desde que o aterro ainda esteja recebendo resíduos) e, em seguida, diminui (após o fechamento do aterro) com o tempo. Logo, a taxa de geração de metano é avaliada pelo teor de umidade de refugo, disponibilidade de nutrientes para bactérias geradoras de metano, pH e temperatura. Devido à incerteza desses

parâmetros, a taxa muitas vezes é estimada com base no tipo de resíduo e clima (STEGE; DAVILIA, 2010). Então, para um melhor entendimento é realizada uma discussão sobre tais fatores nas próximas subseções.

4.2.1.1 *Temperatura*

O aumento da temperatura tem um efeito positivo no crescimento e atividade microbiana, levando a um processo de geração de gás mais rápido (PANTINI *et al.*, 2015). A produção máxima de gás a partir da decomposição de resíduos ocorre em faixas de temperatura entre 34 e 45 °C (REES, 1980). Apesar da temperatura ser importante para facilitar a degradação dos resíduos, ela não tende a variar significativamente entre os aterros em climas semelhantes (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015). Isso porque a temperatura em um aterro é relativamente constante devido ao calor gerado pela atividade das bactérias anaeróbicas, e tende a ser independente da temperatura externa a partir de certa profundidade (STEGE; DAVILIA, 2010). Porém, em ambientes rasos, aterros não profundos nos quais os resíduos estão próximos da superfície, a temperatura do aterro é influenciada pelo ambiente, principalmente, nos climas muito frios (FEI; ZEKKOS; RASKIN, 2016). Além disso, o comportamento hidráulico e mecânico dos resíduos sólidos urbanos, a compressibilidade, o assentamento, bem como as propriedades de revestimento, coberturas e subleitos do solo tem uma estreita relação com a temperatura (REDDY; KUMAR; GIRI, 2017).

4.2.1.2 *Teor de umidade*

A distribuição uniforme e adequada da umidade acelera a decomposição anaeróbica do RSU no aterro sanitário, que por sua vez pode melhorar o ambiente para uma rápida estabilização do RSU (REDDY; KUMAR; GIRI, 2017). O teor ideal de umidade permite o transporte de nutrientes, microorganismos e produtos intermediários para uma biodegradação aprimorada de resíduos (PANTINI *et al.*, 2015). Além disso, o teor de umidade dilui os inibidores de biodegradação, como sulfatos e metais pesados (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015). A produção máxima de biogás e o aumento da porcentagem de CH₄ ocorrem com o teor de umidade de 60% a 80% (FARQUHAR; ROVERS, 1973). A umidade pode ser aprimorada pela recirculação de lixiviados e, também, pode ser influenciada por outros

fatores como o sistema de gerenciamento de líquidos e gás, características do local, disposição de resíduos, sistema de revestimento e aprimoramento da atividade microbiana. Todavia, as condições de umidade dentro de um aterro normalmente não são bem conhecidas e são estimadas com base em precipitação média anual (STEGE; DAVILIA, 2010). Conforme Mohsen and Abbassi (2020), a precipitação pode fornecer um ambiente aquoso favorável para a transferência convectiva de nutrientes necessários para a atividade microbiana.

4.2.1.3 pH e alcalinidade

Condições muito ácidas ou básicas inibem a atividade microbiana metanogênica, e logo o pH deve ser mantido entre 6,4 e 7,5 a fim de se aumentar o rendimento na produção de metano. Valores altos de pH resultam em aumento da toxicidade devido à concentrações mais altas de amônia, que é um dos agentes mais tóxicos para bactérias metanogênicas (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008). Por outro lado, valores baixos de pH são indicativos do acúmulo de ácidos graxos no sistema, o que também impede a produção de CH₄ (LI, Yebo; PARK; ZHU, 2011). A alcalinidade corresponde a capacidade do aterro sanitário em amortecer as mudanças no pH causadas pela biodegradação (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015).

4.2.1.4 Potencial redox (Eh)

O potencial redox corresponde a capacidade do meio em doar ou receber elétrons, sendo importante para o monitoramento do sistema anaeróbico. À medida que ocorre entrada de oxigênio no sistema, o Eh aumenta, possibilitando o desenvolvimento das espécies aeróbias, enquanto que as espécies anaeróbias requerem um ambiente com valores negativos de Eh para a produção de metano (FARQUHAR; ROVERS, 1973). A natureza do processo principal que rege a decomposição orgânica é dependente da variação da topografia do aterro e das propriedades hidráulicas. Por exemplo, a cobertura e a heterogeneidade do local estudado afetam a circulação dos fluidos no local, uma vez que diferentes áreas e profundidades do aterro terão uma susceptibilidade distinta à oxigenação por eventos de recarga (DEL REY *et al.*, 2020).

4.2.1.5 Fração de carbono orgânico

Fração de carbono orgânico corresponde a quantidade de carbono que é facilmente biodegradada (MOHSEN; ABBASSI, 2020). Em resíduos com baixa fração de carbono orgânico, a biodegradação ocorre lentamente, o que reduz a capacidade total de disposição de resíduos de um aterro e, conseqüentemente, a taxa de produção de metano (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020). Esta fração é estimada de acordo com a composição do resíduo, a partir de uma média ponderada do teor de carbono degradável, conforme a Tabela 8, baseada no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (LIMA *et al.*, 2018). A fração de carbono orgânico padrão que é efetivamente degradado no o Brasil é de 0,5 (IPCC, 2006).

Tabela 8 – Composição de resíduo e fração de carbono orgânico degradável.

Material	Composição do resíduo	Fração de carbono orgânico
Metal	3%	0
Papel	13%	0,4
Plástico	14%	0
Vidro	2%	0
Matéria orgânica	51%	0,15
Outros	17%	0
Fração de carbono orgânico calculada		0,13

Fonte: (IPCC, 2006).

4.2.1.6 Densidade

A densidade das camadas de resíduos muda com o tempo e, portanto, representa a dinâmica dos processos do aterro desde o início da operação até o final dos processos de produção do biogás (DI TRAPANI *et al.*, 2018). O aumento da densidade aproxima a água dos resíduos, além dos nutrientes e microrganismos, o que favorece a produção de CH₄ (LISK, 1991). Isso pode ocorrer a partir da compactação e estabelecimento de cargas máximas de células (KUTSYI, 2015). Por outro lado, com um nível de compactação inadequado pode ocorrer acúmulo de lixiviado e saturação de resíduos e, conseqüentemente, diminuição da produção de metano (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015).

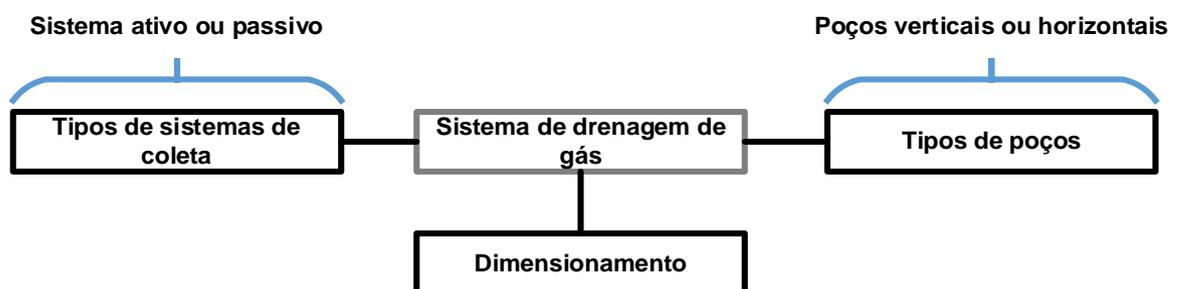
4.2.2 Fatores e subfatores operacionais

Os fatores operacionais são: sistema de drenagem de gás, gerenciamento de líquidos, características do local, disposição de resíduos, sistema de revestimento, e aprimoramento da atividade microbiana. Estes podem ser influenciados por procedimentos durante o projeto, instalação e operação do aterro, enquanto que cada um possui pelo menos um subfator que impacta em algum dos fatores relacionados ao processo de biodegradação dos resíduos.

4.2.2.1 Sistema de drenagem de gás

O sistema de drenagem de gás representa: os tipos de poços, verticais e/ou horizontais; o tipo de sistema de coleta, ativa ou passiva; e também o dimensionamento, composto pelo cronograma de instalação, parâmetros de trabalho (pressão de sucção, estanqueidade, diâmetro do poço, profundidade dos poços, distância entre os poços), entre outros. Os fatores apresentados na Figura 16 não influenciam na geração de metano, todavia estão relacionados a eficiência de coleta, o que é significativamente importante para a quantidade do gás recuperado.

Figura 16 – Sistema de drenagem de gás.



Fonte: Autora.

Os poços horizontais são geralmente instalados e usados para coletar biogás nos estágios iniciais do desenvolvimento da célula, mesmo enquanto eles ainda aceitam resíduos (LEE; HAN; WANG, 2017). Estes geralmente possuem uma taxa de coleta de biogás mais alta, porém seu custo de construção é mais elevado e é

apropriado apenas para grandes aterros. Os poços verticais, por outro lado, geralmente são instalados e operados após a colocação das coberturas finais. Ainda, estes são mais utilizados devido ao menor custo e adequados para quase todos os tipos de aterros sanitários (FEI; WEN; DE CLERCQ, 2019). Por outro lado, de acordo com a US EPA (2020), sistemas bem projetados de qualquer tipo são eficazes na coleta de biogás, sendo que o projeto escolhido depende das condições específicas do local e do tempo de instalação do sistema de coleta de biogás.

Para Sun et al. (2019), a eficiência de coleta pode ser estimada utilizando-se informações específicas do aterro sobre o tipo de cobertura, cronograma de colocação de resíduos e instalação do sistema de coleta de gás. Presume-se que a eficiência de coleta varie de 50 a 90% devido a mudanças no projeto do aterro e na cobertura do solo, variando de cobertura diária, cobertura intermediária, cobertura final projetada e cobertura de geomembrana (AYODELE; ALAO; OGUNJUYIGBE, 2020). Segundo Barlaz *et al.* (2009), durante a operação, quando as células estão ativas, a eficiência de coleta é de 50%. Quando as células são fechadas com coberturas temporárias, a eficiência aumenta para 75%; e, finalmente, quando as células são fechadas com coberturas finais, a eficiência é 95%.

Embora as taxas de recuperação de biogás possam ser medidas, as taxas de geração em um aterro não podem ser medidas diretamente (daí a necessidade de um modelo para estimar a geração). Portanto, existe uma incerteza considerável em relação às eficiências de coleta alcançadas em aterros sanitários com base nas práticas de gestão do local, porque aterros devidamente gerenciados terão características como: cobertura de solos, compactação e nivelamento de resíduos, controle de disposição de resíduos, controle de limpeza, controle de incêndios e sistemas de gerenciamento de líquidos. Estes permitem a obtenção de maior eficiência de coleta em comparação a locais de despejo não gerenciados (STEGE; DAVILIA, 2010). Outro fator é a cobertura do sistema de coleta, pois está diretamente relacionada a quantidade de poços e, também, a profundidade dos resíduos, já que aterros rasos requerem poços rasos, que são menos eficientes, sendo mais propensos à infiltração de ar (RITCHIE; MCBEAN, 2011). Além disso, o fator “tipo e extensão da cobertura” também impacta na drenagem do gás, pois as eficiências de coleta são mais altas em aterros com cobertura menos permeável do solo, o que limita a liberação de biogás na atmosfera, infiltração de ar no sistema de gás e infiltração de chuva. Para isso, aterros com argila ou materiais sintéticos terão taxas mais baixas

de emissões fugitivas de biogás, o que resulta em maior eficiência de coleta (US EPA, 2020). A compactação de resíduos, já que resíduos não compactados tem maior infiltração de ar e menor qualidade do gás, além do tamanho da área de descarte ativo e seu gerenciamento, também apresentam impacto na geração de biogás. Finalmente, o gerenciamento de lixiviados influencia a eficiência, pois altos níveis de lixiviado podem limitar a coleta, especialmente em aterros com alta pluviosidade e drenagem não eficiente (STEGE; DAVILIA, 2010).

O espaçamento e a profundidade do poço são fatores importantes, uma vez que poços mais profundos podem extrair biogás de um volume maior de lixo do que poços rasos (uma maior sucção pode ser aplicada aos poços sem a entrada de ar da superfície). Além disso, aterros com poços profundos e.g. maiores do que cerca de 20 metros, podem efetivamente coletar biogás de todas as áreas do local com densidades de poços verticais baixas, dois poços ou menos por hectare. Por outro lado, aterros com poços mais rasos exigem maiores quantidades de poços para atingir a mesma extensão (STEGE; DAVILIA, 2010).

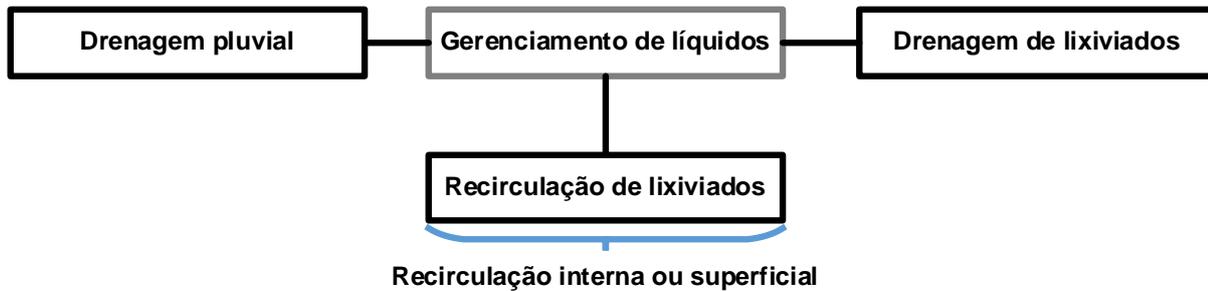
O tipo de sistema de coleta corresponde a forma com que o gás é drenado do aterro sanitário. No sistema de coleta ativo são empregados equipamentos para forçar a drenagem do gás, como compressores e sopradores (CANDIANI; DA SILVA, 2011). Enquanto isso, no sistema passivo, o gás é drenado a partir da diferença de pressão entre o interior do aterro e a atmosfera, não sendo utilizados equipamentos para forçar a saída do gás. Um fator a se considerar no dimensionamento do sistema de coleta é que o LFG contém vapores de água, podendo resultar em condensação dentro dos componentes dos coletores. Então, o sistema de drenagem deve ser projetado de forma que esse condensado seja drenado também para sua remoção (US EPA, 2020).

4.2.2.2 Gerenciamento de Líquidos

O gerenciamento de líquidos, representado pela Figura 17, é composto pela drenagem pluvial, drenagem do lixiviado e recirculação superficial e interna do mesmo. A umidade pode se tornar um problema para a geração de gás, coleta de gás e estabilidade das encostas, quando na massa de resíduos ocorre acúmulo de líquido. Líquidos em poços e dentro do aterro devem ser gerenciados e removidos regularmente, mesmo em locais que operam sob um plano de recirculação. Se poços

ou tubulação ficarem inundados com líquidos, eles não serão capazes de extrair o biogás e transportá-lo (US EPA, 2020).

Figura 17 – Gerenciamento de líquidos.



Fonte: Autora.

Alguns aterros sanitários introduzem líquidos nos resíduos de maneira controlada para acelerar o processo de decomposição dos resíduos e encurtar o período de tempo para a geração de biogás (US EPA, 2020). Além disso, promover a redução do espaço no aterro e volume de lixiviados é também considerado um tratamento in situ de lixiviados (NAG; SHIMAOKA; KOMIYA, 2018). De acordo com Sun et al. (2019), existe uma sobreposição considerável nas taxas de decomposição entre os aterros que recircularam e não recircularam o lixiviado, sendo que a recirculação do lixiviado resulta em uma taxa de decomposição mais alta. No Brasil, a operação do aterro deve evitar o influxo de água da chuva e definir um procedimento fechado de recirculação do lixiviado, pois é um país predominantemente de clima quente e úmido (DEL REY *et al.*, 2020).

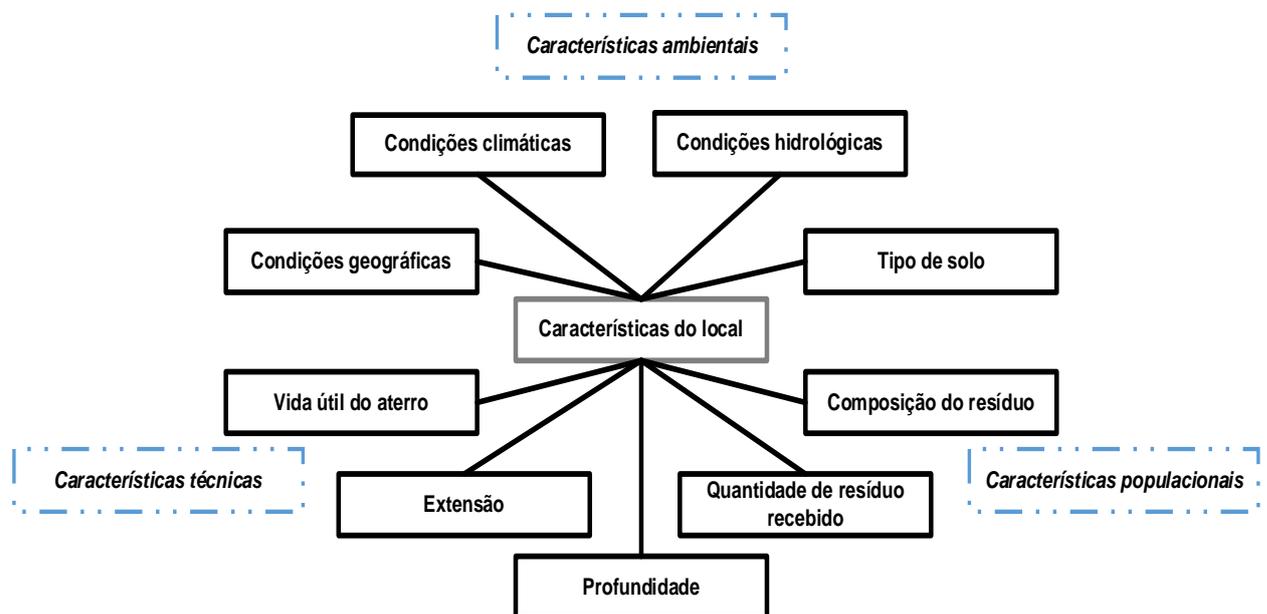
Por outro lado, o lixiviado quase sempre limita a operação eficaz do sistema de coleta em aterros devido ao alto teor de umidade de resíduos e à falta de drenagem. Áreas com chuvas fortes são especialmente suscetíveis ao acúmulo de lixiviado no aterro, o que pode limitar a eficiência da coleta, bloqueando as perfurações de poços e evitando que os poços apliquem vácuo para drenar o biogás. A menos que o clima seja extremamente seco ou o aterro sanitário tenha sido projetado para fornecer uma boa gestão de líquidos por meio de drenagem adequada, o aterro frequentemente apresentará sinais da acumulação de líquidos através de infiltrações superficiais ou poças (STEGE; DAVILIA, 2010). Dessa maneira, uma técnica sugerida é a

recirculação de lixiviados superficial. Essa técnica consiste em transportar o lixiviado até a superfície de trabalho e aplicar o lixiviado no resíduo com uma barra pulverizadora (NWAOKORIE *et al.*, 2018). No Brasil, a drenagem de lixiviados é indicada quando o aterro possui impermeabilização complementar ou quando o solo da base do aterro possibilita o acúmulo de líquidos. Evidentemente que a drenagem pluvial é obrigatória de modo a impedir a infiltração no maciço do aterro e carregamento do material sólido e percolado para fora do aterro (ABNT, 2010).

4.2.2.3 Características do local

As características do local, observado na Figura 18, foram classificadas em três subgrupos: ambientais, populacionais e técnicas.

Figura 18 – Características do local.



Fonte: Autora.

Ainda que o Brasil seja considerado um país de clima tropical, devido a sua grande extensão, as regiões brasileiras apresentam seis tipos de climas: equatorial, tropical, tropical semiárido, tropical de altitude, tropical litorâneo e subtropical. A partir do clima da região que o aterro sanitário está localizado, é realizado seu

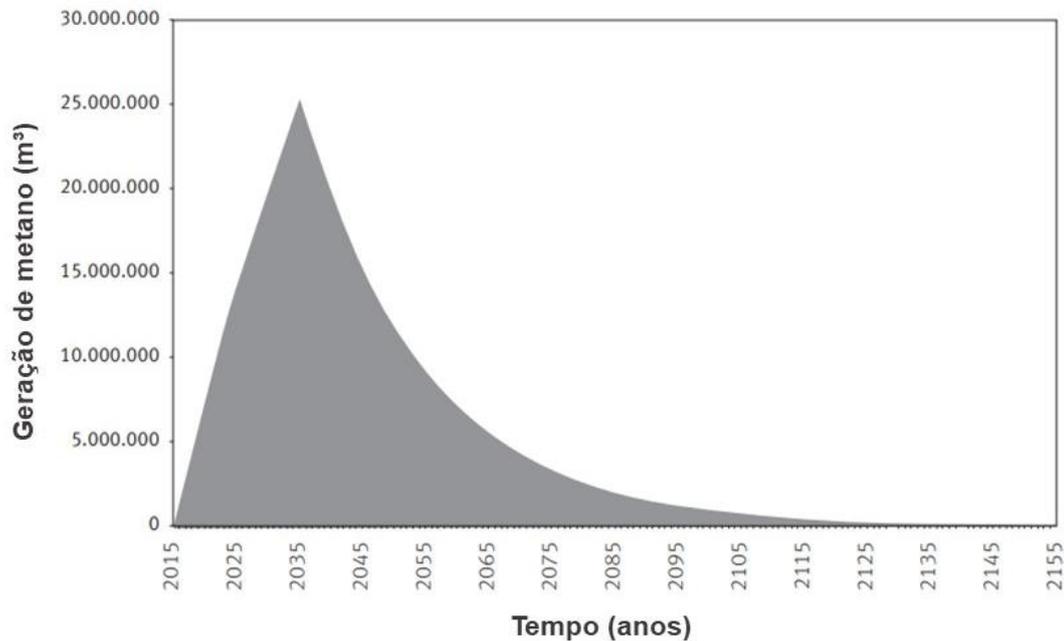
dimensionamento tendo como base a temperatura ambiente, umidade e precipitação. Isso porque a temperatura do ar é um determinante parcial da temperatura do resíduo e pode, portanto, influenciar a infiltração e afetar a evaporação (FARQUHAR; ROVERS, 1973). Concomitante, a precipitação, topografia e hidrogeologia afetam a infiltração de água e ar do aterro e a reciclagem do chorume afeta sua composição (FARQUHAR; ROVERS, 1973). Além disso, as trocas entre o ar e os gases dentro do aterro são afetadas pela pressão atmosférica (FARQUHAR; ROVERS, 1973). Assim, aterros com profundidades de resíduos maiores podem operar de forma mais eficaz, já que poços de drenagem rasos, com até 10 m de profundidade, tendem a ter maior infiltração de ar (STEGE; DAVILIA, 2010).

Quanto às características populacionais, vários fatores influenciam a composição dos RSU nas cidades, variando de acordo com o número de habitantes, nível de escolaridade da população, poder aquisitivo, nível de renda familiar, modos e costumes, condições climáticas e aumento no consumo de alimentos industrializados (NADALETTI *et al.*, 2015b). A região Sudeste é a maior produtora de biogás no Brasil (49,01%), seguida pela região Nordeste (25,49%), Sul (10,3%), Centro-Oeste (7,89%) e Norte (7,18%) (NADALETTI *et al.*, 2017). Obviamente, a composição do RSU, no que diz respeito a fatores como idade, conteúdo celulósico, relação C/N e a presença de inibidores microbianos irão influenciar vários dos fatores do primeiro nível (FARQUHAR; ROVERS, 1973).

A instalação de um aterro sanitário no Brasil requer medidas de distanciamento do lençol freático, corpos de água, núcleos populacionais, etc. Além disso, quanto ao tipo de solo, de acordo com a ABNT (2010), recomenda-se que o aterro possua em sua base solos poucos permeáveis, como solos argilosos, argilo-arenosos ou argilo-sitolosos. Além disso, quanto a topografia da área, a declividade da mesma deve ser superior a 1% e inferior a 30% (ABNT, 2010). O tipo de solo, também se enquadrará nas características do solo para o sistema de revestimento na seção 4.2.2.5.

A vida útil de um aterro sanitário corresponde ao tempo em que ele receberá resíduos, mas não necessariamente coincide com o período de geração de biogás. Um exemplo de aterro com uma vida útil de 20 anos está representado na Figura 19.

Figura 19 – Estimativa da geração de metano em aterro sanitário.



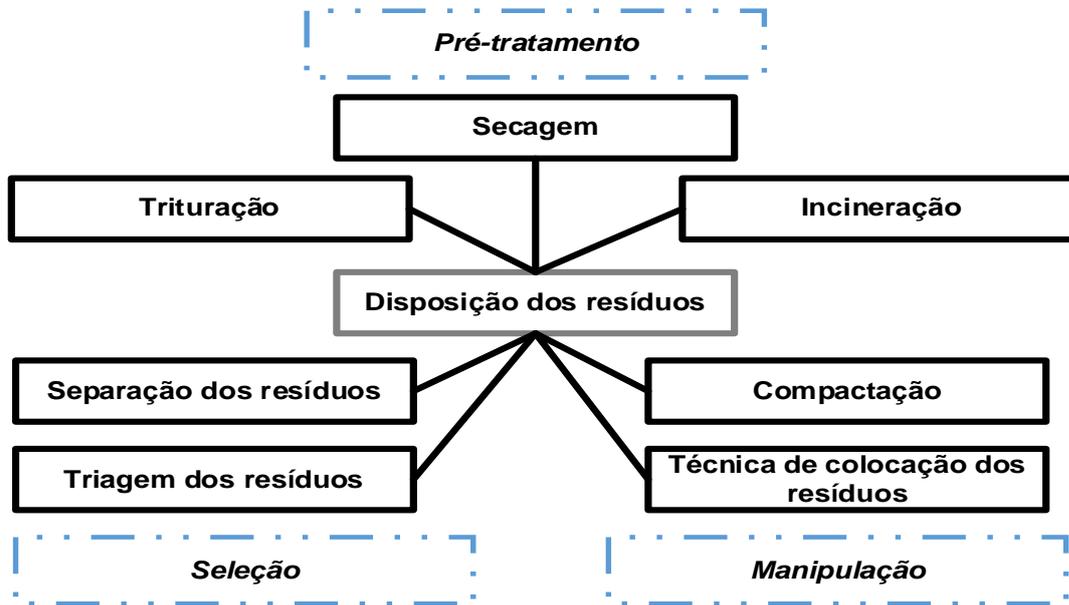
Fonte: (PIÑAS *et al.*, 2016).

Como demonstrado na figura, a geração máxima de metano ocorre no último ano da vida útil do aterro, momento em que a decomposição está acontecendo aceleradamente com a grande massa de resíduos que foi depositada durante todos os anos. A partir daí a geração diminui porque não haverá mais o descarte de resíduos no local, a decomposição ocorrerá somente para a massa que já estava depositada, começando então a decair até se aproximar de zero. No Brasil, aterros de pequeno porte devem ter, no mínimo, vida útil de 15 anos (ABNT, 2010). A vida útil do aterro tem relação com a topografia do local, a quantidade de resíduos recebidos e a triagem dos mesmos, pois a coleta seletiva de resíduos para a reciclagem diminui a entrada destes no aterro, o que aumenta sua vida útil (PORTELLA; RIBEIRO, 2014).

4.2.2.4 Disposição de resíduos

A disposição de resíduos, representada na Figura 20, foi subclassificada em: seleção de resíduos, pré-tratamento e manipulação.

Figura 20 – Disposição de resíduos.



Fonte: Autora.

O pré-tratamento dos resíduos considerou a trituração, secagem e incineração, de acordo com a validação dos especialistas. O tamanho da partícula do resíduo tem influência na cinética do processo, e logo a redução de seu tamanho, a partir da trituração, resulta em uma maior taxa de geração de metano (PANTINI *et al.*, 2015). Como a secagem diminui a umidade da massa de resíduos, e a incineração a quantidade de resíduos, quando aplicados nos resíduos orgânicos, isso acarretaria em uma influência negativa na geração de metano. Portanto, é importante considerar essas opções como tratamento para resíduos inorgânicos, rejeitos, inertes, entre outros, o que aumentaria a proporção de resíduos orgânicos no aterro e aumentaria sua vida útil. A seleção dos resíduos também tem o objetivo de se alcançar uma maior proporção de resíduos orgânicos no aterro para a biodegradação. Assim, com a triagem dos resíduos, materiais recicláveis poderiam ser redirecionados para seu reaproveitamento e reprocessamento. Enquanto isso, a separação dos resíduos segregaria células com resíduos inertes e inibidores do processo de biodegradação.

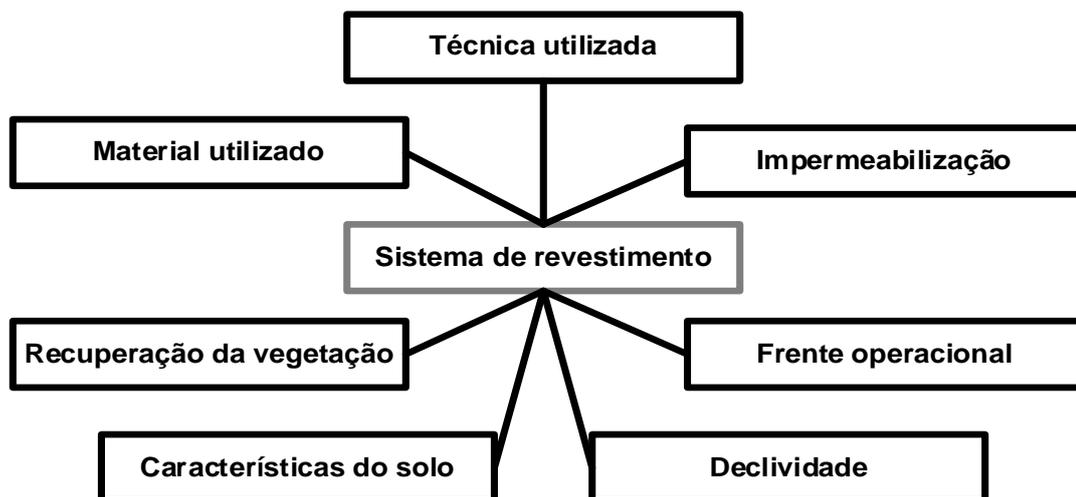
A redução do volume de lixo pela compactação, e a utilização de pequenas áreas para um rápido fechamento das células, diminuem o tempo do processo aeróbico e acentuam a produção de gás por unidade de volume. Assim a compactação de resíduos ajuda a promover a decomposição anaeróbia dos resíduos, aproximando

nutrientes, bactérias e umidade, além de melhorar a eficiência a coleta, limitando a infiltração de ar e melhorando a qualidade do gás (STEGE; DAVILIA, 2010). A técnica de colocação do resíduo afeta a infiltração de água e gases no aterro, influenciando no processo de biodegradação (FARQUHAR; ROVERS, 1973).

4.2.2.5 Sistema de revestimento

O sistema de revestimento corresponde as camadas diárias, intermediárias e final do aterro, de acordo com os fatores demonstrados na Figura 21.

Figura 21 – Sistema de revestimento.



Fonte: Autora.

O movimento de gases e água na superfície do aterro é afetado pela disposição do resíduo e pelos materiais e procedimentos usados para cobrir o resíduo (FARQUHAR; ROVERS, 1973). Locais de disposição não gerenciados, com pouca ou nenhuma cobertura de solo, têm altas taxas de emissões fugitivas de biogás para a atmosfera e infiltração de ar no sistema de coleta. Áreas sem cobertura de solo também têm altas taxas de infiltração da chuva, fazendo com que o lixiviado se acumule e bloqueie o sistema de coleta de gás. A instalação de uma cobertura de solo diminui as emissões de biogás e reduz a infiltração de chuva e ar. Esses efeitos dependem também da permeabilidade da cobertura, espessura da cobertura e a porcentagem da área do aterro com cobertura. Normalmente, a cobertura final tem

maior espessura e menor permeabilidade, e é mais eficaz em termos de aumento da eficiência de coleta (STEGE; DAVILIA, 2010).

A maioria dos aterros têm pelo menos uma cobertura de solo intermediária instalada sobre áreas que não foram utilizadas para descarte por um longo período. Solos intermediários fornecem um nível moderado de controle sobre a infiltração de ar, emissões de biogás e infiltração de chuva. A cobertura diária do solo normalmente é uma camada mais rasa, que é instalada no final do dia em áreas de disposição ativa, e fornece uma barreira mais permeável ao ar e à água que os solos de cobertura final ou intermediária (RITCHIE; MCBEAN, 2011; STEGE; DAVILIA, 2010). Já a utilização de argila ou materiais sintéticos atuam como uma barreira de baixa permeabilidade, que é eficaz na minimização das emissões fugitivas de biogás (STEGE; DAVILIA, 2010).

Os materiais usados para cobertura diária, intermediária e final variam dependendo da disponibilidade local de solos, clima e materiais. A cobertura diária evita odores e geralmente não é considerada parte do projeto. Locais que usam solo de baixa permeabilidade para a cobertura diária e intermediária diminuem a eficiência de coleta de biogás e a drenagem do lixiviado (US EPA, 2020). Na superfície do aterro, as coberturas intermediária e final são projetadas para fornecer uma vedação entre o aterro e a atmosfera. Quanto maior a impermeabilidade na superfície do aterro, maior poderá ser o vácuo aplicado aos coletores de biogás. Assim, uma cobertura impermeável minimiza a infiltração do ar atmosférico e da água na massa de resíduos e, finalmente, nos coletores de biogás. Quanto mais impermeável a cobertura intermediária e final, maior o espaçamento potencial dos poços de biogás (US EPA, 2020). No Brasil, a camada impermeabilizante do aterro depende da permeabilidade do solo onde este se encontra, da profundidade do lençol freático e excedente hídrico. De acordo com essas características, são escolhidas se as camadas serão com solo próprio do local compactado, solo importado compactado ou geossintéticos impermeabilizantes (ABNT, 2010).

Quanto a declividade da cobertura, uma cobertura mais íngreme necessita de controle mais rigorosos da emissão de gases. Uma maneira de se otimizar a redução da emissão de gases e da percolação de água em uma cobertura íngreme pode ser na seleção de solos com alta capacidade de retenção de água na barreira capilar (FENG *et al.*, 2017). Portanto, é crucial para o engenheiro selecionar um ângulo de cobertura apropriado para otimizar o projeto do solo de cobertura, tanto contra a

emissão de metano, quanto contra a percolação de água. Se uma cobertura de aterro for construída em uma região árida a semiárida, onde a infiltração de chuva e a percolação da água pode ser menos importante, seria desejável projetar uma cobertura mais plana de modo que a eficiência da oxidação do metano possa ser aumentada. Em contraste, em uma região úmida, uma cobertura mais íngreme facilitaria melhor a drenagem lateral da água para minimizar a percolação da água. No entanto, deve-se tomar cuidado para controlar a emissão de metano como resultado da dessaturação do solo de cobertura. Seria ideal associar a uma cobertura mais íngreme um sistema de coleta ou monitoramento de gás, especialmente na parte alta da cobertura, onde a emissão de gás é mais crítica (FENG *et al.*, 2017).

A frente operacional corresponde ao local que os resíduos são descarregados e dispostos diariamente. Nesta frente, não é possível captar o gás gerado, então é necessário impedir a entrada de água da chuva. É também necessário que, após o dia de trabalho, o local seja recoberto para evitar proliferação de vetores, presença de animais, odores e outros malefícios. Os materiais utilizados nesta camada podem variar entre solo, resíduos de construção civil classe A, resíduos de capina urbana, lonas plásticas, lonas automotivas, telhados móveis, entre outros (ABNT, 2010).

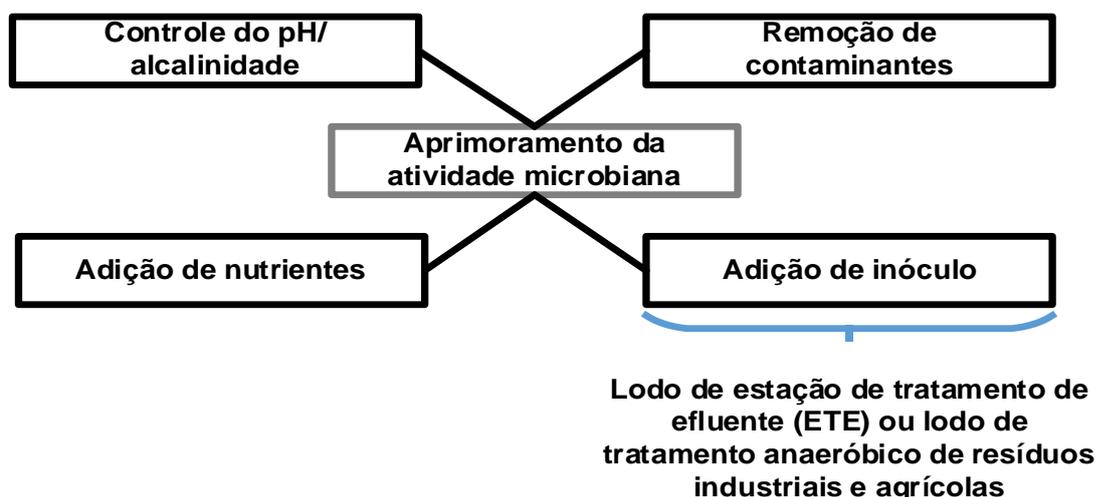
4.2.2.6 Aprimoramento da atividade microbiana

O aprimoramento da atividade microbiana proporciona um ambiente ideal para a geração de metano, ocorrendo pelo controle do pH e alcalinidade, remoção dos agentes tóxicos e inibidores do processo de biodegradação, adição de nutrientes e adição de inóculo proveniente do lodo de estações de tratamento de efluente, ou tratamento anaeróbico de resíduos industriais e agrícolas, conforme a Figura 22.

Geralmente, o RSU contém os nutrientes necessários para a digestão microbiana, incluindo hidrogênio, nitrogênio e fósforo (EPA, 2005). Porém, nutrientes e bactérias também podem ser adicionado através de lodo de estações de tratamento de efluentes e de unidades de tratamento anaeróbico de resíduos agrícolas ou industriais para proporcionar melhor condições para bactérias metanogênicas (RITCHIE; MCBEAN, 2011). Lodo de esgoto digerido anaerobicamente pode servir como uma fonte de microorganismos, bem como de nitrogênio, fósforo e outros nutrientes (BARLAZ; HAM; SCHAEFER, 1990). Além disso, a recirculação constante de líquidos ao longo de um período de tempo relativamente longo fornece nutrientes

em todo o resíduo constantemente (BARLAZ; HAM; SCHAEFER, 1990). Segundo Rasapoor et al. (2020), a adição de *biochar* e fenazina contribuem para o aumento da geração de metano. A adição desses compostos pode ser feita com a recirculação do lixiviado, afim também de aumentar a umidade. A adição de tampões de bicarbonato de sódio ou carbonato de cálcio são eficazes na manutenção das condições ideais de pH, equilibrando a formação de ácidos e neutralizando os íons de hidrogênio (RITCHIE; MCBEAN, 2011). Com isso, é indicado que essas soluções sejam adicionadas ao lixiviado para sua recirculação, afim de atingir a faixa ideal de pH para bactérias metanogênicas (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015).

Figura 22 – Aprimoramento da atividade microbiana.



Fonte: Autora.

Os metais pesados são inibidores do processo de biodegradação e estão presentes em diversos resíduos descartados em aterros sanitários, tais como lâmpadas, baterias, tintas, embalagens utilizadas para produtos químicos e farmacêuticos (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019). Então, para a sua remoção, é indicado a pré-seleção da entrada de resíduos ou isolamento de células para evitar a dispersão desses compostos (EMKES; COULON; WAGLAND, 2015).

4.2.3 Barreiras para o aprimoramento da geração e recuperação de biogás no Brasil

Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos ter sido introduzida em 2010 no Brasil, o país ainda apresenta problemas com relação a gestão de resíduos urbanos. Esses problemas correspondem à coleta informal de lixo e disposição irregular; a frequência e a cobertura da coleta que são desiguais, com um 'desvio negativo' maior nas áreas rurais e periferias; e a disposição final inadequada de resíduos (CETRULO *et al.*, 2018). Na pesquisa de Moura *et al.* (2018), foi identificado que resíduos orgânicos perigosos, resíduos de construção e demolição, resíduos de serviços de saúde, eletrônicos, têxteis, calçados, baterias e lâmpadas são enviados para aterros sanitários que não são tecnicamente adequados para recebê-los. Ainda, considerando a entrada de resíduos recicláveis no aterro, o ano de 2020 foi atípico devido a pandemia COVID-19. Como medida para evitar a transmissão em alguns centros de reciclagem, suas atividades foram suspensas, o que aumentou a disposição de resíduos recicláveis nos aterros, reduzindo-se a vida útil dos mesmos (URBAN; NAKADA, 2021).

O Brasil é um país com grande extensão territorial, está condicionado a seis climas diferentes, que variam temperatura e precipitação, o que conseqüentemente se reflete nas práticas de operação de um aterro e impede que as mesmas sejam generalizadas para todo território brasileiro. Isso também ocorre com as condições geográficas e hidrológicas do país, incluindo a topografia e tipo de solo, já que esses fatores delimitam a instalação do aterro, sua profundidade, dimensionamento do sistema de gás, sistema de revestimento, etc. Algumas práticas de operação aplicadas em outros países não são aplicáveis necessariamente ao Brasil, onde as condições socioeconômicas e climáticas, entre outros fatores, podem diferir consideravelmente. Dessa maneira, boas práticas de operação para o aprimoramento do biogás não podem ser 100% replicadas antes de um exaustivo estudo prévio das condições da região em que o aterro se encontra.

Vale salientar que, no Brasil, o sistema de drenagem de gás só é considerado se o aterro receber resíduos com fração orgânica maior de 30% e ter profundidade final maior que 3 m (ABNT, 2010). Além disso, é orientado que o tratamento de gás deve ser implementado sempre que o volume gerado possibilitar, não delimitando nenhum tipo de tratamento. Também, como mencionado anteriormente, a drenagem

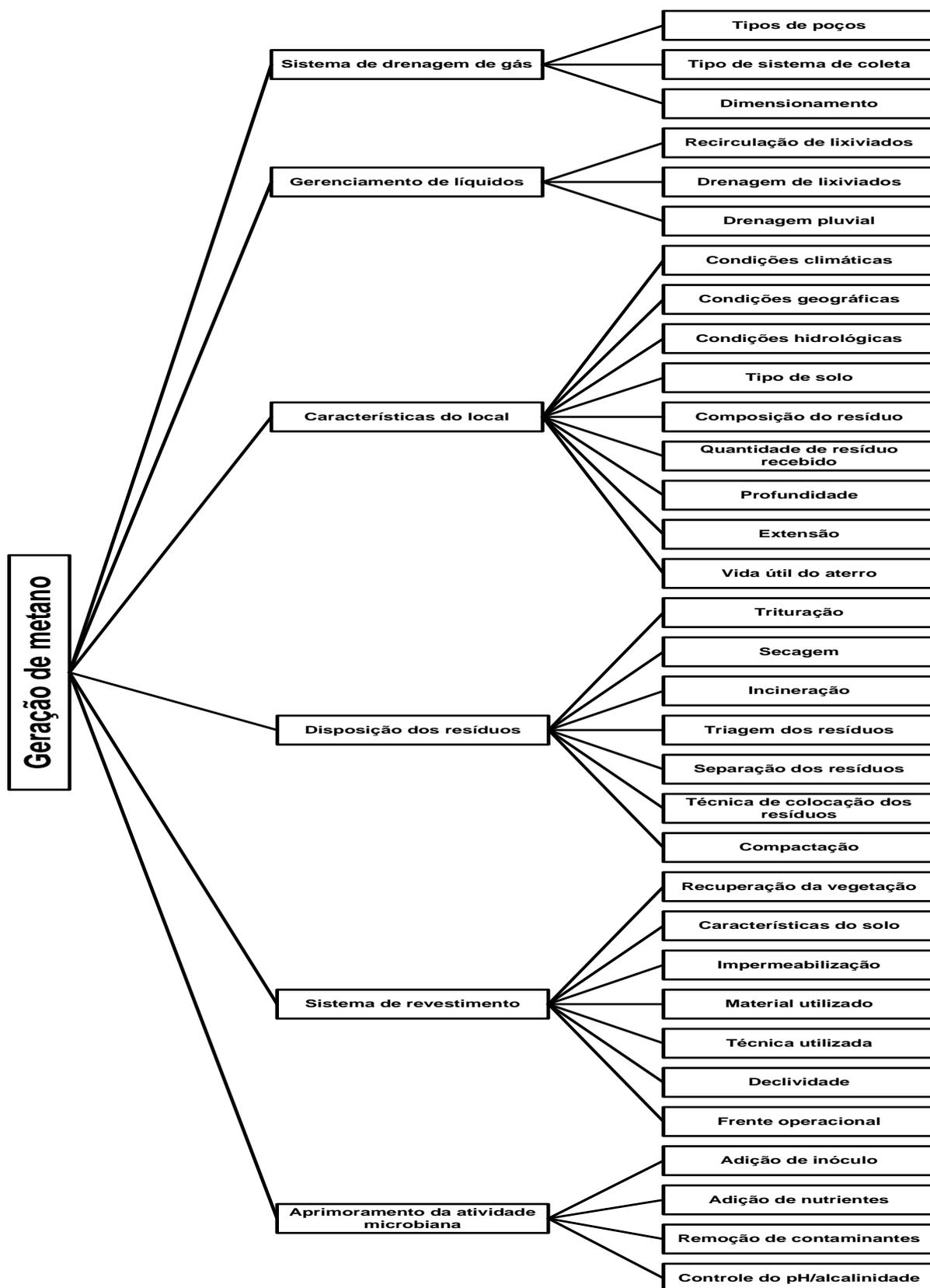
de lixiviados não é obrigatória, sendo necessária somente quando existir impermeabilização complementar no aterro (ABNT, 2010). No cenário atual da gestão de RSUs no Brasil, deficiências relacionadas ao monitoramento de aterros sanitários e poucas informações disponíveis sobre o desempenho dos sistemas de tratamento de lixiviado são recorrentes (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019). Além disso, a maioria dos especialistas, na validação dos fatores, mencionaram a criticidade de realizar drenagem pluvial no Brasil, o que ratifica a conclusão de Del Rey et al. (2020) que, para melhorar a produção de metano, deve-se evitar o influxo de água da chuva e, se possível, definir um procedimento fechado de recirculação de lixiviado.

Outro fator que limita a geração de metano a partir de práticas operacionais ocorre pela falta de disponibilidade de informações por parte das empresas privadas gestoras dos grandes aterros sanitários. Isso pode ser consequência da falta de exigência por parte do governo, para o qual o aterro deve estar em conformidade e não necessariamente precisa recuperar biogás de forma energética. Com a gestão dessas informações, boas práticas de operação de aterros sanitários no Brasil poderiam ser parte de documentos de informação como forma de torná-las públicas. Também, as iniciativas de aproveitamento energético de resíduos ainda são muito tímidas no Brasil, sendo fundamental fortalecê-las como ferramenta complementar de destinação adequada de resíduos. Apesar disso, o Brasil, mesmo lentamente quando comparado a outros países em desenvolvimento, está investindo na destinação correta dos resíduos, o que vem sendo verificado desde a ampliação da cobertura dos serviços de coleta, fechamento de lixões e desenvolvimento de pesquisas na área, além da legislação de regulamentação e incentivo para a disposição e recuperação energética dos resíduos.

4.3 PONDERAÇÃO DO IMPACTO DOS FATORES OPERACIONAIS

Com a validação dos especialistas e a seção anterior, os fatores foram organizados em uma nova estrutura hierárquica, representada na Figura 23. Nesta representação, foram elencados somente os fatores operacionais relacionados ao projeto, instalação e operação do aterro, para a avaliação do seu impacto na geração de metano.

Figura 23 – Estrutura hierárquica dos fatores operacionais.



Fonte: Autora.

Os resultados da ponderação dos fatores operacionais, pelos 34 especialistas, estão representados na Tabela 9, onde os subfatores foram ordenados conforme seu peso geral de acordo com o fator operacional correspondente. Além disso, foi representado o peso dos subfatores de acordo com a experiência dos especialistas com os climas brasileiros e, também, com a ocupação dos especialistas, sendo colaboradores de empresas do setor e pesquisadores da área. A medida de confiabilidade utilizada foi a relação de consistência da AHP, a qual foi considerada adequada, já que as matrizes de julgamento de cada especialista apresentaram consistências iguais ou menores que 10%. A média das consistências foi 9,60 %, com desvio padrão de 0,34%.

Tabela 9 – Ponderação média dos fatores operacionais.

(continua)

<i>p</i>	Fator Operacional (FO)	w_{FO} (%)	<i>k</i>	Subfator	w_g (%)			
					Geral	Clima	Colaboradores	Pesquisadores
1	Sistema de drenagem de gás	23,3	1	Tipo de sistema	8,4	8,3	8,2	8,7
			2	Tipo de poço	8,0	7,9	8,2	7,5
			3	Dimensionamento	7,2	7,3	7,1	7,3
2	Gerenciamento de líquidos	19,6	4	Drenagem de lixiviado	6,8	7,3	7,3	6,0
			5	Recirculação de lixiviado	6,6	6,3	6,2	7,3
			6	Drenagem pluvial	6,3	6,1	6,2	6,3
3	Características do local	5,2	7	Composição do resíduo	0,8	0,8	0,8	0,8
			8	Quantidade de resíduo recebido	0,7	0,7	0,6	0,7
			9	Condições climáticas	0,7	0,6	0,6	0,7
			10	Profundidade do aterro	0,6	0,6	0,6	0,6
			11	Condições hidrológicas	0,6	0,5	0,6	0,6
			12	Vida útil	0,6	0,6	0,6	0,6
			13	Extensão do aterro	0,5	0,5	0,5	0,4
			14	Tipo de solo	0,4	0,4	0,4	0,4
15	Condições geográficas	0,4	0,4	0,4	0,4			

Tabela 9 – Ponderação média dos fatores operacionais.

(conclusão)

p	Fator Operacional (FO)	w _{FO} (%)	k	Subfator	w _g (%)			
					Geral	Clima	Colaboradores	Pesquisadores
4	Disposição de resíduos	15,4	16	Separação	2,3	2,3	2,5	2,1
			17	Secagem	2,3	2,2	2,3	2,3
			18	Triagem	2,2	2,2	2,2	2,1
			19	Incineração	2,2	1,9	2,0	2,4
			20	Técnica de colocação	2,1	2,3	2,2	2,0
			21	Compactação	2,1	2,3	2,2	2,1
			22	Trituração	2,0	1,9	1,9	2,2
5	Sistema de revestimento	23,8	23	Impermeabilização	4,3	4,4	4,5	3,9
			24	Material utilizado	3,8	3,9	3,8	3,8
			25	Técnica utilizada	3,7	3,8	3,8	3,6
			26	Frente operacional	3,4	3,7	3,6	3,1
			27	Características do solo	3,1	3,2	3,1	3,0
			28	Declividade	2,7	2,5	2,6	2,9
			29	Recuperação da vegetação	2,7	2,4	2,3	3,5
6	Aprimoramento da atividade microbiana	12,6	30	Controle do pH/alcalinidade	3,6	3,6	3,5	3,9
			31	Remoção de contaminantes	3,2	3,0	3,1	3,3
			32	Adição de nutrientes	3,0	3,0	3,1	2,9
			33	Adição de inóculo	2,9	3,2	3,1	2,6

Fonte: Autora.

De acordo com o julgamento dos 34 especialistas, a ordem hierárquica do impacto dos fatores operacionais são: I) sistema de revestimento (23,8%); II) sistema de drenagem de gás (23,3%); III) gerenciamento de líquidos (19,6%); IV) disposição de resíduos (15,4%); V) aprimoramento da atividade microbiana (12,6%); e VI) características do local (5,2%). Quando um aterro não trabalha os dois primeiros fatores operacionais de forma eficaz, o seu desempenho poderá ser deteriorado em quase 50% se somados. Outro fator que atingiu por volta de 20% de impacto foi o gerenciamento de líquidos. Então, esses três fatores representam mais de 66% do impacto que os fatores operacionais podem causar na geração de metano. Esse resultado do *ranking* dos fatores operacionais pode ter se configurado dessa maneira

porque esses fatores possuem subfatores frequentemente manipuláveis a partir de técnicas operacionais dos aterros.

No fator operacional “sistema de drenagem de gás”, o subfator com maior impacto foi o do tipo de sistema. Isso se deve pois, quando o sistema é ativo, a sua configuração utiliza equipamentos para aumentar a captação de gás, aumentando assim a eficiência do sistema quando comparado a um sistema passivo. O subfator com menor impacto foi o de dimensionamento, onde alguns especialistas mencionaram que tal é oriundo do projeto do aterro, não podendo ser alterado durante a operação. Porém, se um aterro foi bem projetado, o dimensionamento do seu sistema será adequado e, conseqüentemente, apresentará geração de metano e eficiência de drenagem satisfatórias.

Quanto ao gerenciamento de líquidos, o fator que apresentou maior impacto foi o de drenagem de lixiviados, seguido pela recirculação do mesmo. Isso pode ter sido considerado pois a saturação de lixiviados nas células pode causar problemas de drenagem, enquanto que a recirculação de lixiviados se deve a uma forma de tratamento do lixiviado que, conseqüentemente, aumenta a umidade e matéria orgânica além de funcionar como regulador de pH. A drenagem pluvial ficou com o menor impacto pois é obrigatória nos aterros sanitários no Brasil e está relacionada à segurança da estrutura do aterro.

O fator “características do local” apresentou o menor impacto quando comparado aos outros fatores. Isso se deve, pois, as suas alterações estão relacionadas ao projeto e instalação, sendo que após concluída essas etapas, não se pode mais alterar os subfatores operacionais inerentes ao local de instalação. A composição de resíduos e a quantidade de resíduos recebidos foram considerados os subfatores com maior impacto na geração de metano, o que corresponde ao encontrado na literatura, pois quanto maior a fração de carbono orgânica maior será o percentual de metano no biogás, assim como quanto maior quantidade de resíduos recebido, mais gás será gerado.

Para a disposição de resíduos, o subfator que apresentou maior impacto foi o de separação, uma vez que esta corresponde a segregar a matéria orgânica de outros materiais que, inclusive, possam ser inibidores da biodegradação. A secagem impacta logo depois de separação, porém esse fator deve ser interpretado de forma negativa, já que ele retira a umidade fundamental à biodegradação. O subfator com menor impacto foi a trituração, pois corresponde a um processo de transformação física que

poderia aumentar a taxa de geração de metano, mas de forma muito baixa quando comparada a outros fatores.

No sistema de revestimento, fator que mais impacta a geração de metano, o subfator que apresentou maior impacto foi a impermeabilização. Esse resultado reflete a importância do sistema de revestimento para que se mantenha as condições anaeróbicas para o processo de biodegradação, além de um sistema fechado com o mínimo de emissões fugitivas de gás, infiltrações de água e ar. A recuperação vegetal, como esperado, foi o subfator com menor impacto, pois está relacionado as técnicas para o fechamento do aterro.

Quanto ao aprimoramento da atividade microbiana, o controle do pH/alcalinidade é o fator que mais impacta a geração de metano, seguido da remoção dos contaminantes. Isso porque esses dois subfatores afetam diretamente o processo de biodegradação, sendo essenciais para o desenvolvimento da microbiota. O fator que apresentou menor impacto foi a adição de inóculo, o que pode representar que não é uma técnica frequentemente utilizada. A depender do tamanho do aterro e da qualidade do resíduo, esta não impacta suficientemente na geração de biogás quando comparados com outros subfatores.

Quando realizada a comparação entre o peso médio geral dos subfatores, o peso dos subfatores de acordo com o clima e de acordo com a ocupação dos especialistas foram observadas poucas mudanças no *ranking*. A diferença do julgamento entre colaboradores e pesquisadores pode ter ocorrido devido a experiência em campo dos colaboradores de empresas e aos estudos laboratoriais dos pesquisadores. Além disso, a diferença relacionada ao clima pode ter ocorrido devido ao local de trabalho dos especialistas, já que algumas técnicas operacionais que ocorrem em aterros internacionais não são replicadas nos aterros brasileiros e, também, a grande extensão territorial brasileira com seis climas distintos.

4.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS EMPRESAS QUANTO À GERAÇÃO DE BIOGÁS

Para a mensuração do desempenho dos sistemas de geração de biogás (mais especificamente metano) das empresas respondentes, foi utilizado o peso geral do impacto dos fatores operacionais e as respectivas respostas dos seus gerentes

operacionais. As empresas respondentes foram das regiões sul, sudeste e nordeste do Brasil conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Mensuração do desempenho das empresas.

Aterros sanitários	Região	Desempenho Global (I_{β})	Quantidade de	
			RSU (toneladas /ano)	Biogás gerado (m ³ /ano)
Empresa 5	Sudeste	80,6%	2.160.000,00	79.100.000,00
Empresa 6	Sul	74,4%	1.200.000,00	92.000.000,00
Empresa 2	Nordeste	71,1%	1.095.000,00	105.120.000,00
Empresa 3	Sul	70,8%	1.000.000,00	78.840.000,00
Empresa 4	Nordeste	70,6%	1.000.000,00	62.000.000,00
Empresa 1	Sul	68,1%	240.000,00	-

Fonte: Autora.

Entre as seis empresas avaliadas, somente a Empresa 5, da região Sudeste, obteve desempenho plenamente satisfatório. As demais empresas obtiveram desempenho potencialmente satisfatório, entre 50% e 75%, em conformidade com os critérios mínimos para a geração de biogás e, conseqüentemente, metano. Porém, estas poderiam aprimorar seus esforços em algumas ações e, com isso, aumentar seu desempenho para mais de 75%. Vale salientar que esses resultados refletem a perspectiva do respondente, que pode não considerar os problemas existentes em seu sistema para as respostas. A Tabela 11 apresenta o desempenho das empresas de acordo com o fator operacional, bem como o desempenho médio alcançado pelas empresas para esses fatores.

Os esforços da empresa 1 para a melhoria do seu sistema poderiam ser focados no fator “sistema de drenagem de gás”, que possui os indicadores que mais se distanciaram do ideal, após disposição de resíduos e, se necessário, também avaliar as práticas o para aprimoramento da atividade microbiana. Por outro lado, a empresa 2 poderia aumentar a geração de metano a partir do aprimoramento da atividade microbiana, e então focar seus esforços na disposição dos resíduos. O mesmo é sugerido à empresa 3, enquanto que a empresa 4 poderia focar melhores práticas operacionais no aprimoramento da atividade microbiana, seguido do sistema

de drenagem de gás. Para as empresas com melhores desempenhos globais, 5 e 6, também é sugerido melhorar suas práticas quanto ao aprimoramento da atividade microbiana. Porém, a empresa 6 também poderia melhorar suas práticas operacionais quanto ao sistema de drenagem de gás.

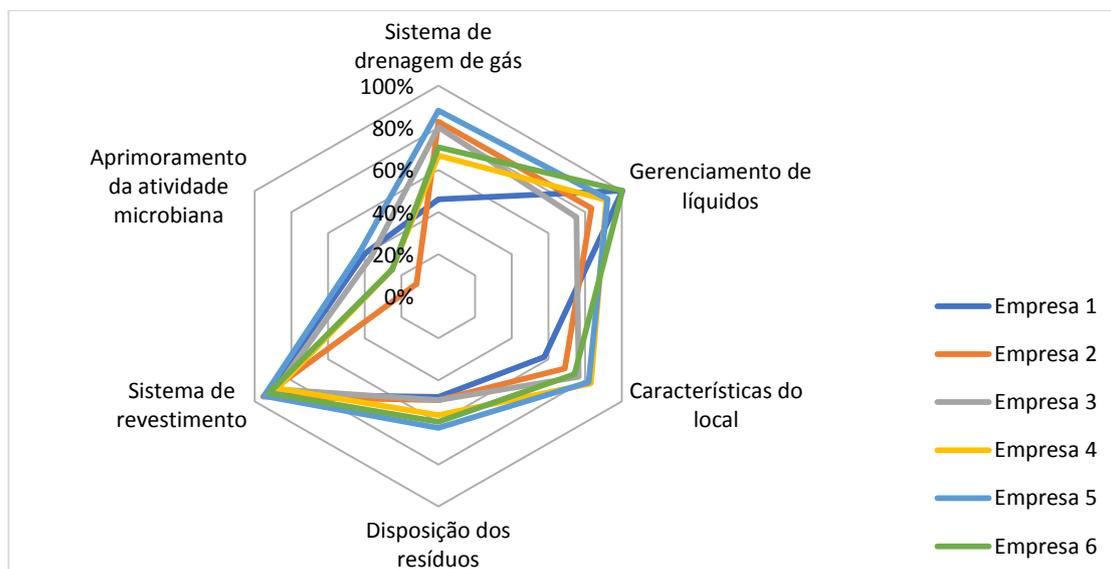
Tabela 11 – Desempenho das empresas de acordo com o fator operacional.

Fator operacional	Índice ideal	Desempenho por fator operacional						Desempenho médio por fator operacional
		Empresas						
		1	2	3	4	5	6	
Sistema de drenagem de gás	23,3%	10,7%	19,3%	18,7%	15,6%	20,6%	16,5%	16,9%
Gerenciamento de líquidos	19,6%	19,7%	16,4%	14,7%	18,0%	18,1%	19,7%	17,7%
Características do local	5,2%	3,0%	3,6%	4,00%	4,3%	4,3%	3,9%	3,8%
Disposição dos resíduos	15,4%	7,4%	7,6%	7,6%	8,7%	9,7%	9,2%	8,4%
Sistema de revestimento	23,8%	22,2%	22,7%	21,1%	20,9%	22,6%	22,0%	21,9%
Aprimoramento da atividade microbiana	12,6%	5,1%	1,5%	4,6%	3,2%	5,4%	3,2%	3,8%

Fonte: Autora.

A Figura 24 complementa a discussão acima, representando o nível de atingimento do fator operacional de acordo com a empresa. A partir da observação da figura, é visível que o fator que mais teve discrepância entre seu índice ideal e o alcançado pelas empresas foi o aprimoramento da atividade microbiana. Dessas empresas, somente a empresa 1 realiza o controle de pH/alcalinidade. A empresa 2 não o realiza e não o considera importante, enquanto que as outras empresas consideram uma prática importante, mas não a realizam. Quanto a remoção de contaminantes e adição de nutrientes, nenhuma empresa as realizam. A adição de inóculo é realizada apenas pelas empresas 1, 3 e 5, embora seus gerentes tenham opiniões diferente sobre sua importância.

Figura 24 – Nível de atingimento do fator operacional pelas empresas.



Fonte: Autora.

Outro fator operacional que obteve um desempenho médio baixo foi a disposição de resíduos. Embora a separação tenha sido o subfator com maior impacto, somente a empresa 4 o realiza. Quanto a secagem, as empresas 2, 3, 5 e 6 responderam ser indiferentes ao processo, enquanto a empresa 4 também se mostrou indiferente a incineração. As empresas 1 e 4 responderam estar pouco satisfeitas com o processo de secagem e quanto a incineração a empresa 1 se mostra satisfeita. A triagem somente é realizada pelas empresas 5 e 6 em uma parte dos resíduos recebidos, enquanto as outras empresas julgam como um processo importante, mas não o realizam. Quanto a técnica de colocação de resíduos, somente a empresa 5 considera que a realiza de forma parcialmente adequada, enquanto as outras empresas consideram as técnicas utilizadas totalmente adequadas. A compactação também é considerada parcialmente adequada pela empresa 1, enquanto que, para as demais, totalmente adequada. A trituração dos resíduos ocorre apenas, e parcialmente, nas empresas 1 e 5.

O sistema de drenagem de gás apresentou também uma média menor que a ideal. Quanto ao tipo de sistema, a empresa 5 possui eficiência de coleta de gás maior que 80%, enquanto que as empresas 1,2,3 e 6 apresentam uma eficiência entre 60% e 80%, e a empresa 4 entre 35% e 50%. O ar infiltrado no sistema para a empresa 1, é maior que 10%, enquanto que para as empresas 4 e 6 varia entre 3% e 5%. As

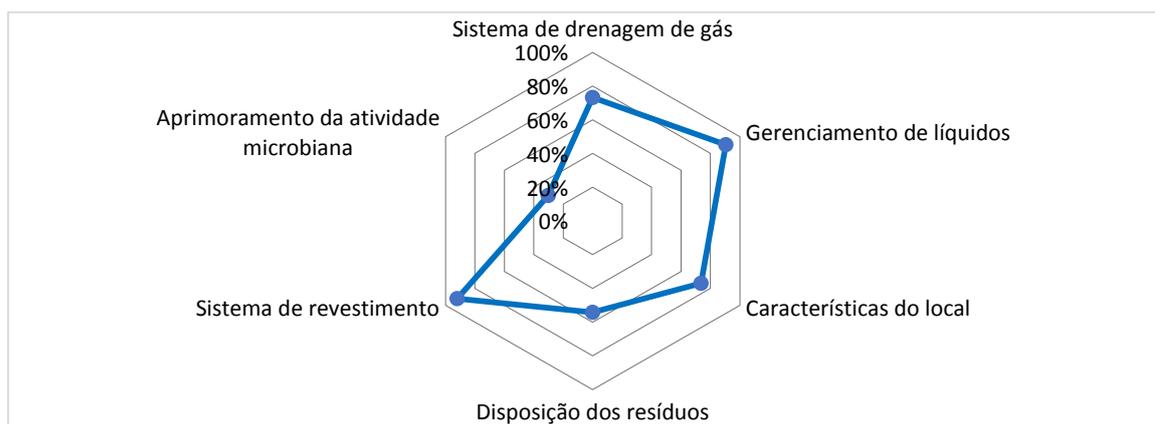
empresas 2, 3 e 5 apresentaram as melhores condições de infiltração de até 3%. Quanto aos tipos de poços, a empresa 5 está muito satisfeita com seu sistema, as empresas 2, 3, 4 e 6 estão satisfeitas, e a empresa 1 insatisfeita. Quanto ao dimensionamento do sistema de drenagem, a empresa 1 se mostrou indiferente, as empresas 2, 3, 4 e 6 satisfeitas, e a empresa 5 muito satisfeita. A frequência de manutenção do sistema também foi questionada e a empresa 6 respondeu estar pouco satisfeita com suas manutenções. A empresa 1 foi indiferente a frequência de manutenções e as empresas 2, 3, 4 e 5 estão satisfeitas com as mesmas. O tratamento de ácido sulfídrico também foi questionado e apenas a empresa 5 se mostrou insatisfeita com isso.

Quanto ao sistema de revestimento, as respostas refletiram a primeira ou segunda melhores alternativas, o que também aconteceu em gerenciamento de líquidos. Entretanto, a empresa 3 realiza a recirculação superficial de lixiviados enquanto a empresa 2 respondeu que realiza a recirculação interna do mesmo. Para o fator “características do local”, a maioria das respostas também refletiram as melhores práticas possíveis. Porém, quanto ao tipo de solo existente no local em relação as práticas de impermeabilização, a empresa 1 respondeu ser parcialmente inadequado. Já quanto a composição do resíduo, a empresa 1 respondeu que a composição dos seus resíduos era parcialmente inadequada para geração de biogás e recuperação energética, sendo que o percentual de metano no biogás desta empresa é menor que 40%. Já o percentual de metano no gás de aterro gerado na empresa 4 está entre 40% e 50% e, nas empresas 2, 3, 5 e 6, está entre 50% e 60%. Quanto a vida útil do aterro, a empresa 1 corresponde a um aterro com vida útil menor que 15 anos, enquanto as empresas 2, 4 e 5 responderam que seus aterros tem uma vida útil entre 15 e 25 anos. A empresa 3 relatou trabalhar com um aterro de vida útil entre 35 e 45 anos.

A Figura 25 representa o nível de atingimento médio de cada fator operacional. A alta contemplação do sistema de revestimento reflete na importância do aterro sanitário ser um sistema fechado, com a mínima infiltração de ar e água, juntamente com o mínimo de emissões fugitivas de metano, logo as práticas relacionadas a isso são na sua maioria atingidas pela a operação do aterro por parte das empresas. Enquanto que o atingimento do gerenciamento de líquidos reflete na sua criticidade para o bom funcionamento do aterro, juntamente com a obrigatoriedade da drenagem pluvial e manter um ambiente com umidade adequada para a biodegradação, mas

que não o sature e impeça a drenagem de gás. Por outro lado, a contemplação das características do local está relacionada a adequação do projeto e instalação do aterro de acordo com as condições ambientais, técnicas e populacionais, que não podem ser alterados pela operação, porém sua contemplação pode ter resultado em torno de 70% devido a composição do resíduo e vida útil dos aterros. A contemplação da drenagem de gás reflete as práticas das empresas, das quais a maioria são adequadas, porém não estão totalmente de acordo para a máxima captação biogás e uso energético. Com o atingimento de aproximadamente 50%, a disposição de resíduos reflete ainda o alto custo para os aterros trabalharem com pré-tratamentos para determinados resíduos, além da seleção prévia dos mesmos. Concomitante, esse resultado pode ser reflexo da experiência do aterro na influência dos indicadores para o aumento da taxa de geração de metano, por exemplo, apesar da taxa de geração aumentar com a trituração, o aumento não é significativo quando comparado ao custo do processo. Por fim, o resultado com menor nível de atingimento corresponde ao aprimoramento da atividade microbiana, isso pode refletir a distância que os estudos experimentais estão da operação do aterro, i.e., os aterros ainda não fazem uso desse tipo de prática operacional.

Figura 25 – Nível de atingimento médio dos fatores operacionais.



Fonte: Autora.

Para complementar as informações apresentadas, a Tabela 12 revela a média alcançada para cada indicador de acordo com as empresas respondentes. O objetivo com essa tabela é de compreender quais os indicadores que apresentam maiores ou menores índices gerais de contemplação.

Tabela 12 – Nível de atingimento médio dos indicadores.

<i>z</i>	Nome do indicador	Nível de atingimento médio (N_z)
29	Técnica utilizada	100,0%
7	Drenagem de lixiviado	95,8%
24	Técnica de colocação	95,8%
25	Compactação	95,8%
33	Recuperação da vegetação	95,8%
9	Drenagem pluvial	95,8%
30	Frente operacional	95,8%
32	Declividade	95,8%
17	Extensão do aterro	91,7%
19	Condições geográficas	91,7%
12	Quantidade de resíduo recebido	87,5%
14	Profundidade do aterro	87,5%
15	Condições hidrológicas	87,5%
27	Impermeabilização	87,0%
28	Material utilizado	87,5%
31	Características do solo	87,5%
13	Condições climáticas	79,2%
8	Recirculação de lixiviado	79,2%
18	Tipo de solo	75,0%
3	Tipo de poço	75,0%
2	Ar infiltrado	75,0%
10	Composição do resíduo recebido	75,0%
4	Dimensionamento do sistema	75,0%
1	Eficiência de coleta	70,8%
5	Frequência de manutenções	62,5%
6	Tratamento de H ₂ S	62,5%
23	Incineração	54,2%
37	Adição de inóculo	50,0%
22	Triagem	41,7%
11	Percentual de metano no biogás	37,5%
21	Secagem	37,5%
34	Controle do pH/alcalinidade	33,3%
26	Trituração	33,3%
20	Separação	29,2%
16	Vida útil	25,0%
36	Adição de nutrientes	20,8%
35	Remoção de contaminantes	16,7%

Fonte: Autora.

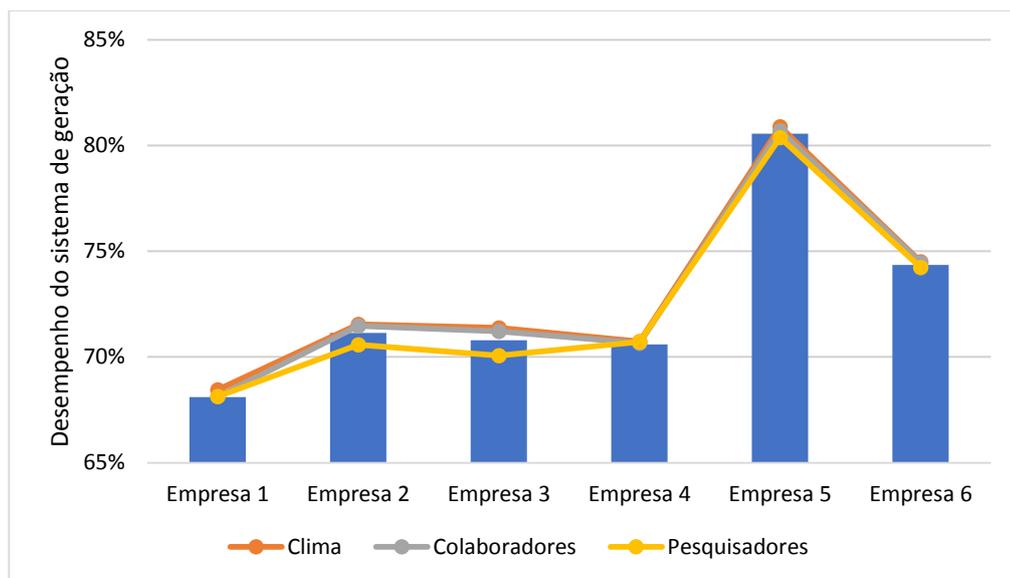
Tomando-se como exemplo o subfator “tipo de sistema”, este corresponde à média de atingimento de dois indicadores: ar infiltrado com, 75,00% de atingimento, e eficiência de coleta, com 70,8% de atingimento pelas empresas. Enquanto que a média de atingimento do subfator “dimensionamento” é composta por três indicadores, que são dimensionamento do sistema com um atingimento de 75,0%, frequência de manutenções e tratamento de gás sulfídrico (H_2S) ambos com atingimento de 62,5%. Isso ocorre também com a média de atingimento no subfator “composição de resíduos”, pois é constituída pelos indicadores composição do resíduo recebido 75,0% e percentual de metano no biogás 37,5%. Quanto a esses indicadores, era esperado um maior índice de contemplação para a eficiência de coleta, pois o mesmo está relacionado diretamente as receitas geradas com o uso final do biogás. O mesmo ocorreu com a frequência de manutenção e tratamento de H_2S , pois representam práticas para uma drenagem ideal, sendo que a presença de H_2S está ainda associada à corrosão das tubulações, drenos e motores constituintes do sistema de coleta do biogás requerendo, portanto, tratamento adequado antes de seu aproveitamento. Além disso, a composição de resíduos está estreitamente relacionada ao percentual de metano no biogás, porém, seus níveis de contemplação divergiram, o que pode representar que o sistema possui infiltração de ar (o que também diverge com o apresentado) ou que outras práticas relacionadas ao aprimoramento da geração de metano não estão ocorrendo de forma ideal, corroborando para a biodegradação aeróbica e, conseqüentemente, não geração de metano.

Os menores índices de contemplação pelas empresas estão relacionados com o aprimoramento da atividade microbiana, onde todos os indicadores desse fator operacional apresentaram nível de atingimento menor ou igual a 50%, em particular a remoção dos contaminantes, com 16,67%. Como discutido anteriormente, a remoção de contaminantes ainda não é uma prática difundida nos aterros, além disso, a forma mais comum para que ocorra é a partir da separação dos resíduos inibidores do processo de biodegradação anaeróbica, ou seja, a segregação das células, o que ainda representa um custo alto em relação ao aumento da taxa de produção de metano. Em seguida, a disposição de resíduos também apresentou um nível de contemplação baixo, isso também é resultado do elevado custo relacionado ao pré-tratamento e seleção dos resíduos. Apesar disso, a compactação e técnica de colocação de resíduos apresentarem um nível de atingimento maior que 90%. Os

indicadores de características do local apresentam um índice de contemplação elevado, embora a maioria desses indicadores estão relacionados a projeto e instalação do aterro, sendo que sua alteração ocorre nessas etapas. Devido a isso, as características do local ocupam o último impacto na geração de metano.

O índice de desempenho do sistema de geração de biogás das empresas também foi investigado considerando-se três diferentes ponderações da estrutura hierárquica: a ponderação realizada a partir da opinião dos especialistas que possuíam experiência nos climas brasileiros, a ponderação dos especialistas pesquisadores e dos especialistas colaboradores de empresas do setor. A Figura 26 representa a comparação entre os desempenhos alcançados pelas empresas (I_{β}).

Figura 26 – Análise de sensibilidade da ponderação.



Fonte: Autora.

Para verificar se ocorreu diferença significativa entre o desempenho global geral (série em barras) e os desempenhos que utilizaram a ponderação dos fatores em relação ao clima, colaboradores de empresas do setor e pesquisadores (séries em linhas) foi realizado uma análise de variância, ou seja, o teste da ANOVA. Sabendo que os dados seguem uma distribuição normal e considerando um nível de significância 0,05, os I_{β} não apresentaram diferença significativa, pois o p-valor foi maior que o nível de significância (p-valor=0,9964). Esse resultado já era esperado devido à discussão realizada na Seção 4.3 sobre a diferença de impacto dos fatores

a partir das perspectivas apresentadas, a qual não apresentou grandes mudanças no *ranking*. Porém, a análise de sensibilidade quanto ao clima e quanto aos colaboradores apresentou índices de desempenho superiores aos apresentados utilizando-se a ponderação geral. Enquanto que a análise de sensibilidade quanto a ponderação dos pesquisadores em relação ao geral, para as empresas 2, 3, 5 e 6, apresentou índices de desempenho menores do que os apresentados anteriormente.

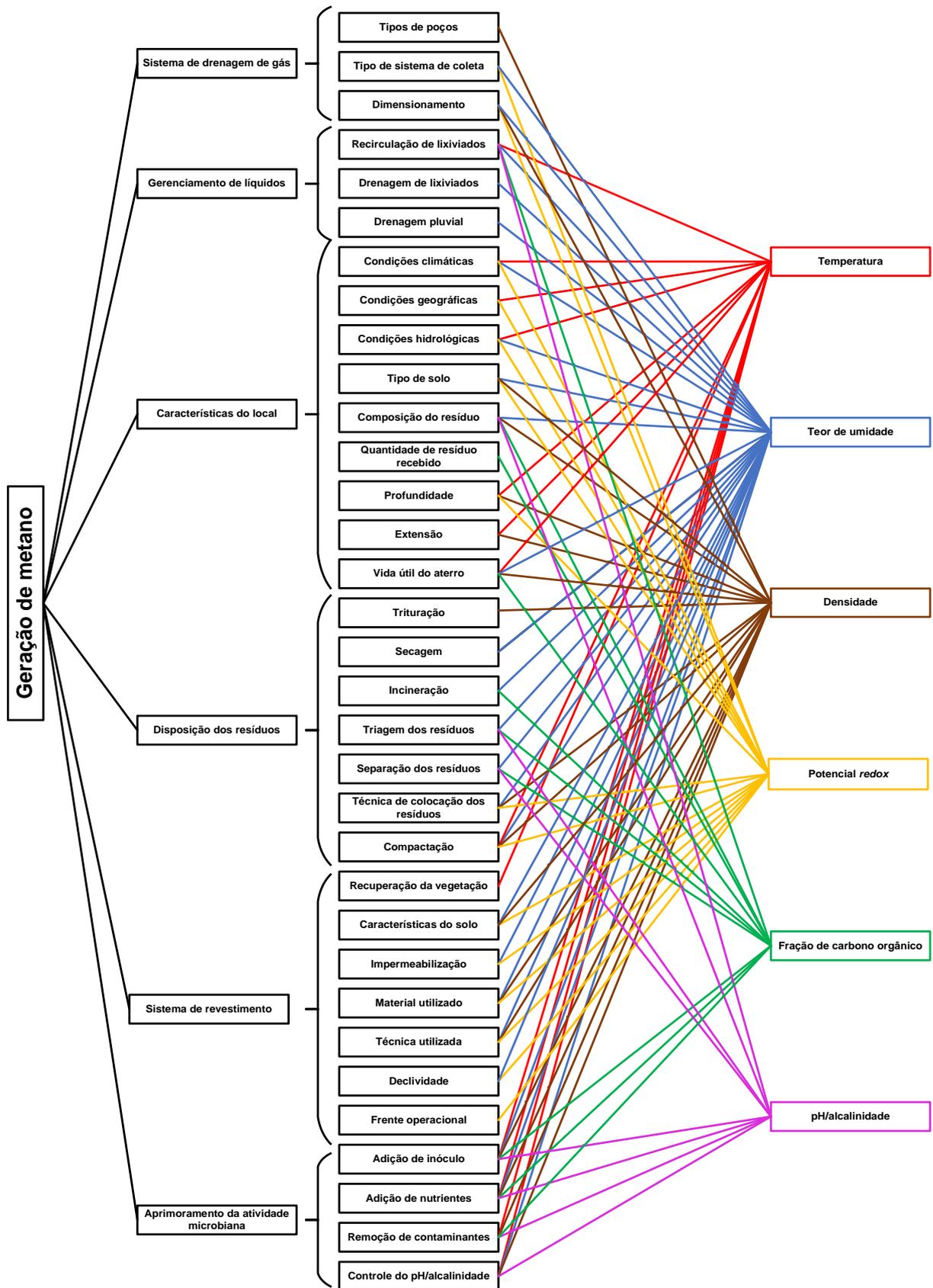
A empresa que apresentou a maior média de diferença na análise de sensibilidade foi a Empresa 3, com 0,58%, seguida pela Empresa 2 com diferença média de 0,43%. As empresas 5, 1 e 6 apresentaram diferença média abaixo de 0,15%. Devido a pequena mudança de desempenho entre as diferentes perspectivas das ponderações dos fatores, as empresas continuaram nos níveis de desempenho apresentados anteriormente, sendo que a Empresa 5 com desempenho plenamente satisfatório e as demais apresentaram desempenho potencialmente satisfatório, mesmo com a análise de sensibilidade. Com isso, pode-se concluir que é importante considerar os diferentes especialistas na mensuração, i.e., o julgamento geral, pois refina o processo de diagnóstico, diminuindo a tendência relacionada a experiência dos especialistas, mesmo que a diferença nos resultados alcançados pelas empresas não seja significativa. O que pode corroborar para inserção de novos julgamentos por parte dos especialistas na modelagem.

4.5 MAPA DE CAUSA E EFEITO NA GERAÇÃO DE METANO

Foram elencados seis fatores que estão diretamente ligados ao processo de biodegradação anaeróbica e, conseqüentemente, a geração de metano, mas que não são considerados fatores operacionais pois são grandezas do sistema. Esses fatores são alterados quando algum fator operacional é modificado, sendo portanto, impactado pelas práticas operacionais. A Figura 27 representa as relações de causa e efeito dos subfatores operacionais nos fatores da biodegradação.

Afim de aprimorar o processo de biodegradação anaeróbica e geração de metano, é de suma importância relacionar os subfatores operacionais aos fatores de biodegradação. Dessa forma, as empresas e pesquisadores podem usufruir deste conhecimento, pois em uma situação onde terão problemas relacionados a biodegradação dos resíduos, saberão em quais práticas operacionais focar suas atividades e quais tem maior impacto na geração de metano.

Figura 27 – Relação de causa e efeito na biodegradação.



Fonte: Autora.

Os fatores da biodegradação foram julgados pelos especialistas e ponderados. Essa ponderação mostrou que o fator com maior impacto preliminarmente, sem a influência dos fatores operacionais, é o teor de umidade com um impacto de aproximadamente 19,9%, seguido da fração de carbono orgânico com 19,7%. Esses dois fatores têm impacto em torno de 40% no processo de biodegradação. A temperatura é o terceiro fator que mais impacta, com aproximadamente 16,4% de atuação, embora a temperatura no interior dos aterros não sofre mudanças drásticas devido a sua inércia térmica. Com o quarto maior impacto, no valor de 15,3%, o pH/alcalinidade representa as condições ideais para a atividade microbiana. Os menores impactos correspondem ao potencial redox, de 14,6%, e a densidade, no valor de 14%. Isso porque esses fatores estão sob controle nos aterros geralmente, logo, justifica o baixo impacto apresentado. Pois o potencial *redox* está estreitamente relacionado a entrada de ar no interior do aterro e disponibilidade de oxigênio, porém, para a geração de metano a disponibilidade de oxigênio deve ser a mínima possível, enquanto que a densidade está relacionada as condições físicas do local, afim de fornecer um ambiente adequado a atividade microbiana.

Os subfatores do sistema de drenagem de gás influenciam o teor de umidade, a densidade e o potencial redox. A influência no teor de umidade é devido a possível infiltração de água pelo dimensionamento e pressão de sucção do tipo de sistema, assim como no potencial *redox* devido a infiltração de ar. Enquanto isso, a densidade é influenciada devido a distribuição dos dutos e seus dimensionamentos.

O gerenciamento de líquidos influencia na umidade devido às drenagens de líquidos, pois pode ocorrer infiltrações e saturação do ambiente devido a falhas nesses subfatores. Por outro lado, a recirculação de lixiviados é uma prática que pode aprimorar a umidade dentro dos aterros. A recirculação também influencia a temperatura, pois em ambientes com maior percentual de líquidos a amplitude térmica é menor. A fração de carbono orgânico também é influenciada pela recirculação, porque essa prática retorna uma quantidade de carbono orgânico significativo para o sistema. Além disso, a recirculação influencia no pH/alcalinidade, podendo ser utilizada para se atingir o pH neutro no ambiente.

As condições climáticas influenciam na umidade devido a precipitação e umidade relativa do ar. Influenciam parcialmente a temperatura interna do aterro devido a temperatura externa do sistema, além de atuar no potencial *redox* devido à pressão atmosférica. As condições geográficas influenciam a temperatura e potencial

redox devido a altitude do local do aterro, topografia e condições geomorfológicas. As condições hidrológicas influenciam a umidade, devido a presença de água no local e condições de drenagem, além do potencial *redox*, devido a saturação ambiental de água e temperatura. Além disso, o teor de umidade e potencial *redox* são influenciados pelo tipo de solo, o qual se relaciona à drenagem, impermeabilização e densidade e.g. solos argilosos são mais densos. A composição dos resíduos está estreitamente relacionada ao teor de umidade, fração de carbono orgânico, pH/alcalinidade e densidade, uma vez que resíduos orgânicos possuem maior quantidade de água, maior fração de carbono orgânico, e pH/alcalinidade ideais, além da sua densidade diferir de acordo com o tipo de resíduo.

A quantidade de resíduo depositado influencia a fração de carbono orgânico, pois quanto maior a quantidade de resíduo orgânico depositado, maior será a fração de carbono. A profundidade atua sobre a temperatura, porque quanto mais profundo o aterro, maior sua inércia térmica e menor influência da temperatura externa, que também é influenciada pela extensão do aterro devido à área de troca de calor. Também, o potencial *redox* é influenciado pela profundidade, pois, quanto mais profundo o aterro, menor a presença de oxigênio. A densidade também é influenciada tanto pela extensão do aterro, pois com a profundidade ocorre uma carga maior sobre os resíduos, quanto pela biodegradação e idade do aterro, uma vez que parte da matéria sólida se transforma em biogás. Por fim, a vida útil do aterro está relacionada a idade do mesmo, pois quanto mais velhas as células do aterro, menor seus teores de umidade e fração de carbono orgânico. A temperatura também se altera à medida que a taxa de biodegradação (processo exotérmico) diminui.

Em disposição de resíduos, a trituração influencia a densidade do local, enquanto a secagem e incineração diminuem o teor de umidade. Em específico, a incineração altera a fração de carbono orgânico e logo deve ser focada em resíduos não orgânicos. A triagem e separação influenciam a umidade, fração de carbono orgânico e pH/alcalinidade, pois resíduos orgânicos podem ser triados dos recicláveis que podem ser recuperados, enquanto que na separação são construídas células específicas para resíduos não orgânicos, inertes e perigosos, aumentando a umidade em determinadas células, a fração de carbono orgânico e separando resíduos que podem aumentar o pH/alcalinidade e ser tóxicos para a microbiota. A técnica de colocação dos resíduos influencia no teor de umidade, potencial *redox* e densidade, enquanto que a compactação influencia nesses fatores e também na temperatura.

Essas influências estão relacionadas a infiltração de água e ar, além da aproximação dos nutrientes e umidade com a microbiota.

Os subfatores do sistema de revestimento têm estreita influência com o teor de umidade, densidade e potencial *redox*. A impermeabilização, por meio do material utilizado, técnica empregada, características do solo, declividade e frente operacional, influenciam na entrada de ar e água nas células. Além disso, a recuperação vegetal influencia na temperatura devido ao ambiente instaurado acima do aterro, uma vez que a incidência dos raios solares não ocorre diretamente no solo.

Por fim, os subfatores de aprimoramento da atividade microbiana influenciam no pH/alcalinidade devido a remoção dos agentes tóxicos ao processo, ao controle dos mesmos a partir da adição de soluções tampão, além da adição de inóculo e nutrientes que contribuem para um ambiente de pH neutro. A densidade é influenciada por esses subfatores pois, com a atividade microbiana, são formados micro poros no sistema. A fração de carbono orgânico aumenta quando adicionado nutrientes, inóculo e removido os contaminantes. A umidade também aumenta com a adição de inóculo, além da adição de nutrientes e controle do pH/ alcalinidade, que são realizadas a partir da recirculação.

Pode-se observar que o teor de umidade é influenciado por 24 subfatores operacionais, resultando em um somatório de influências de 78,6%. A densidade é influenciada por 17 subfatores, o equivalente a 47,6%, enquanto o potencial *redox* possui 15 influências, com 43,5%. A temperatura com 13 subfatores que influenciam (27,4%), a fração de carbono orgânico com 10 influências, e pH/alcalinidade com 8 influências, somando 24,3% e 24,6% de impacto na geração de metano, respectivamente. A partir da normalização esses valores, o *ranking* da influência na geração de metano é alterado quando comparado ao que foi julgado pelos especialistas. O fator da biodegradação mais influente continua sendo o teor de umidade com 31,9%. Porém, o segundo mais impactante passa a ser a densidade, com 19,3%, seguido do potencial *redox* (17,7%), temperatura (11,1%) e pH/alcalinidade (10%), e fração de carbono orgânico (9,9%). Essa mudança no *ranking* ocorreu devido ao peso dos subfatores e seu somatório. Porém, não se tem total conhecimento das limitações desses fatores operacionais quanto a qual seu percentual em cada fator da biodegradação, pois não ocorreu uma comparação par a par dos subfatores em relação a cada fator da biodegradação. Além disso, podem haver mais ligações na Figura 27, pois outros fatores também influenciam e são

influenciados, mas em menor grau. Um exemplo disso é que “tipo de solo” influencia na “temperatura”, pois muda as condições de condução térmica. Porém, a “profundidade” é muito mais impactante na “temperatura”.

4.6 FERRAMENTA DE AUTODIAGNÓSTICO

A partir da pesquisa realizada e da modelagem construída, foi elaborada uma ferramenta eletrônica para ser disponibilizadas as empresas do setor. A ferramenta foi desenvolvida no *software Microsoft Excel*, sendo constituída por uma série de planilhas eletrônicas que derivam do desempenho alcançado pelas empresas quanto ao sistema de geração de biogás, mais especificamente produção de metano. Esse programa foi escolhido por ser *off-line* e de fácil compreensão. Dessa maneira, essa ferramenta automatiza o processo de mensuração de desempenho, facilitando o ingresso das informações e apresentando visualmente o resultado do desempenho.

A Figura 28 representa o menu da ferramenta, denominado “Início”. Nesta aba, o respondente tem as seguintes opções: responder questionários, resultados e informações adicionais. O botão “Equipe desenvolvedora” conduz o usuário a uma aba que apresenta o grupo de pesquisa e os colaboradores que desenvolveram a ferramenta. Enquanto que os botões presentes em “Responder questionário” levam às abas referentes aos questionários de cada fator operacional considerado. Por fim, os botões contidos em “Resultados” direcionam o usuário aos resultados gerais de cada fator operacional e aos resultados de cada indicador, além da informação sobre o desempenho global alcançado.

O usuário que pretende mensurar o desempenho do seu sistema clica no botão “Sistema de drenagem de gás” e será encaminhado ao primeiro questionário. A Figura 29 representa como esse questionário foi construído. Na aba dos questionários, as questões elencadas possuem cinco alternativas para escolha do usuário, que deverá escolher o que melhor representa seu julgamento. Também está inserido o “Painel de controle”, onde o usuário pode clicar nos botões para seguir aos próximos questionários, ir para os resultados ou voltar ao início.

O processamento das informações inseridas nas seis abas de questionários é realizado na aba denominada “Cálculos”, na qual estão inseridas as equações apresentadas na seção 3, além de informações necessárias para a apresentação dos resultados. Após o preenchimento de todas as questões, o usuário é conduzido ao

painel de resultados, a partir do botão “Resultados gerais” ou “Resultados dos indicadores”. A Figura 30 representa o painel com os resultados gerais, ou seja, o desempenho global alcançado pelo sistema,

Pra melhor compreensão do usuário, o botão “Resultado dos indicadores” conduz à aba onde todos os indicadores são apresentados (Figura 31), juntamente com seu desempenho e nível de atingimento. A análise dos indicadores é apresentada por um gráfico do tipo “régua”, no qual o ponteiro varia numa escala de atingimento do indicador de 0% a 100%. Além disso, nessa aba é apresentado o impacto de cada fator operacional na geração de biogás, o que pode auxiliar o usuário a compreender quais fatores tem maior influência para elevar ou diminuir o seu desempenho. Dessa maneira, o usuário consegue avaliar quais indicadores aprimorar para elevar seu desempenho na geração de biogás.

Figura 28 – Tela inicial.

Bem-vindo a ferramenta de diagnóstico de sistemas de geração de biogás em aterros sanitários!

Este diagnóstico tem o objetivo de mensurar o desempenho da sua empresa quanto a geração de biogás.

RESPONDER QUESTIONÁRIOS

- Sistema de drenagem de gás
- Gerenciamento de líquidos
- Características do local
- Disposição de resíduos
- Sistema de revestimento
- Aprimoramento da atividade microbiana

RESULTADOS

Resultados gerais

Resultados dos indicadores

Desempenho global 0,00%

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Equipe desenvolvedora

Universidade Federal de Santa Maria 1960

NIC NÚCLEO DE INOVAÇÃO E COMPETITIVIDADE

Início | 1-Sistema de drenagem de gás | 2-Gerenciamento de líquidos | 3-Características do local | 4-Disposição de resíduos | 6-Sistema de revestimento | 6-Api ...

Fonte: Autora.

Figura 29 – Instrumento de coleta de informações da ferramenta.

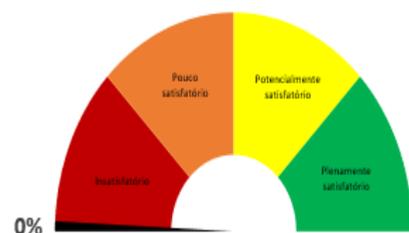
SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS	
Tipo de sistema	Qual a eficiência do sistema de coleta de gás? <input type="text"/>
	Qual o percentual de ar infiltrado no sistema de coleta? <input type="text"/>
Tipo de poços	Quão satisfeito você está com os tipos de poços de coleta utilizados no aterro? <input type="text"/>
Dimensionamento	Quão satisfeito você está com o dimensionamento do sistema de drenagem de gás? <input type="text"/>

PAINEL DE CONTROLE	
Início	2. Gerenciamento de líquidos
3. Características do local	4. Disposição de resíduos
5. Sistema de revestimento	6. Aprimoramento da atividade microbiana
Resultados gerais	Resultados dos indicadores

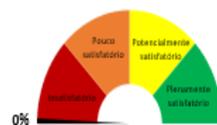
Fonte: Autora.

Figura 30 – Resultados gerais.

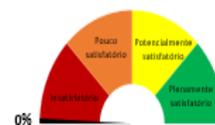
DESEMPENHO GLOBAL



Desempenho do sistema de drenagem de gás



Desempenho das características do local



Desempenho do sistema de revestimento



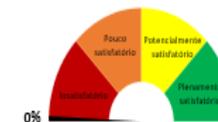
Desempenho do gerenciamento de líquidos



Desempenho da disposição de resíduos



Desempenho do aprimoramento da atividade microbiana

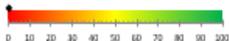
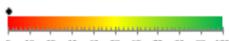
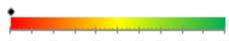
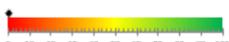
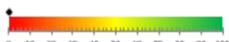
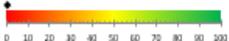
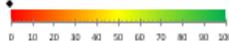


Início

Resultados dos
indicadores

Fonte: Autora.

Figura 31 – Resultados dos indicadores.

Fator Operacional	Impacto do fator	Desempenho do fator	Nível de atingimento do fator operacional	Indicador	Nível de atingimento do indicador	Desempenho no indicador
Sistema de drenagem de gás	23,28%	0,00%	0,00%	Tipo de sistema: eficiência de coleta		0,00%
				Tipo de sistema: ar ilfiltrado		0,00%
				Tipo de poços		0,00%
				Dimensionamento: sistema		0,00%
				Dimensionamento: frequência de manutenções		0,00%
				Dimensionamento: tratamento H2S		0,00%
Gerenciamento de líquidos	19,61%	0,00%	0,00%	Drenagem de lixiviados		0,00%
				Recirculação de lixiviados		0,00%

Início

Fonte: Autora.

5 CONCLUSÕES

A presente dissertação de mestrado teve o objetivo geral de construir uma modelagem capaz de mensurar o impacto dos diversos fatores internos dos aterros sanitários na produção de biogás no Brasil, com foco no aprimoramento da geração de metano. Foi utilizado um método multicritério de análise de decisão, o *Analytic Hierarchy Process*, para o qual foi construída uma estrutura hierárquica composta por fatores relacionados ao projeto, instalação e operação dos aterros. A fim de complementar a modelagem, foi utilizado um método de mensuração de desempenho para avaliar as empresas quanto ao seu sistema de geração de biogás e, por fim, avaliar o mapa de causa e efeitos dos fatores operacionais na biodegradação dos resíduos.

Os primeiros resultados foram a identificação dos 38 fatores que influenciam na geração de biogás e, conseqüentemente, na produção de metano a partir da Revisão Sistemática da Literatura. A partir da RSL, foi construída uma estrutura hierárquica preliminar, com 5 fatores relacionados à biodegradação no primeiro nível, e 6 fatores operacionais, com 23 subfatores, nos segundo e terceiro níveis. Essa estrutura foi encaminhada para a validação com um painel de especialistas e, então, uma nova estrutura hierárquica foi elaborada com seis fatores da biodegradação, seis fatores operacionais e 33 subfatores.

Com a estrutura hierárquica de fatores operacionais que influenciam na geração de metano, foi realizada a modelagem matemática para a ponderação dos impactos dos mesmos. Essa ponderação foi realizada a partir da opinião de 34 especialistas da área, entre eles pesquisadores e colaboradores de aterros sanitários. Para os especialistas, o fator operacional que mais impacta na geração de metano é o sistema de revestimento, com um impacto de 23,8%, seguido pelo sistema de drenagem de gás, com impacto de 23,3%. Enquanto isso, o menor impacto correspondeu às características do local, com 5,2%. Esses resultados refletem diretamente as práticas operacionais, já que o fator “característica local” pode ser alterado somente no projeto e instalação do aterro, enquanto que os fatores que mais impactam na geração podem diariamente ser alterados na operação do aterro.

A modelagem do impacto dos fatores operacionais foi complementada com a modelagem para se avaliar o desempenho das empresas quanto a geração de biogás. Com isso, seis empresas de três regiões do Brasil participaram das análises, que

podem refletir nas práticas que devem ser aprimoradas nos aterros para se alcançar um melhor desempenho, já que cada indicador respondido reflete a situação da empresa quanto aquele fator e subfator operacional. Dos sistemas diagnosticados, somente uma empresa obteve índice de desempenho global maior que 75%, considerado um desempenho plenamente satisfatório. As outras cinco empresas obtiveram índices de desempenho entre 68% e 74%, o que resultou em desempenhos potencialmente satisfatórios. Vale ressaltar que, para todas as empresas, o nível de atingimento menor foi para o fator operacional “aprimoramento da atividade microbiana” e seus indicadores, enquanto que a contemplação mais alta foi obtida pelo sistema de revestimento. Isso pode indicar que as pesquisas realizadas quanto ao aprimoramento da atividade microbiana e seus resultados positivos na geração de metano ainda não são plenamente utilizadas como práticas operacionais nos aterros sanitários, enquanto que o sistema de revestimento representa práticas consolidadas e difundidas nesse cenário.

O mapa de causa e efeito na geração de metano foi desenvolvido a partir das relações de influência entre os subfatores operacionais e as grandezas do processo de biodegradação. Assim, essas influências foram representadas em uma segunda estrutura hierárquica e o impacto dos fatores da biodegradação também foi avaliado pelos especialistas. Foi definido que os fatores da biodegradação que apresentam maior impacto na geração de metano são o teor de umidade seguido pela fração de carbono orgânico, representando cada um aproximadamente 20% de impacto. Por outro lado, o menor impacto foi delimitado ao potencial *redox* e a densidade, com aproximadamente 14% cada fator.

Como forma de disponibilizar às empresas do setor acesso as informações e modelagens realizadas nesse trabalho, foi elaborada uma ferramenta computacional intuitiva para o autodiagnóstico de seus sistemas de geração de biogás. O processo de mensuração foi automatizado, facilitando a inserção de informações referentes à situação das empresas, com a apresentação visual dos resultados do desempenho dos sistemas, tanto global quanto referentes a cada indicador.

A partir dessas informações, foi considerado que o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho foram alcançados. As principais contribuições estão relacionadas a identificação dos fatores que influenciam na geração de metano e na modelagem de diagnóstico desenvolvida para ponderar seu impacto e mensurar o desempenho das empresas, assim como a relação dos fatores operacionais com os

fatores do processo de biodegradação. Portanto, a presente dissertação de mestrado poderá auxiliar nas tomadas de decisões quanto as práticas operacionais de aterros sanitários, a fim de aumentar a geração de biogás com foco no aprimoramento de metano para recuperação energética.

5.1 LIMITAÇÕES

A principal limitação desta pesquisa foi quanto a ponderação do impacto dos fatores, uma vez que não houve a comparação par a par dos subfatores. Isso pode ter ocasionado uma superestimação de algum fator, por exemplo a recirculação de lixiviados e separação dos resíduos. Somada a isso, durante a aplicação dos instrumentos de pesquisa, existia a intenção se de realizar uma modelagem dinâmica, na qual o impacto dos fatores mudava de acordo com o clima e idade do aterro. Porém as respostas obtidas não foram adequadas para o desenvolvimento desse processo. Além disso, na construção do mapa de causa e efeito não foram consideradas todas as relações de influência entre os subfatores operacionais e fatores da biodegradação, somente as julgadas com maior grau de impacto.

Outra limitação refere-se ao número total de empresas que responderam ao terceiro instrumento de pesquisa, referente a avaliação do desempenho das empresas quanto ao sistema de geração de biogás. Neste, somente seis empresas de três regiões brasileiras participaram, podendo não representar plenamente o cenário brasileiro da geração de biogás em aterros. Caso mais empresas das cinco regiões brasileiras participassem, seria possível adicionar análises quanto a quantidade de resíduos recebidos, a quantidade de biogás gerado, o percentual de biogás drenado e suas relações com a localização e práticas desenvolvidas.

5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente trabalho possui pontos que podem ser desenvolvidos em estudos futuros. Entre eles, a modelagem do impacto dos fatores a partir do *Analytic Network Process*, afim de representar de uma forma mais concisa as relações entre os fatores operacionais e fatores da biodegradação. Além disso, a aplicação dinâmica dessa modelagem, quanto ao clima do local que o aterro está instalado e sua idade,

poderiam ser desenvolvidas. E também, com o aumento do número de respondentes, seria possível realizar análises estatísticas do setor.

Vale ressaltar que o impacto dos fatores internos resulta em variações não lineares na geração de metano. Então, como perspectiva futura, também é interessante complementar o modelo baseado em MCDA com a utilização de programação não linear, mais especificamente, redes neurais. As redes neurais podem solucionar diferentes tipos de problemas de predição, aproximação, associação, classificação e reconhecimento de padrões. Além disso, a maioria dos modelos de redes neurais possui alguma regra de treinamento, onde os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Com esses agrupamentos, pode-se simular modelagens baseadas em diferentes tipos de critérios e variáveis que tem capacidade de aprendizado baseada em informações anteriores ao cenário estudado.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-SHAFY, H. I.; MANSOUR, M. S. M. Solid waste issue : Sources , composition , disposal , recycling , and valorization. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, n. 4, p. 1275–1290, 2018.
- ABIOGÁS. **INFOGRÁFICOS ABIOGÁS/ABRELPE – RSU**. 2018. Disponível em: <https://abiogas.org.br/infograficos-abiogas-abrelpe-rsu/>. Acesso em: 5 jan. 2020.
- ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. 2010, 24p.
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos do Brasil 2018/2019**. 2019, 80 p.
- ADLER, M. J.; VAN DOREN, C. **How to read a book**. New York: Simon and Schuster, 1972.
- AGHDAM, E. F.; SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow. **Waste Management**, v. 87, p. 905–914, 2019.
- AGUILAR-VIRGEN, Q. *et al.* Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 412–419, 2014.
- AJIBADE, F.O. *et al.* Combining multicriteria decision analysis with GIS for suitably siting landfills in a Nigerian state. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 3–4, p. 100010, 2019.
- AL-YAQOUT, A. F.; HAMODA, M. F. Movement of unlined landfill under preloading surcharge. **Waste Management**, v. 27, n. 3, p. 448–458, 2007.
- ALONSO, Abel Duarte; BRESSAN, Alessandro. Micro and small business innovation in a traditional industry. **International Journal of Innovation Science**, v. 8, n. 4, p. 311–330, 2016.
- AMINI, H. R.; REINHART, D. R. Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential. **Waste Management**, v. 31, n. 9–10, p. 2020–2026, 2011.
- AMINI, H. R.; REINHART, D. R.; MACKIE, K. R. Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. **Waste Management**, v. 32, n. 2, p. 305–316, 2012.
- AMOO, O. M.; FAGBENLE, R. L. Renewable municipal solid waste pathways for energy generation and sustainable development in the Nigerian context. **Energy and Environmental Engineering**, v. 4, .1, p. 1–17, 2013.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 390 de 15 de dezembro de 2009**. 2009. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009390.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012**. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015**. 2015. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de energia elétrica**. 2020a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 30 set. 2020.

ANEEL. **Sistema de informações de geração da ANEEL SIGA**. 2020b. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWZmM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>>. Acesso em: 30 set. 2020.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Autorização para produção de biocombustíveis**. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/autorizacao-para-producao-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 10 set. 2020.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RenovaCalc**. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio/renovacalc>>. Acesso em: 10 set. 2020.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução Anp nº 685, de 29 junho de 2017**. 2017. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ranp-685--2017>>. Acesso em: 03 fev. 2020.

AULL-HYDE, R.; ERDOGAN, S.; DUKE, J. M. An experiment on the consistency of aggregated comparison matrices in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 171, p. 290–295, 2006.

AYODELE, T. R.; ALAO, M. A.; OGUNJUYIGBE, A. S. O. Resources from municipal solid waste : Assessment of its energy , economic and environmental bene fi ts in Nigeria. **Resources , Conservation & Recycling Recyclable**, v. 134, p. 165–173, 2018.

AYODELE, T. R.; ALAO, M. A.; OGUNJUYIGBE, A. S. O. Effect of collection efficiency and oxidation factor on greenhouse gas emission and life cycle cost of landfill distributed energy generation. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101821, 2020.

AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 718–735, 2018.

BABATUNDE, K. A.; BEGUM, R. A.; SAID, F. F. Application of computable general equilibrium (CGE) to climate change mitigation policy: A systematic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 61–71, 2017.

BAREITHER, C. A. *et al.* Retrospective Analysis of Wisconsin ' s Landfill Organic Stability Rule. **Journal of Environmental Engineering**, v. 143, n. 3, p. 1–11, 2017.

BARLAZ, M. A. *et al.* Controls on Landfill Gas Collection Efficiency : Instantaneous and Lifetime Performance Controls on Landfill Gas Collection Efficiency : Instantaneous and Lifetime Performance. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 559, n. 12, p. 1399-1404, 2009.

BARLAZ, M. A.; HAM, R. K.; SCHAEFER, D. M. Methane production from municipal refuse: A review of enhancement techniques and microbial dynamics. **Critical Reviews in Environmental Control**, v. 19, n. 6, p. 557–584, 1990.

BARROS, R. M. *et al.* A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste. **Reinforced Plastics**, v. 25, n. June, p. 4–16, 2018.

BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150–164, 2014.

BASTO, L; PINGUELLI, L. Brazilian waste potential : energy environmental , social and economic benefits. **Energy Policy**, v. 31, p. 1481–1491, 2003.

BEHREND, P.; KRISHNAMOORTHY, B. Considerations for waste gasification as an alternative to landfilling in Washington state using decision analysis and optimization. **Sustainable Production and Consumption**, v. 12, n. August, p. 170–179, 2017.

BENATO, A.; MACOR, A. Italian Biogas Plants: Trend, Subsidies, Cost, Biogas Composition and Engine Emissions. **Energies**, v. 12, n. 6, 2019.

BENBELKACEM, H. *et al.* Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 14, p. 5206–5212, 2010.

BERNASCONI, M.; CHOIRAT, C.; SERI, R. Empirical properties of group preference aggregation methods employed in AHP : Theory and evidence. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 3, p. 584–592, 2014.

BIDONE, R. F. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: estudo de caso – Central de Resíduos do Recreio, em Minas do Leão/RS.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

BOJESEN, M.; BOERBOOM, L.; SKOV-PETERSEN, H. Towards a sustainable capacity expansion of the Danish biogas sector. **Land use policy**, v. 42, p. 264–277, 2015.

BRASIL. **Entenda como funciona o mercado de carbono**. 2012a. Disponível em: < <http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/08/13/o-que-e-o-mercado-de-carbono-e-como-ele-opera-no-brasil/>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BRASIL. **Lei nº 11.196, de 21 de novembro de 2005**. Brasília, DF: Presidência da República, 2017, 9p, 2005, 50p. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11196.htm>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BRASIL. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Brasília, DF: Presidência da República, 2017a, 9p. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BRASIL. **Manual de Saneamento**. 4. ed. Brasília: FUNASA, 2015.

BRASIL. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Ministério do Meio Ambiente, p. 187, 2020.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente, 2012b. p. 103. Disponível em: <http://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decret_o_280812.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

BRASIL. **Portaria nº 419, de 20 de novembro de 2019**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2019. Disponível em: < <http://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-419-de-20-de-novembro-de-2019-228863910>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BRASIL. **Projeto de Lei do Senado nº 302, de 2018**. Brasília, DF: Senado Federal, 2018, 5p. Disponível em: < <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=7747161&ts=1571777635600&disposition=inline>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BRASIL. **Relatório de avaliação por área de gestão nº 9 resíduos sólidos**. Ministério da Transparência e Controladoria-Geral da União Secretaria Federal de Controle Interno, 2017b.

CAMILLIS, P. K. De *et al.* **Gestão do desempenho organizacional**. Porto Alegre, RS: SAGAH, 2018.

CANDIANI, G.; DA SILVA, M. Análise do Biogás no Aterro Sanitário Caieiras.

Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 32, n. 1, p. 69–77, 2011.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Fontes**. 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=9oz2g8avp_5&_afLoop=564664777654887#!>. Acesso em: 28 fev. 2020.

CETRULO, T. B. *et al.* Effectiveness of solid waste policies in developing countries: A case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 179–187, 2018.

CHALLCHAROENWATTANA, A.; PHARINO, C. Multiple-criteria decision analysis to promote recycling activities at different stages of urbanization. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1118–1128, 2016.

CHAN, G. Y. S.; CHU, L. M.; WONG, M. H. Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste , sewage sludge and marine sediment. **Environmental pollution**, v. 118, N. 3, p. 393–399, 2002.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044–4064, 2008.

CHIEMCHAISRI, C. *et al.* Reduction of Methane Emission From Landfill Through Microbial Activities in Cover Soil : A Brief Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 4, p. 412–434, 2012.

CIBIOGÁS. **BIOGASMAP**. 2019. Disponível em: <<https://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em: 10 set. 2020.

CIBIOGÁS. **Nota técnica: Panorama do biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, 2020. Disponível em: <http://www.cibiogas.org>. Acesso em: 10 set. 2020.

CLERCQ, D. de *et al.* Biomethane production potential from restaurant food waste in megacities and project level-bottlenecks : A case study in Beijing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1676–1685, 2016.

COLLING, Bruno *et al.* Low carbon biofuels and the New Brazilian National Biofuel Policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biore fi neries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109365, 2019.

COPTY, N. K.; ERGENE, D.; ONAY, T. T. Stochastic model for landfill gas transport and energy recovery. **Journal of Environmental Engineering**, v. 130, n. 9, p. 1042–1049, 2004.

COSTA, A. M.; ALFAIA, R. G. de S. M.; CAMPOS, J. C. Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 110–116, 2019.

COSTA, A. P. P. da. **Balanced Scorecard: conceitos e guia de implementação**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

DALMO, F. C. *et al.* Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 461–474, 2019.

DEL REY, G. O. *et al.* Seasonal variations of geochemical parameters for a tropical landfill: Implications for landfill stabilization. **Applied Geochemistry**, v. 121, p. 104686, 2020.

DEMESOUKA, O. E.; VAVATSIKOS, A. P.; ANAGNOSTOPOULOS, K. P. Suitability analysis for siting MSW landfills and its multicriteria spatial decision support system : Method , implementation and case study. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1190–1206, 2013.

DI TRAPANI, D. *et al.* Biogas from municipal solid waste landfills: A simplified mathematical model. **Water Science and Technology**, v. 77, n. 10, p. 2426–2435, 2018.

DONG, J. *et al.* Energy-environment-economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study. **Applied Energy**, v. 114, p. 400–408, 2014.

DOS SANTOS, I. F. *et al.* Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, , v. 131, p. 54–63, 2018 a.

DOS SANTOS, I. F. *et al.* Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil. **Resources Conservation and Recycling**, v. 136, p. 376–388, 2018 b.

DOS SANTOS, I. F.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 587–600, 2018.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JÚNIOR, J. A. V. A.. **Design Science research : método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DŽOLEV, N. M.; VUJIĆ, G. V. Impact assessment of concentrate re-circulation on the landfill gas production. **Thermal Science**, v. 20, n. 4, p. 1283–1294, 2016.

EL-FADEL, M.; ABI-ESBER, L.; SALHAB, S.. Emission assessment at the Burj Hammoud inactive municipal landfill : Viability of landfill gas recovery under the clean development mechanism. **Waste Management**, v. 32, n. 11, p. 2106–2114, 2012.

ELBESHISHY, E.; NAKHLA, G.; HAFEZ, H.. Bioresource Technology Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge : Influence of inoculum pre-incubation and inoculum source. **Bioresource Technology**, v. 110, p. 18–25, 2012.

ELLIS, J.; WINKLER, H.; CORFEE-MORLOT, J. CDM : Taking stock and looking

forward. **Energy Policy**, v. 35, p. 15–28, 2007.

EMKES, H.; COULON, F.; WAGLAND, S. A decision support tool for landfill methane generation and gas collection. **Waste Management**, v. 43, p. 307–318, 2015.

EPA, US. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide**. United States Environmental Protection Agency, 2005.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2017, ano base 2016: capacidade instalada por região e UF no Brasil em 2016 (MW)**. 2017 a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf%3E>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Apresentação do programa RenovaBio**. 2017 b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-256/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS%20RENOVABIO_JOSE%20MAURO_2017_2909.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **O potencial do biogás : oportunidades e desafios**. 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/EPE_Jos%C3%A9%20Mauro_Potencial%20do%20Biog%C3%A1s_06jun.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020.

FABBRICINO, M. Evaluating operational vacuum for landfill biogas extraction. **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1393–1399, 2007.

FARQUHAR, G. J.; ROVERS, F. A. Gas production during refuse decomposition. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 2, n. 4, p. 483–495, 1973.

FEI, F.; WEN, Z.; DE CLERCQ, D. Spatio-temporal estimation of landfill gas energy potential: A case study in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 217–226, 2019.

FEI, X.; ZEKOS, D.; RASKIN, L. Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments. **Waste Management**, v. 55, n. SI, p. 276–287, 2016.

FEIZ, R. *et al.* Key performance indicators for biogas production—methodological insights on the life-cycle analysis of biogas production from source-separated food waste. **Energy**, v. 200, p. 117462, 2020.

FELIPE, I. *et al.* Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 587–600, 2018.

FENG, S. J.; ZHENG, Q. T. A two-dimensional gas flow model for layered municipal solid waste landfills. **Computers and Geotechnics**, v. 63, p. 135–145, 2015.

FENG, S. *et al.* Numerical modelling of methane oxidation efficiency and coupled

water-gas-heat reactive transfer in a sloping landfill cover. **Waste Management**, v. 68, p. 355–368, 2017.

FEO, Giovanni De; GISI, Sabino De. Using MCDA and GIS for hazardous waste landfill siting considering land scarcity for waste disposal. **Waste Management**, v. 34, n. 11, p. 2225–2238, 2014.

FILIPKOWSKA, U.; AGOPSOWICZ, M. H. Solids waste gas recovery under different water conditions. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 13, n. 6, p. 663–669, 2004.

FORSTER-CARNEIRO, T.; PEREZ, M.; ROMERO, L. I. Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 6763–6770, 2008.

FORTUIN, Leonard. Performance indicators - Why, where and how? **European Journal of Operational Research**, v. 34, n. 1, p. 1–9, 1988.

FRANK, R. R. *et al.* Evaluating leachate recirculation with cellulase addition to enhance waste biostabilisation and landfill gas production. **Waste Management**, v. 55, p. 61–70, 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GORSEVSKI, P.V. *et al.* Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection : A case study using ordered weighted average. **Waste Management**, v. 32, n. 2, p. 287–296, 2012.

GRANCHAROVA, A. *et al.* Quantitative evaluation of alternatives for municipal solid waste treatment in Bulgaria. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 39, n. 19, p. 189–194, 2006.

GRASSI, M C B; PEREIRA, G A G. Industrial Crops & Products Energy-cane and RenovaBio : Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops & Products**, v. 129, n. July 2018, p. 201–205, 2019.

GROŠELJ, P. *et al.* Comparison of some aggregation techniques using group analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**, v. 42, p. 2198–2204, 2015.

GUIQIN, W. *et al.* Landfill site selection using spatial information technologies and AHP : A case study in Beijing, China. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 8, p. 2414–2421, 2009.

GÜLER, D.; YOMRALIOĞLU, T. Alternative suitable landfill site selection using analytic hierarchy process and geographic information systems: a case study in Istanbul. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 20, 2017.

HALILU, A. *et al.* Resources , Conservation and Recycling Assessing environmental impacts of municipal solid waste of Johor by analytical hierarchy process.

Resources, Conservation and Recycling, v. 73, p. 188–196, 2013.

HASSON, F.; KEENEY, S.; MCKENNA, H. Research guidelines for the Delphi survey technique. **Journal of advanced nursing**, v. 32, n. 4, p. 1008–1015, 2000.

HERVA, M.; ROCA, E. Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis. **Ecological Indicators**, v. 25, p. 77–84, 2013.

HONDO, H.; MORIIZUMI, Y. Employment creation potential of renewable power generation technologies: A life cycle approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, , v. 79, p. 128–136, 2017.

HOO, P. Y.; HASHIM, H.; HO, W. S. Opportunities and challenges: Landfill gas to biomethane injection into natural gas distribution grid through pipeline. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, n. 2018, p. 409–419, 2018.

IEA, International Energy Agency. **Data and statistics**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy supply&indicator=Coal production by type>. Acesso em: 1 mar. 2020.

IGHRAVWE, D. E.; BABATUNDE, D. E. Evaluation of landfill gas plant siting problem: a multi-criteria approach. **Environmental health Engineering and Management Journal**, v. 6, n. 1, p. 1–10, 2019.

IMBIRIBA, B. C. de O. *et al.* Estimates of methane emissions and comparison with gas mass burned in CDM action in a large landfill in Eastern Amazon. **Waste Management**, , v. 101, p. 28–34, 2020.

IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories-Waste. **National Greenhouse Gas Inventories Programme**, v. 5, 2006.

JAHANGIRIAN, M. *et al.* Key performance indicators for successful simulation projects. **Journal of the Operational Research Society**, v. 68, n. 7, p. 747–765, 2017.

JAYASINGHE, P. A. *et al.* Effect of enzyme additions on methane production and lignin degradation of landfilled sample of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 7, p. 4633–4637, 2011.

JOSEPH, L. P.; PRASAD, R. Assessing the sustainable municipal solid waste (MSW) to electricity generation potentials in selected Pacific Small Island Developing States (PSIDS). **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119222, 2019.

JUNG, Y. *et al.* Mitigating methane emissions and air intrusion in heterogeneous landfills with a high permeability layer. **Waste Management**, v. 31, n. 5, p. 1049–1058, 2011.

KAMDAR, Ismail *et al.* Municipal solid waste landfill siting using an integrated GIS-AHP approach : A case study from Songkhla , Thailand. **Resources, Conservation**

& Recycling, v. 149, p. 220–235, 2019.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. Using the balanced scorecard as a strategic management system. **Harvard Business Review**, v. 74, n. 1, p. 75–85, 1996.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. The strategy map : guide to aligning intangible assets. **Strategy & leadership**, v. 32, n. 5, p. 10–17, 2004.

KARAGIANNIDIS, A.; PERKOULIDIS, G. A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 8, p. 2355–2360, 2009.

KHADEMALHOSEINY, M. S.; AHMADI NADOUSHAN, M.; RADNEZHAD, H. Site selection for landfill gas extraction plant by fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy analytic network process in the city of Najafabad, Iran. **Energy and Environment**, v. 28, n. 7, p. 763–774, 2017.

KHAN, I.; KABIR, Z. Waste-to-energy generation technologies and the developing economies : A multi-criteria analysis for sustainability assessment. **Renewable Energy**, v. 150, p. 320–333, 2020.

KHAN, M. M.U. H; VAEZI, M.; KUMAR, A. Science of the Total Environment Optimal siting of solid waste-to-value-added facilities through a GIS-based assessment. **Science of the Total Environment**, v. 611, p. 1065–1075, 2018.

KONDILI, E. *et al.* Multicriteria analysis of municipal solid wastes energy recovery technologies in Greece. **Global Nest Journal**, v. 14, n. 2, p. 225–234, 2012.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, , v. 69, p. 407–422, 2017.

KUTSYI, D. V. Numerical modeling of landfill gas and heat transport in the deformable MSW landfill body. Part 2. verification and application of the model. **Thermal Engineering**, v. 62, n. 7, p. 495–502, 2015.

KUWAHARA, N.; BERNI, M.; BAJAY, S. V. Energy supply from municipal wastes: The potential of biogas-fuelled buses in Brazil. **Renewable Energy**, v. 16, p. 1000–1003, 1999.

LEE, S. R. Long-term settlement behaviour of MSW landfills with various fill ages. **Waste management & research**, v. 20.n.3, p. 259–268, 2002.

LEE, U.; HAN, J.; WANG, M. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 335–342, 2017.

LEME, M. M. V *et al.* Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8–20, 2014.

- LEONZIO, G. Upgrading of biogas to bio-methane with chemical absorption process : simulation and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 364–375, 2016.
- LI, Y. C. *et al.* Gas pressure model for layered municipal solid waste landfills. **Journal of Environmental Engineering**, v. 138, n. 7, p. 752–760, 2012.
- LI, Y. *et al.* Current status of food waste generation and management in China. **Bioresource Technology**, v. 273, p. 654–665, 2020.
- LI, Y.; PARK, S. Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 821–826, 2011.
- LIMA, Rodolfo M. *et al.* Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. **Waste Management**, v. 74, p. 323–334, 2018.
- LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3496–3502, 2011.
- LISK, D. J. Environmental effects of landfills. **Science of the Total Environment**, v. 100, p. 415–468, 1991.
- LIU, L. *et al.* Leachate Recirculation for Enhancing Methane Generation within Field Site in China. **Journal of Chemistry**, 2018.
- LORNAGE, R. *et al.* Performance of a low cost MBT prior to landfilling: Study of the biological treatment of size reduced MSW without mechanical sorting. **Waste Management**, v. 27, n. 12, p. 1755–1764, 2007.
- LOUREIRO, S. M.; ROVERE, E. L. L.; MAHLER, C. F. Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil , in the state and city of Rio de Janeiro. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1302–1312, 2013.
- MACHADO, S. L. *et al.* Methane generation in tropical landfills : Simplified methods and field results. **Waste Management**, , v. 29, n. 1, p. 153–161, 2009.
- MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste Management journal**, v. 31, p. 966–977, 2011.
- MAJDINASAB, A.; YUAN, Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review. **Ecological Engineering**, , v. 104, p. 116–130, 2017.
- MALI, S. T.; KHARE, K. C.; BIRADAR, A. H. Bioresource Technology Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill. **Bioresource Technology**, , v. 110, p. 10–17, 2012.

MANLEY, B. J. W. Safe and effective gas recovery by means of a low-technology, integrated site design approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 4, n. 1–2, p. 105–120, 1990.

MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M.. **Metodologia Científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017 a.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do trabalho científico: projetos de pesquisa / pesquisa bibliográfica/ teses de doutorado, dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de curso**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017 b.

MATIAS-PERIRA, J. **Manual de metodologia da pesquisa científica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MATSUURA, M. I. S. F. *et al.* **RenovaCalc^{MD}**: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/2018/n10/CP10-2018_Nota-Tecnica-Renova-Calc.pdf>. Acesso em: 10 set. 2020

MAZZON, J. A. Using the methodological association matrix in marketing studies. **Brazilian Journal of Marketing**, v. 17, n. 5, p. 747–770, 2018.

MENDES, P. *et al.* The balanced scorecard as an integrated model applied to the Portuguese public service : a case study in the waste sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 24, p. 20–29, 2012.

MENIKPURA, S. N. M.; SANG-ARUN, J.; BENGTTSSON, M. Climate co-benefits of energy recovery from landfill gas in developing Asian cities : a case study in Bangkok. **Waste management & research**, v. 31, n.10, p. 1002-1011, 2013.

MILUTINOVIĆ, B. *et al.* Environmental assessment of waste management scenarios with energy recovery using life cycle assessment and multi-criteria analysis. **Energy**, v. 137, p. 917–926, 2017.

MILUTINOVIĆ, B *et al.* Multi-criteria analysis as a tool for sustainability assessment of a waste management model. **Energy**, v. 74, p. 190–201, 2014.

MINTAH, S. *et al.* Potential of microcredit as a source of finance for development of Sri Lankan biogas industry. **Energy and Environment**, v. 28,n. 5-6, p.608-620, 2017.

MME, Ministério de Minas e Energia. **RenovaBio**. 2020. Disponível em:<<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio>>. Acesso em: 20 fev.

2020.

MOEINADDINI, M.; KHORASANI, N.; DANEHKAR, A.. Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment (case study : Karaj). **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 912–920, 2010.

MOHSEN, R. A.; ABBASSI, B. Prediction of greenhouse gas emissions from Ontario's solid waste landfills using fuzzy logic based model. **Waste Management**, , v. 102, p. 743–750, 2020.

MOHSEN, R. A.; ABBASSI, B.; DUTTA, A. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Ontario's Solid Waste Landfills: Assessment of Improvement Scenarios. **Journal of Environmental Engineering**, v. 145, n. 8, 2019.

MOHSEN, R A; ABBASSI, B; DUTTA, A. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Ontario's Solid Waste Landfills: Assessment of Improvement Scenarios. **Journal of Environmental Engineering**, v. 145, n. 8, 2019.

MORABITO, R. *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MORAIS, P. De *et al.* Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. **Waste Management**, v. 78, p. 857–870, 2018.

MORI-CLEMENT, Yadira. Impacts of CDM projects on sustainable development : Improving living standards across Brazilian municipalities ? **World Development**, v. 113, p. 222–236, 2019.

MOURA, J. M.B.M.; GOHR PINHEIRO, I.; CARMO, J. L. Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes. **Waste Management**, v. 74, p. 98–109, 2018.

NADALETI, W. C. *et al.* Methane e hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport : Potential supply and environmental issues. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 17, p. 12615-12628, 2017.

NADALETTI, W. C. *et al.* Potential use of land fill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states : A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 41, p. 277-283, 2015.

NAG, M.; SHIMAOKA, T.; KOMIYA, T. Influence of operations on leachate characteristics in the Aerobic-Anaerobic Landfill Method. **Waste Management**, v. 78, p. 698–707, 2018.

NGNIKAM, E. *et al.* Case study of yaoundé (Cameroon). **Journal of Decision Systems**, v. 11, n. 3–4, p. 479–497, 2002.

NIXON, J. D. *et al.* Evaluation of options for energy recovery from municipal solid

waste in India using the hierarchical analytical network process. **Energy**, v. 59, p. 215–223, 2013.

NOOR, Z. Z. *et al.* An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 378–384, 2013.

NOZHEVNIKOVA, A. N. *et al.* Emission of methane into the atmosphere from landfills in the former USSR. **Chemosphere**, v. 26, n. 1–4, p. 401–417, 1993.

NWAOKORIE, K. J. *et al.* The influence of moisture enhancement on landfill gas generation in a full-scale landfill. **Waste Management**, v. 79, p. 647–657, 2018.

OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T. R.; ALAO, M. A. Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 149–162, 2017.

PANTINI, S. *et al.* Assessment of biogas production from MBT waste under different operating conditions. **Waste Management**, v. 43, p. 37–49, 2015.

PARMENTER, D. **Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

PARRA, D. *et al.* An integrated techno-economic and life cycle environmental assessment of power-to-gas systems. **Applied Energy**, v. 193, p. 440–454, 2017.

PASALARI, H; NABIZADEH, R. MethodsX Land fill site selection using a hybrid system of AHP-Fuzzy in GIS environment : A case study in Shiraz city , Iran. **MethodsX**, v. 6, p. 1454–1466, 2019.

PATIÑO, A. F. L **Eliminação do efluente líquido de aterros sanitários a partir de integração energética**. 2017.134 p. Dissertação(Mestrado em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

PENTEADO, R. *et al.* Application of the IPCC model to a Brazilian landfill : First results. **Energy Policy**, v. 42, p. 551–556, 2012.

PERRONI, M. G. *et al.* Analytical method for sustainability science benchmarking: An indicator decomposition approach. **Ecological Indicators**, v. 116, p. 106470, 2020.

PIN, B. V. R. *et al.* Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 19, p. 31–43, 2018.

PIÑAS, J. A. V. *et al.* Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: Comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de Populacao**, v. 33, n. 1, p. 175–188, 2016.

POMMIER, S. *et al.* A logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 97, n. 3, p. 473–482, 2007.

POPOOLA, S. I. *et al.* Data on the key performance indicators for quality of service of GSM networks in Nigeria. **Data in Brief**, v. 16, p. 914–928, 2018.

PORTELLA, M. O.; RIBEIRO, J. C. J. Landfills: general and final destination of waste. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 4, n. 1, p. 115–134, 2014.

PURMESSUR, B.; SURROOP, D. Power generation using landfill gas generated from new cell at the existing landfill site. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 3, p. 103060, 2019.

QAZI, W. A.; ABUSHAMMALA, M. F. M.; AZAM, M.H.. Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. **Waste Management & Research**, v. 36, n. 7, p. 594–605, 2018.

RAHIMI, S. *et al.* Sustainable landfill site selection for municipal solid waste based on a hybrid decision-making approach : Fuzzy group BWM-MULTIMOORA- GIS. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119186, 2020.

RAMOS, A. **Metodologia da pesquisa científica: como uma monografia pode abrir o horizonte do conhecimento**. São Paulo: Atlas, 2009.

RASAPOOR, M. *et al.* Enhancement of landfill gas generation from aged waste by a combination of moisture adjustment and application of biochar and neutral red additives: A field-scale study. **Fuel**, v. 283, 2021.

RASAPOOR, M. *et al.* Recognizing the challenges of anaerobic digestion : Critical steps toward improving biogas generation. **Fuel**, v. 261, p. 116497, 2020.

REDDY, K. R.; KUMAR, G.; GIRI, R. K. Modeling Coupled Processes in Municipal Solid Waste Landfills: An Overview with Key Engineering Challenges. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 3, n. 1, 2017.

REES, J. F. Optimisation of methane production and refuse decomposition in landfills by temperature control. **Journal of chemical technology and biotechnology**, v. 30, n. 8, p. 458–465, 1980.

REICHEL, T. *et al.* Modeling decomposition of MSW in a consolidating anaerobic reactor. **Environmental Engineering Science**, v. 24, n. 8, p. 1072–1083, 2007.

RENOVABIO. **Volume de CBios no mercado chega a 55% da meta colocada em consulta pública**. 2020. Disponível em: <https://www.renovabio.org/volume-de-cbios-no-mercado-chega-a-55-da-meta-colocada-em-consulta-publica/>. Acesso em: 10 set. 2020.

RIGO, Paula D *et al.* A model for measuring the success of distributed small-scale photovoltaic systems projects. **Solar Energy**, v. 205, n. January, p. 241–253, 2020.

RITCHIE, S.; MCBEAN, E. Assessment of operations and design strategy controls to improve landfill gas utilization opportunities. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 38, n. 5, p. 519–529, 2011.

RODRÍGUEZ-IGLESIAS, J. *et al.* Extraction wells and biogas recovery modeling in sanitary landfills. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 55, n. 2, p. 173–180, 2005.

ROSA, C. B. *et al.* Mathematical modeling for the measurement of the competitiveness index of Brazil south urban sectors for installation of photovoltaic systems. **Energy Policy**, v. 136, 2020.

ROSA PIN, B. V. *et al.* Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 19, p. 31–43, 2018.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1633–1645, 2011.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. 2. ed. Springer Science & Business Media, 2012.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3, p. 161–176, 1987

SAATY, T. L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234–281, 1977.

SAATY, T. L. How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, P. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19–43, 1994.

SALIHOGU, G. *et al.* Food loss and waste management in Turkey. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 88–99, 2018.

SALOMON, K. R.; EDUARDO, E.; LORA, S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009.

SANTOS, I. F. S. D. *et al.* Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 376–388, 2018.

SANTOS, R. E. D. *et al.* Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 198–206, 2019.

SCANDELAI, P. A. J. *et al.* Treatment of leachate from Maringá/PR landfill by combined processes of ozonization and supercritical water oxidation. **Brazilian Journal of Development Tratamento**, v. 5, n. 3, p. 2582–2587, 2019.

SEMAN, S. Z. A. *et al.* Optimizing purity and recovery of biogas methane enrichment process in a closed landfill. **Renewable Energy**, v. 131, p. 1117–1127, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.057>

SENER, S. *et al.* Combining AHP with GIS for landfill site selection: a case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). **Waste management**, v. 30, p. 2037–2046, 2010.

SHABBIR, R.; AHMAD, S. S. Water resource vulnerability assessment in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan using Analytic Hierarchy Process (AHP). **Journal of King Saud University - Science**, v. 28, n. 4, p. 293–299, 2016.

SILVA, T. R. *et al.* Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill. **Waste Management**, v. 65, p. 75–91, 2017.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, A. C. A. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. **Waste management**, v. 33, n.2, p. 420–430, 2013.

SOLTANI, A. *et al.* Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review. **Waste Management**, v. 35, p. 318–328, 2015.

SPOKAS, K.; BOGNER, J.; CHANTON, J. A process - based inventory model for landfill CH₄ emissions inclusive of seasonal soil microclimate and CH₄ oxidation. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 116, 2011.

STARR, K. *et al.* Explorative economic analysis of a novel biogas upgrading technology using carbon mineralization. A case study for Spain. **Energy**, v. 79, p. 298–309, 2015.

STEGE, C. A.; DAVILIA, J. L.. **User's Manual Colombia Landfill Gas Model Version 1.0**. U.S. Environmental Protection Agency. 2010. Disponível em: <<http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/UsersManualColombiaLFGModelEnglish.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2020.

STOKLASA, J.; KREJ, J. Aggregation in the analytic hierarchy process: Why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean. **Expert Systems With Applications**, v. 114, p. 97–106, 2018.

SUN, W. *et al.* Evaluation of optimal model parameters for prediction of methane generation from selected US landfills. **Waste Management**, v. 91, p. 120–127, 2019.

SWATI, M.; JOSEPH, K. Settlement analysis of fresh and partially stabilised

municipal solid waste in simulated controlled dumps and bioreactor landfills. **Waste Management**, v. 28, n. 8 p. 1355–1363, 2008.

TOZLU, A.; OZAHİ, E.; ABUSOĞLU, A. Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 809–815, 2016.

URBAN, R. C.; NAKADA, L. Y. K. COVID-19 pandemic: Solid waste and environmental impacts in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 755, p. 142471, 2021.

US EPA. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2017**. 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>>. Acesso em: 01 fev. 2020.

US EPA. **LFG Energy Project Development Handbook**. U.S. Environmental Protection Agency. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-07/documents/pdf_full.pdf>. Acesso em: 10 set. 2020.

VARGA, G. Some geotechnical aspects of bioreactor landfills. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 55, n. 1, p. 39–44, 2011.

VUJIĆ, G. *et al.* Influence of ambience temperature and operational-constructive parameters on landfill gas generation - Case study Novi Sad. **Thermal Science**, v. 14, n. 2, p. 555–564, 2010.

WANG, J. J. *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2263–2278, 2009.

WANG, X. *et al.* Characterization of uncertainty in estimation of methane collection from select U.S. landfills. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 3, p. 1545–1551, 2015.

WASSIE, Y. T.; ADARAMOLA, M. S. Potential environmental impacts of small-scale renewable energy technologies in East Africa: A systematic review of the evidence. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 377–391, 2019.

WEC, World Energy Council. **World Energy Resources**. 2016. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_SummaryReport_2016.10.03.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2020.

XU, Q. *et al.* Extracellular enzyme and microbial activity in MSW landfills with different gas collection and leachate management practices. **Chemosphere**, v. 250, 2020

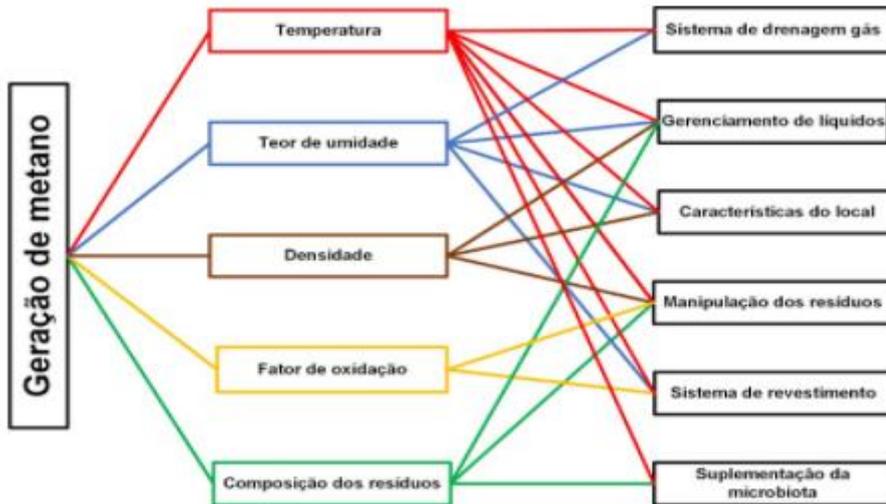
XU, Q.; QIN, J.; KO, J. H. Municipal solid waste landfill performance with different biogas collection practices : Biogas and leachate generations. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 446–454, 2019.

- YANG, Y. *et al.* Influence of semi-aerobic and anaerobic landfill operation with leachate recirculation on stabilization processes. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 3, p. 255–265, 2012.
- YAP, H. Y.; NIXON, J. D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**, v. 46, p. 265–277, 2015.
- YECHIEL, A; SHEVAH, Y. Optimization of energy generation using landfill biogas. **Journal of Energy Storage**, v. 7, p. 93–98, 2016.
- YU, Z. Landfill gas estimation and utilization ways analysis in Chongming municipal solid waste landfill. **Environmental and Sanitary Engineering**, v. 2, p. 20–24, 2014.
- YUAN, M. H.; CHIUEH, P. T.; LO, S.L. Understanding synergies and trade-offs between water and energy production at landfill sites. **Science of the Total Environment**, v. 687, p. 152–160, 2019.
- ZANARDO, Rafael Petri *et al.* Energy audit model based on a performance evaluation system. **Energy**, v. 154, p. 544–552, 2018.
- ZHANG, H.; HE, P.; SHAO, L. Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 22, p. 5579–5588, 2008.
- ZHANG, L. *et al.* Environmental and economic assessment of leachate concentrate treatment technologies using analytic hierarchy process. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 141, p. 474–480, 2019.
- ZHOU, Z. *et al.* Model development of sustainability assessment from a life cycle perspective : A case study on waste management systems in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1005–1014, 2019.
- ZUBERI, M. J. S.; ALI, S. F. Greenhouse effect reduction by recovering energy from waste landfills in Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 117–131, 2015.

APÊNDICE A – INSTRUMENTO DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO 1

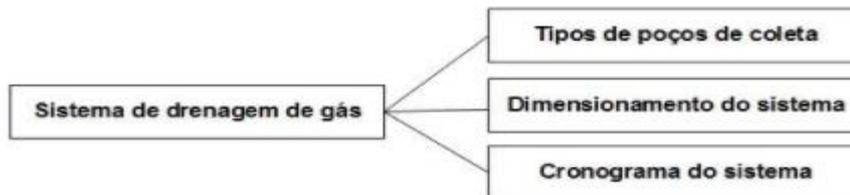
 
<h2>Instrumento de pesquisa para validação de fatores operacionais de aterros sanitários para geração de metano</h2> <p>A estudante de pós-graduação Ana Cristina Ruoso da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), integrante do Núcleo de Inovação e Competitividade (NIC), sob a orientação dos professores Macklini Dalla Nora e Julio Cezar Mairesse Siluk, gostaria de convidá-lo a participar de uma pesquisa de caráter científico intitulada "Modelo de diagnóstico para a geração de biogás em aterros sanitários".</p> <p>O presente instrumento de pesquisa tem o objetivo de validar os fatores operacionais que impactam na geração de metano em aterros sanitários, encontrados através de uma revisão sistemática da literatura.</p> <p>Assim, gostaria de contar com seu apoio, como especialista na área, para verificar se os fatores levantados são relevantes para a pesquisa e se são adequados, permitindo que na próxima etapa seja criado um questionário para ponderação dos mesmos. Então, para cada uma das alternativas descreva a sua opinião sobre os fatores apresentados e suas ligações.</p> <p>*Obrigatório</p>
Endereço de email *
<input type="text" value="O seu email"/>
Endereço de email *
<input type="text" value="O seu email"/>

A estrutura a seguir apresenta cinco fatores no primeiro nível que impactam no processo de biodegradação dos resíduos e estão conectados diretamente a geração de metano, esses fatores são influenciados operacionalmente pelo segundo nível de acordo com as interligações. Você possui sugestões?



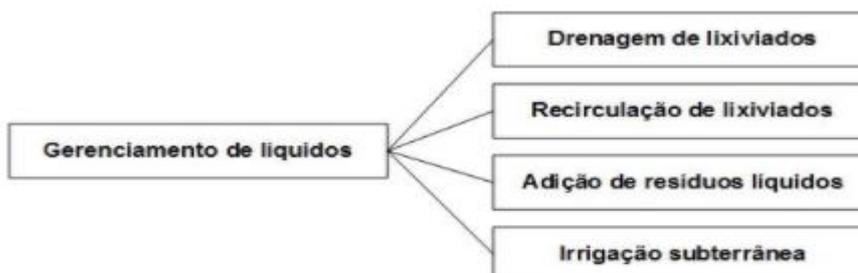
A sua resposta

Quanto ao fator "sistema de drenagem de gás" você possui sugestões? Alteraria, acrescentaria e/ou retiraria algum subfator?



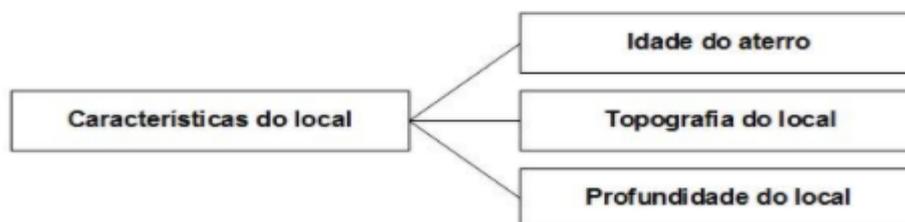
A sua resposta

Quanto ao fator "gerenciamento de líquidos" você possui sugestões? Alteraria, acrescentaria e/ou retiraria algum subfator?



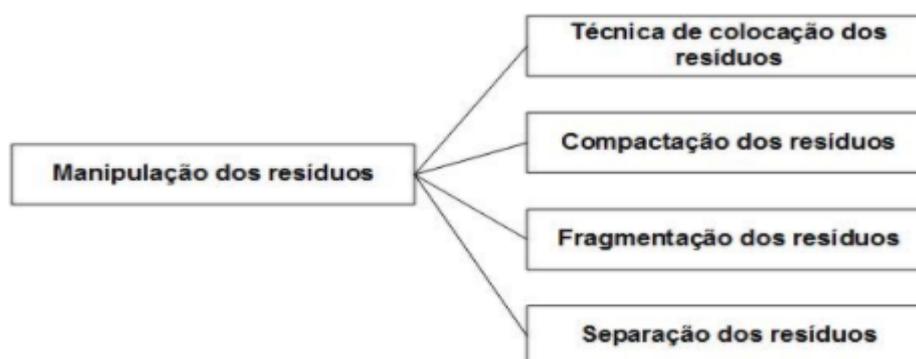
A sua resposta

Quanto ao fator "características do local" você possui sugestões? Alteraria, acrescentaria e/ou retiraria algum subfator?



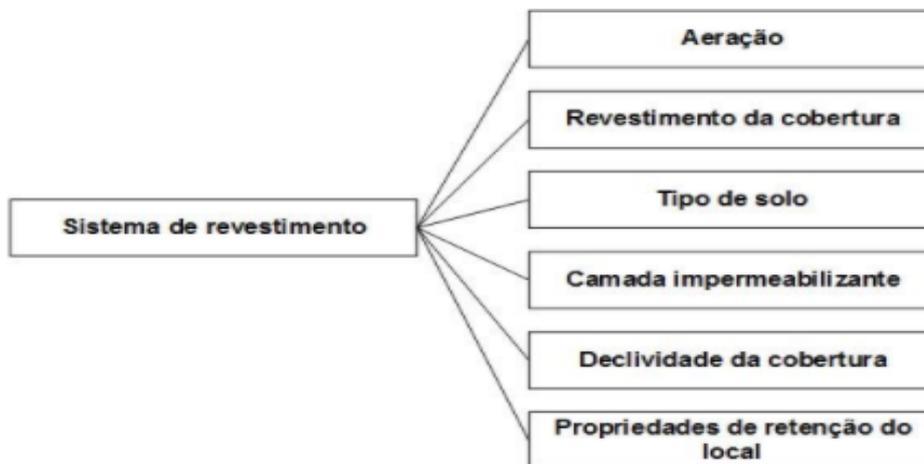
A sua resposta

Quanto ao fator "manipulação dos resíduos" você possui sugestões? Alteraria, acrescentaria e/ou retiraria algum subfator?



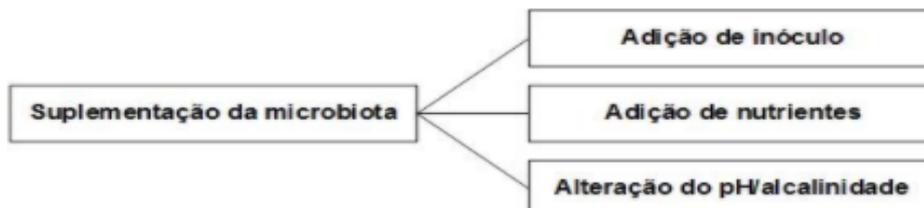
A sua resposta

Quanto ao fator "sistema de revestimento" você possui sugestões? Alteraria, acrescentaria e/ou retiraria algum subfator?



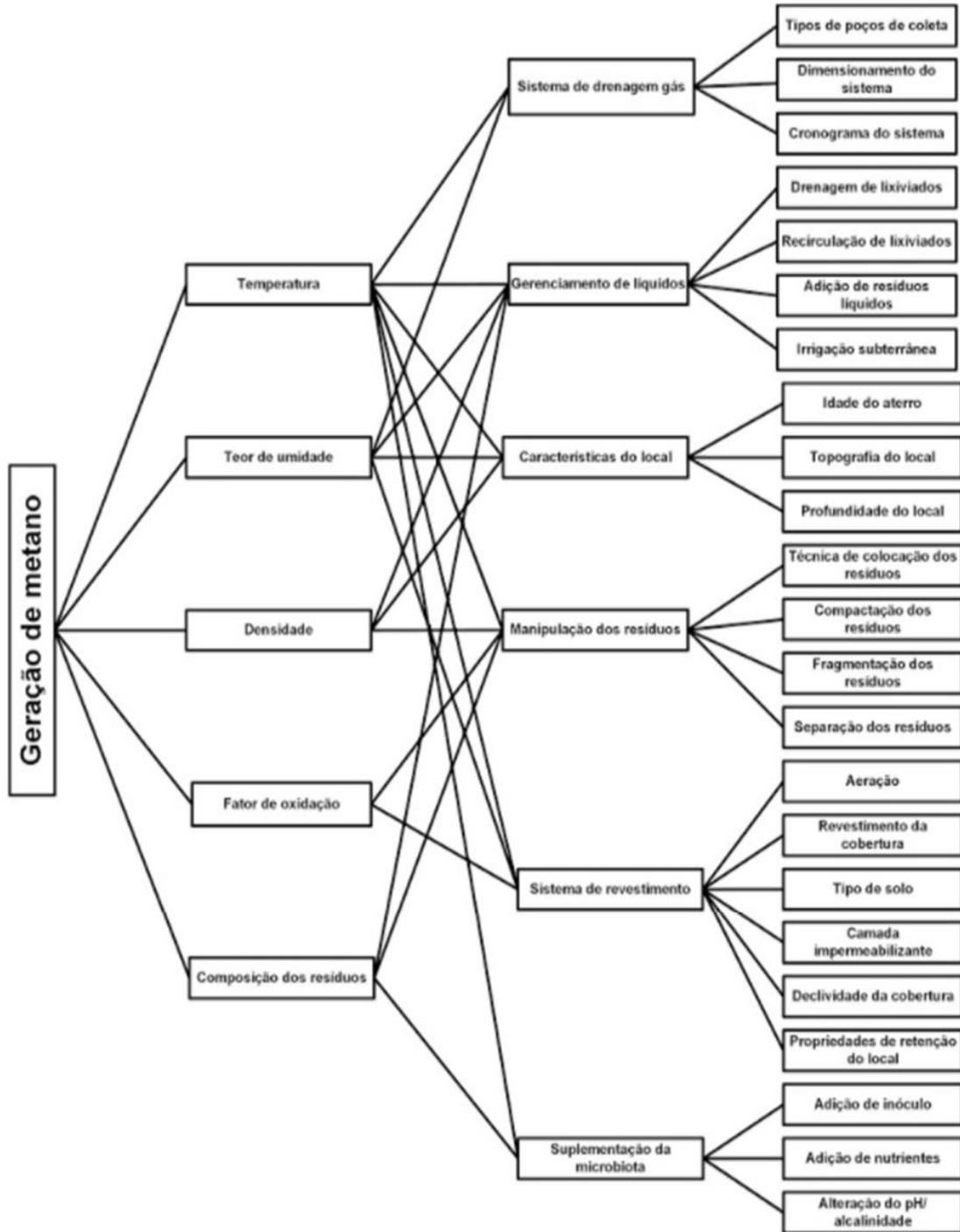
A sua resposta

Quanto ao fator "suplementação da microbiota" você possui sugestões? Alteraria, acrescentaria e/ou retiraria algum subfator?



A sua resposta

A estrutura completa é apresentada a seguir:



Quanto a estrutura apresentada, seus fatores e interligações, você gostaria de apresentar alguma sugestão que não foi descrita anteriormente?

A sua resposta

Por fim, considere a idade do aterro, essa estrutura mudaria em determinado período ou com seu fechamento?

A sua resposta

Submeter

Nunca envie palavras-passe através dos Google Forms.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pela Google. [Denunciar abuso](#) - [Termos de Utilização](#) - [Política de privacidade](#)

Google Formulários

APÊNDICE B – INSTRUMENTO DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO 2





2º INSTRUMENTO DE PESQUISA-Fatores operacionais de aterros sanitários: como melhorar a geração de metano?

A estudante de pós-graduação Ana Cristina Ruoso da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), integrante do Núcleo de Inovação e Competitividade (NIC), sob a orientação dos professores Macklini Dalla Nora e Julio Cezar Mairesse Siluk, gostaria de convidá-lo a participar de uma pesquisa de caráter científico intitulada "Modelo de diagnóstico para a geração de biogás em aterros sanitários".

Este instrumento de pesquisa é a segunda e última etapa de contato com os especialistas da pesquisa relacionada ao aprimoramento da geração de biogás em aterros sanitários. Se você respondeu a pesquisa anterior, a atual irá complementar as análises já realizadas. Posteriormente, será encaminhada a produção científica do trabalho.

O objetivo geral da pesquisa é construir uma modelagem para mensurar o impacto dos diversos fatores operacionais internos dos aterros sanitários na produção de biogás no Brasil com foco no aprimoramento da geração de metano.

Assim, gostaria de contar com seu apoio, como especialista na área, para ponderar o impacto dos fatores operacionais dos aterros sanitários na geração de metano e, conseqüentemente, gerar uma ordem de influência entre os mesmos. Vale salientar que os fatores abordados podem ser influenciados por procedimentos durante o projeto, instalação e operação do aterro, para uma simplificação foram denominados fatores operacionais. Então, para cada uma das alternativas, descreva seu julgamento sobre os fatores apresentados.

***Obrigatório**

Endereço de email *

O seu email

Você gostaria de receber os resultados dessa pesquisa e as conclusões obtidas dela?

Sim

Não

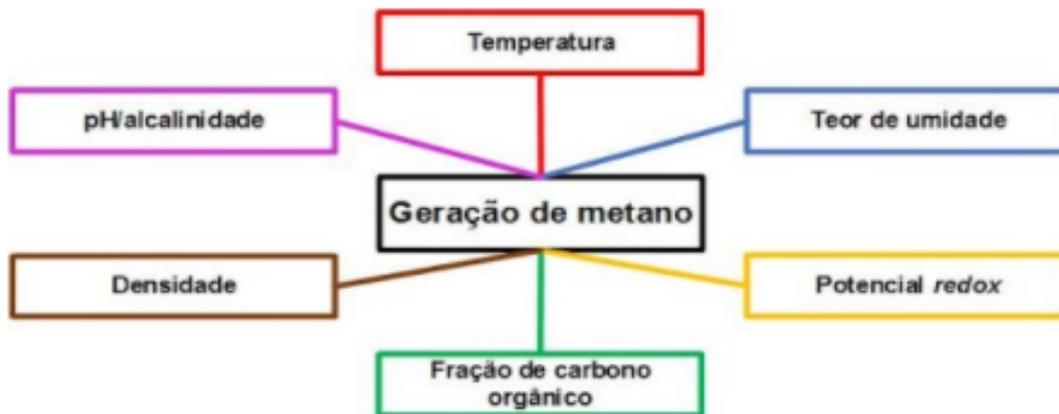
Qual a sua profissão?

A sua resposta

Em quais climas você possui experiência com geração de biogás?

A sua resposta

A figura a seguir apresenta que a geração de metano é influenciada diretamente por seis fatores que impactam no processo de biodegradação dos resíduos. Qual o impacto desses fatores na geração de metano?



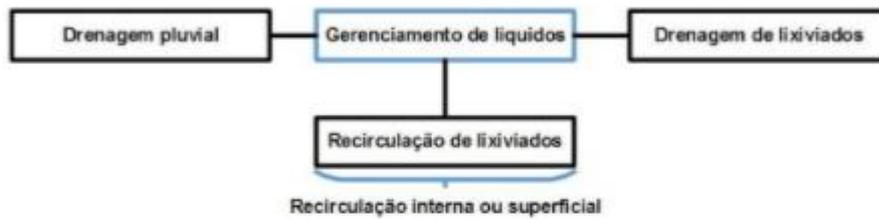
	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Temperatura	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teor de umidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Densidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Potencial <i>redox</i>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fração de carbono orgânico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
pH/alcalinidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Qual o impacto dos fatores relacionados ao sistema de drenagem de gás na geração de metano? Considere também o impacto na eficiência de captação do biogás.



	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Tipos de poços	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tipos de sistemas de coleta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Dimensionamento	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Qual o impacto dos fatores relacionados ao gerenciamento de líquidos na geração de metano? A recirculação de lixiviados superficial corresponde a distribuição do lixiviado na superfície da célula.



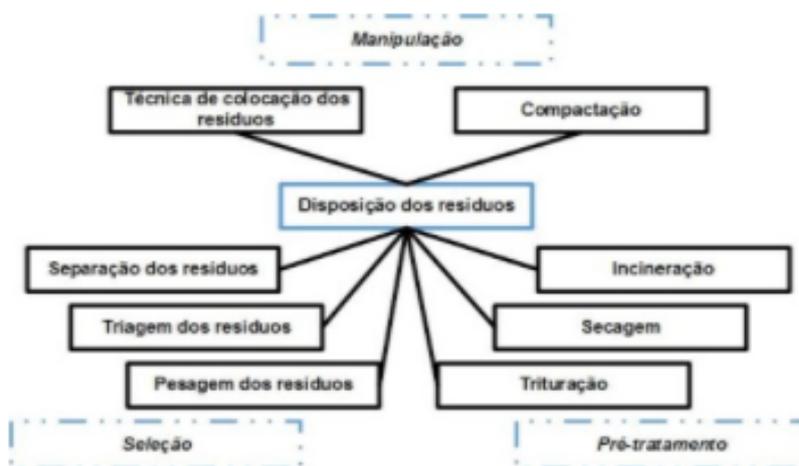
	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Recirculação de lixiviados	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Drenagem de lixiviados	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Drenagem pluvial	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Qual o impacto dos fatores relacionados às características do local na geração de metano?



	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Condições climáticas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Condições geográficas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Condições hidrológicas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tipo de solo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Composição do resíduo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Quantidade de resíduo recebido	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Profundidade do aterro	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Extensão do aterro	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vida útil do aterro	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Qual o impacto dos fatores relacionados à disposição dos resíduos na geração de metano?



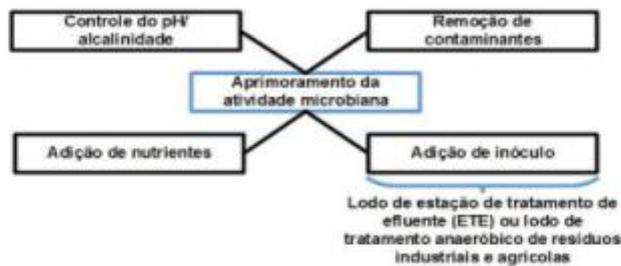
	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Trituração	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Secagem	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Incineração	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Triagem dos resíduos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Separação dos resíduos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Pesagem dos resíduos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Técnica de colocação dos resíduos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Compactação	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Qual o impacto dos fatores relacionados ao sistema de revestimento na geração de metano considerando a cobertura final, camadas intermediárias e diárias?



	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Recuperação de vegetação	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Características do solo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Impermeabilização	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Material utilizado	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Técnica utilizada	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Declividade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Frente operacional	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Qual o impacto dos fatores relacionados ao aprimoramento da atividade microbiana na geração de metano?



	Nenhum impacto	Impacto fraco	Impacto moderado	Impacto forte	Impacto muito forte
Adição de inóculo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Adição de nutrientes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Remoção de contaminantes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Controle do pH/alcalinidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Algum dos fatores apresentados impacta de forma negativa na geração de metano?

A sua resposta

Durante o envelhecimento do aterro sanitário as ponderações realizadas anteriormente mudariam? Quais os períodos e o respectivo impacto dos fatores?

A sua resposta

Com a alteração do clima as ponderações realizadas mudariam? Quais seriam os climas que mudariam o julgamento do impacto do fatores e suas respectivas ponderações?

A sua resposta

Você tem sugestões?

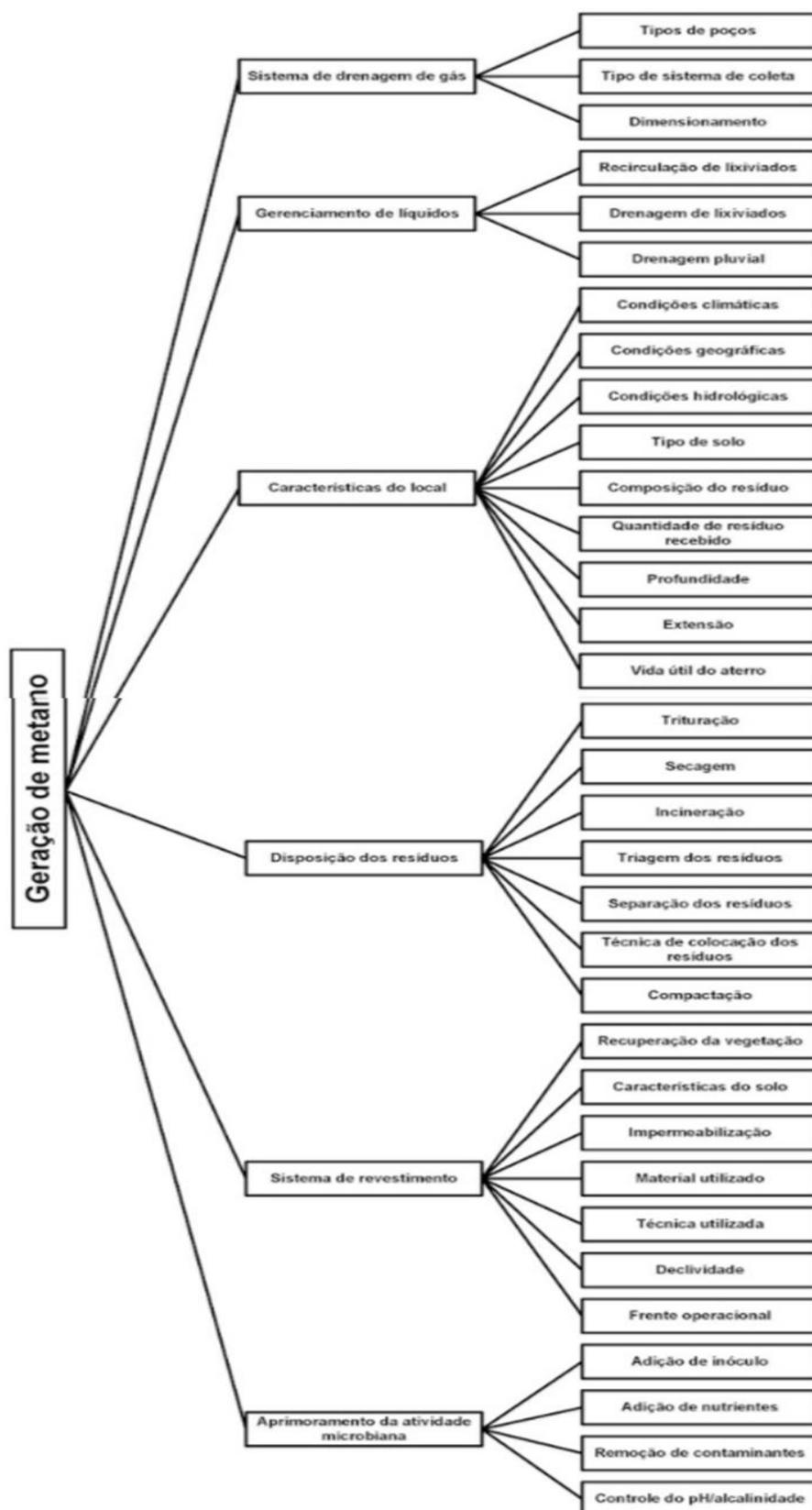
A sua resposta

Seguinte

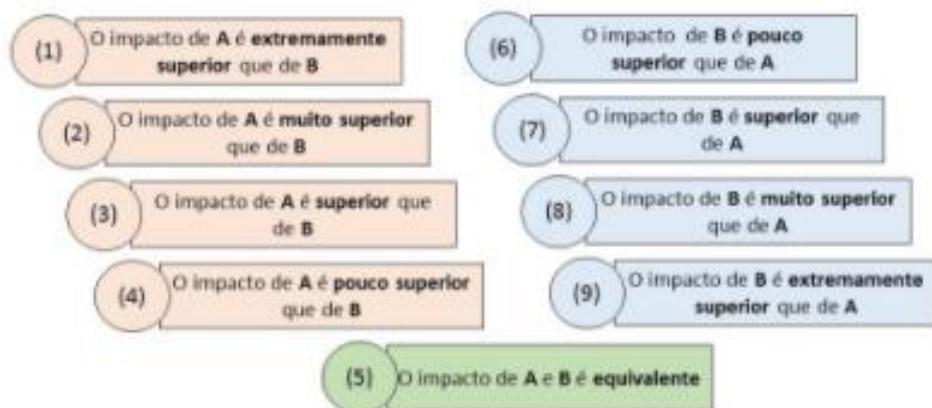
Nunca envie palavras-passe através dos Google Forms.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pela Google. [Denunciar abuso](#) - [Termos de Utilização](#) - [Política de privacidade](#)

A imagem a seguir representa os fatores operacionais, de instalação e projeto que impactam na geração de metano. Nessa etapa você irá julgar os fatores par a par de acordo com seu impacto na geração de metano.



A escala de avaliação do impacto dos fatores na geração de metano é de 1 a 9. A descrição a seguir apresenta a comparação entre dois fatores, A e B, para auxiliar a responder as questões.



Qual o impacto dos fatores SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS e GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS é extremamente superior que do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS.



O impacto do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS é extremamente superior que do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS.

Qual o impacto dos fatores SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS e CARACTERÍSTICAS DO LOCAL na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS é extremamente superior que das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL.



O impacto das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL é extremamente superior que do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS.

Qual o impacto dos fatores SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS e DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS é extremamente superior que da DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS.



O impacto da DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS é extremamente superior que do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS.

Qual o impacto dos fatores SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS e SISTEMA DE REVESTIMENTO na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS é extremamente superior que do SISTEMA DE REVESTIMENTO.



O impacto do SISTEMA DE REVESTIMENTO é extremamente superior que do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS.

Qual o impacto dos fatores SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS e APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS é extremamente superior que do APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA.



O impacto do APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA é extremamente superior que do SISTEMA DE DRENAGEM DE GÁS.

Qual o impacto dos fatores GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS e CARACTERÍSTICAS DO LOCAL na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS é extremamente superior que das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL.



O impacto das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL é extremamente superior que do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS.

Qual o impacto dos fatores GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS e DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS é extremamente superior que da DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS.



O impacto da DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS é extremamente superior que do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS.

Qual o impacto dos fatores GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS e SISTEMA DE REVESTIMENTO na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS é extremamente superior que do SISTEMA DE REVESTIMENTO.



O impacto do SISTEMA DE REVESTIMENTO é extremamente superior que do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS.

Qual o impacto dos fatores GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS e APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS é extremamente superior que do APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA.



O impacto do APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA é extremamente superior que do GERENCIAMENTO DE LÍQUIDOS.

Qual o impacto dos fatores CARACTERÍSTICAS DO LOCAL e DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL é extremamente superior que da DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS.



O impacto da DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS é extremamente superior que das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL.

Qual o impacto dos fatores CARACTERÍSTICAS DO LOCAL e SISTEMA DE REVESTIMENTO na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL é extremamente superior que do SISTEMA DE REVESTIMENTO.



O impacto do SISTEMA DE REVESTIMENTO é extremamente superior que das CARACTERÍSTICAS DO LOCAL.

Qual o impacto dos fatores **CARACTERÍSTICAS DO LOCAL** e **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA** na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto das **CARACTERÍSTICAS DO LOCAL** é extremamente superior que do **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA**.



O impacto do **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA** é extremamente superior que das **CARACTERÍSTICAS DO LOCAL**.

Qual o impacto dos fatores **DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS** e **SISTEMA DE REVESTIMENTO** na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto da **DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS** é extremamente superior que do **SISTEMA DE REVESTIMENTO**.



O impacto do **SISTEMA DE REVESTIMENTO** é extremamente superior que da **DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS**.

Qual o impacto dos fatores **DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS** e **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA** na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto da **DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS** é extremamente superior que do **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA**.



O impacto do **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA** é extremamente superior que da **DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS**.

Qual o impacto dos fatores **SISTEMA DE REVESTIMENTO** e **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA** na geração de metano? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

O impacto do **SISTEMA DE REVESTIMENTO** é extremamente superior que do **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA**.



O impacto do **APRIMORAMENTO DA ATIVIDADE MICROBIANA** é extremamente superior que do **SISTEMA DE REVESTIMENTO**.

Anterior

Submeter

Nunca envie palavras-passe através dos Google Forms.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pela Google. [Denunciar abuso](#) - [Termos de Utilização](#) - [Política de privacidade](#)

APÊNDICE C – INSTRUMENTO DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO 3



Qual o desempenho da sua empresa quanto a geração de biogás?

A estudante de pós-graduação Ana Cristina Ruoso da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), integrante do Núcleo de Inovação e Competitividade (NIC), sob a orientação dos professores Macklini Dalla Nora e Julio Cezar Mairesse Siluk, gostaria de convidá-lo a participar de uma pesquisa de caráter científico intitulada "Modelo de diagnóstico para a geração de biogás em aterros sanitários".

O objetivo desse instrumento de pesquisa é mensurar o desempenho da sua empresa quanto a geração de biogás, suas respostas auxiliarão no desenvolvimento de uma ferramenta que possibilite o diagnóstico do seu sistema com a visualização das possíveis práticas de melhoria. Esse objetivo específico compõe o objetivo geral de criar uma modelagem para mensurar o impacto dos diversos fatores operacionais internos dos aterros sanitários na produção de biogás no Brasil com foco no aprimoramento da geração de metano.

Salienta-se que a divulgação dos dados obtidos serão unicamente utilizados para fins acadêmicos.

***Obrigatório**

Endereço de email *

O seu email _____

Empresa que atua, cargo que ocupa e cidade: *

A sua resposta _____

Qual a quantidade de resíduo recebido e biogás gerado por ano? *

A sua resposta _____

Qual a eficiência do sistema de coleta de gás? *

- Menor que 35%
- Entre 35% e 50%
- Entre 50% e 60%
- Entre 60% e 80%
- Maior que 80%

Qual o percentual de ar infiltrado no sistema de coleta? *

- Maior que 10%
- Entre 8% e 10%
- Entre 5% e 8%
- Entre 3% e 5%
- Menor que 3%

Quão satisfeito você está com os tipos de poços de coleta utilizados no aterro? *

- Insatisfeito
- Pouco satisfeito
- Indiferente
- Satisfeito
- Muito satisfeito

Quão satisfeito você está com o dimensionamento do sistema de drenagem de gás? *

- Insatisfeito
- Pouco satisfeito
- Indiferente
- Satisfeito
- Muito satisfeito

Quão satisfeito você está com a frequência das manutenções realizadas no sistema de drenagem de gás? *

- Insatisfeito
- Pouco satisfeito
- Indiferente
- Satisfeito
- Muito satisfeito

Quão satisfeito está com o sistema de tratamento do gás sulfídrico (H₂S)? *

- Insatisfeito
- Pouco satisfeito
- Indiferente
- Satisfeito
- Muito satisfeito

Quanto a recirculação de lixiviados: *

- Não é realizada a recirculação de lixiviados, mas é necessário
- É realizada a recirculação superficial de lixiviados, na qual o lixiviado é distribuído na superfície, quando necessário
- É realizada a recirculação interna de lixiviados, quando necessário
- É realizada a recirculação interna e superficial de lixiviados em um sistema fechado, quando necessário
- Não é realizada e não é necessário

Quanto a drenagem de lixiviados: *

- Não é realizada a drenagem de lixiviados
- A drenagem de lixiviados é realizada e menos de 50% do lixiviado é drenado
- A drenagem de lixiviados é realizada e 50% do lixiviado é drenado
- A drenagem de lixiviados é realizada e até 75% do lixiviado drenado
- A drenagem de lixiviados é eficiente com quase 100% sendo drenado

Quanto a drenagem pluvial: *

- Não é realizada drenagem pluvial
- Existe drenagem pluvial, mas é pouco eficiente, ocorrendo grande infiltração de água na massa de resíduos
- Existe drenagem de pluvial, mas necessita melhorias, podem ser observadas poças de água na superfície do aterro
- Existe drenagem pluvial, podem ser observadas algumas rachaduras no aterro
- A drenagem pluvial é eficiente

Quão adequado o projeto, instalação e operação do aterro é em relação as condições climáticas (precipitação, temperatura e umidade do ar) de onde está localizado? *

- Inadequado
- Parcialmente inadequado
- Indiferente
- Parcialmente adequado
- Totalmente adequado

Quão adequado o projeto, instalação e operação do aterro são em relação as condições geográficas (topografia e pressão atmosférica) de onde está localizado? *

- Inadequado
- Parcialmente inadequado
- Indiferente
- Parcialmente adequado
- Totalmente adequado

Quão adequado o projeto, instalação e operação do aterro são em relação as condições hidrológicas de onde está localizado? *

- Inadequado
- Parcialmente inadequado
- Indiferente
- Parcialmente adequado
- Totalmente adequado

Quanto ao tipo de solo presente no local aterro em relação as práticas de impermeabilização: *

- Inadequado
- Parcialmente inadequado
- Indiferente
- Parcialmente adequado
- Totalmente adequado

Quanto a composição do resíduo recebido para a geração de biogás afim de recuperá-lo energeticamente: *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Qual o percentual de metano no biogás? *

- Menor que 40%
- Entre 40% e 50%
- Entre 50% e 60%
- Entre 60% e 70%
- Maior que 70%

Quanto a quantidade de resíduo recebido visando a geração de biogás para sua recuperação energética: *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quanto a profundidade do aterro e sua relação com a geração de biogás e drenagem de gás: *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quanto a extensão do aterro: *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quanto a vida útil do aterro: *

- Menor que 15 anos
- Entre 15 e 25 anos
- Entre 25 e 35 anos
- entre 35 e 45 anos
- Maior que 45 anos

Quão importante é o processo de trituração dos resíduos? *

- Não importante e não realizado
- Importante mas não realizado
- Não importante, porém realizado
- Importante mas realizado apenas para materiais específicos
- Importante e realizado para todos os resíduos

Caso o pré-tratamento secagem de resíduos ocorra, quão satisfeito você está visando a recuperação de biogás?

- Insatisfeito
- Pouco satisfeito
- Indiferente
- Satisfeito
- Muito satisfeito

Caso o pré-tratamento incineração de resíduos ocorra, quão satisfeito você está visando a recuperação de biogás?

- Insatisfeito
- Pouco satisfeito
- Indiferente
- Satisfeito
- Muito satisfeito

Quanto ao processo de triagem de resíduos: *

- Não importante e não realizada
- Importante e não realizada
- Não importante e realizada
- Importante mas realizada somente em um percentual de resíduos
- Importante e realizada para todos os resíduos que chegam no aterro

Quanto ao processo de separação de resíduos no aterro (considere a segregação das células com resíduos não orgânicos ou outras classes de resíduos, que poderiam impactar negativamente na geração de biogás): *

- Não importante e não realizada
- Importante e não realizada
- Não importante, porém realizada
- Importante mas realizada parcialmente
- Importante e realizada totalmente

Quanto a técnica de colocação de resíduos: *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quanto a compactação dos resíduos: *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quão importante é a recuperação da vegetação? *

- Não importante e não realizada
- Importante, porém não realizada
- Não importante e realizada
- Importante e realizada parcialmente
- Muito importante e realizada

Quanto as características do solo utilizado nas camadas diárias, intermediárias e finais: *

- Inadequado
- Parcialmente inadequado
- Indiferente
- Parcialmente adequado
- Totalmente adequado

Quão satisfeito está com a impermeabilização do aterro? *

- Insatisfeito
- Pouco satisfeito
- Indiferente
- Satisfeito
- Muito satisfeito

Quão adequados são os materiais utilizados nas camadas diárias, intermediárias e finais do aterro? *

- Inadequado
- Parcialmente inadequado
- Indiferente
- Parcialmente adequado
- Totalmente adequado

Quão adequadas são as técnicas utilizadas nas camadas diárias, intermediárias e finais do aterro? *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quão adequada é a declividade das camadas para o bom funcionamento do aterro? *

- Inadequada
- Parcialmente inadequada
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quão adequado é o tamanho da frente operacional para o bom funcionamento do aterro, conseqüentemente recuperação de biogás? *

- Inadequado
- Parcialmente inadequado
- Indiferente
- Parcialmente adequada
- Totalmente adequada

Quanto a adição de inóculo (lodo de estações de tratamento de efluente ou de estações de tratamento anaeróbico de resíduos agrícolas ou industriais) na massa de resíduos: *

- Não importante e não realizada
- Importante mas não realizada
- Não importante, porém realizada
- Importante mas pouco realizada
- Importante e realizada sempre que necessário

Quanto a adição de nutrientes na massa de resíduos: *

- Não importante e não realizada
- Importante e não realizada
- Não importante, porém realizada
- Importante mas pouco realizada
- Importante e realizada sempre que necessário

Quanto a remoção de contaminantes, agentes tóxicos e inibidores do processo biológico no aterro: *

- Não importante e não realizada
- Importante e não realizada
- Não importante, porém realizada
- Importante mas pouco realizada
- Importante e realizada sempre que necessário

Quanto ao controle interno de pH e alcalinidade: *

- Não importante e não realizado
- Importante e não realizado
- Não importante, porém realizado
- Importante mas pouco realizado
- Importante e realizada sempre que necessário

Você possui alguma informação que gostaria de compartilhar e não foi abordada neste instrumento?

A sua resposta

Submeter

Nunca envie palavras-passe através dos Google Forms.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pela Google. [Denunciar abuso](#) - [Termos de Utilização](#) - [Política de privacidade](#)