



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**UTILIZAÇÃO DE INDÚSTRIA 4.0 E IOT NO
MONITORAMENTO DE ATERROS
SANITÁRIOS PARA UMA GESTÃO MAIS
EFICIENTE**

Por,
Bianca Costa Araújo

Brasília, 21 de dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Produção

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**UTILIZAÇÃO DE INDÚSTRIA 4.0 E IOT NO
MONITORAMENTO DE ATERROS
SANITÁRIOS PARA UMA GESTÃO MAIS
EFICIENTE**

POR,

Bianca Costa Araújo

Projeto de Graduação apresentada ao corpo docente do Programa de Graduação em Engenharia Produção da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção. Orientador: Prof. Dr. Paulo Celso dos Reis Gomes

Brasília, 21 de dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

O encerramento desse ciclo é bastante significativo para mim e para todos que torceram e vibraram junto comigo essa conquista. Foram muitos obstáculos até chegar aqui, incluindo uma troca de curso e o início de uma jornada muito satisfatória na Engenharia de Produção. Por esse motivo, não poderia deixar de agradecer a todos que estiveram comigo nessa jornada.

Quero agradecer primeiramente a Deus, sem Ele nada disso seria possível. À minha família que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e me impulsionando a vencer essa etapa tão importante no âmbito profissional e pessoal, agradeço por acreditarem em mim. À minha mãe, Aline, sou grata por todos os ensinamentos, pelo cuidado, pelos esforços que sempre fez para que eu e meus irmãos pudéssemos ter uma boa educação e por todo o incentivo desde o início da minha jornada nos estudos.

Agradeço à minha irmã gêmea, Beatriz, parceira de vida desde sempre e, nesse momento incrível não poderia ser diferente, sempre me aconselhou, me confortou e me auxiliou com tudo que podia. Agradeço por todas as experiências compartilhadas e pela paciência comigo em todos os momentos de aflição.

À minha prima/irmã, Tainara, agradeço imensamente por todo o apoio prestado e pelos conselhos que me deu desde o início, sendo decisivos para que eu pudesse viver esse momento hoje. Suas palavras de conforto me impulsionaram a traçar e tomar decisões importantes nessa trajetória.

Ao meu noivo, Paulo, agradeço a compreensão e paciência nos dias em que meu foco estava totalmente voltado para os estudos, por estar ao meu lado nos momentos de incerteza e por celebrar comigo cada vitória.

Agradeço a todo o corpo docente da Faculdade de Tecnologia do curso de Engenharia de Produção que sempre se mostravam dispostos a nos ajudar e nos formar da melhor forma possível. Agradeço, em especial, ao meu orientador, Paulo Celso, que dispôs do seu tempo para me auxiliar e acompanhar durante essa etapa.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo elencar quais os principais parâmetros deverão ser avaliados para uma gestão de resíduos sólidos urbanos mais eficiente em aterros sanitários com o auxílio de conceitos advindos da quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Os resultados deverão ser analisados por meio de sensores e sistemas aliando tecnologias com os conceitos de Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem e Big Data e Analytics. O processo de gerenciamento e monitoramento dos principais indicadores no aterro sanitário de CGA BARU sanitário poderá ser otimizado, melhorado e analisado do ponto de vista de confiabilidade das operações.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro sanitário, Indústria 4.0, Resíduos sólidos urbanos e monitoramento.

ABSTRACT

The present work aims to list the main parameters that should be evaluated for more efficient management of urban solid waste in landfills with the help of concepts arising from the fourth industrial revolution, also known as Industry 4.0. The results must be analyzed using sensors and systems combining technologies with the concepts of Internet of Things (IoT), cloud computing and Big Data and Analytics. The process of managing and monitoring the main indicators at the CGA BARU sanitary landfill can be optimized, improved and analyzed from the point of view of operational reliability.

KEYWORDS: Sanitary landfills, Industry 4.0, urban solid waste and monitoring.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS GERAIS	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3 JUSTIFICATIVA	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
2.2 LEGISLAÇÃO SOBRE ATERROS DE RESÍDUOS NÃO PERIGOSOS	18
2.3 ATERRO SANITÁRIO	19
2.3.1 OPERAÇÃO DO ATERRO	23
2.3.2 SISTEMAS ESPECÍFICOS	25
2.4 INDÚSTRIA 4.0	29
2.4.1 TECNOLOGIAS QUE IMPULSIONAM A INDÚSTRIA 4.0	30
2.4.1.1 INTERNET DAS COISAS (IOT)	31
2.4.1.2 COMPUTAÇÃO EM NUVEM	31
2.4.1.3 BIG DATA E ANALYTICS	32
2.4.1.4 TECNOLOGIA RFID	32
2.4.1.5 SISTEMA GPS	34
2.4.1.6 SENSORIAMENTO REMOTO	34
2.4.1.7 SENSORES	34
2.4.1.8 REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF)	36
3. METODOLOGIA	38
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
3.2 PARÂMETROS	43
3.2.1 MONITORAMENTO AMBIENTAL E GEOTÉCNICO	43
3.2.2 DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS	49
3.2.3 DRENAGEM DE GASES E LIXIVIADOS	49
3.2.4 TRATAMENTO DOS LÍQUIDOS PERCOLADOS	51
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1 MONITORAMENTO DA ROTA	54
4.2 SISTEMAS DE PESAGEM	55
4.3 MONITORAMENTO GEOTÉCNICO E OPERACIONAL	59
4.4 MONITORAMENTO AMBIENTAL	61
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

1.1	Figura 1: Geração de RSU (%) em 2022 no Brasil.....	13
1.2	Figura 2: Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões (%) em 2022 ...	16
1.3	Figura 3: Cortes da seção de um aterro sanitário.....	21
1.4	Figura 4: Principais elementos de um aterro sanitário	22
1.5	Figura 5: Instalação de manta impermeabilizante em aterro sanitário	26
1.6	Figura 6: Sistema de drenagem pluvial em aterro sanitário.....	26
1.7	Figura 7: Sistema de drenagem de chorume em aterro sanitário	27
1.8	Figura 8: Formas de construção de drenos de gás em aterros sanitários.....	28
1.9	Figura 9: Esquema construtivo de piezômetros para monitoramento das águas subterrâneas.....	29
1.10	Figura 10: Esquema Básico do RFID.....	33
1.11	Figura 11: Arquitetura de um nó sensor	36
1.12	Figura 12: Nó sensor real modelo Mica 2	37
1.13	Figura 13: Rede de Sensores Sem Fio	37
1.14	Figura 14: Aterro de CGA Baru	39
1.15	Figura 15: Demarcação do aterro de CGA Baru.....	40
1.16	Figura 16: Etapas aterro de CGA Baru	40
1.17	Figura 17: Disposição dos espaços no aterro de CGA Baru	41
1.18	Figura 18: Divisão dos locais de operação no aterro	41
1.19	Figura 19: Esquema de operação de um aterro em rampa	42
1.20	Figura 20: Curvas Médias de Variação de Qualidade das Águas	44
1.21	Figura 21: Medidores de recalques.....	48
1.22	Figura 22: Esquema das movimentações dos medidores de recalques superficiais ..	48
1.23	Figura 23: Demonstração da disposição dos drenos horizontais e verticais.....	50
1.24	Figura 24: Drenos horizontais e verticais no aterro de CGA Baru	51
1.25	Figura 25: Sistema de drenagem e tratamento do líquido percolado.....	52
1.26	Figura 26: Rastreador veicular	55
1.27	Figura 27: Tipos de instalação	56
1.28	Figura 28: Dispositivos para automação de balança	57
1.29	Figura 29: Arquitetura Ilustrativa do Guardian	58
1.30	Figura 30: Arquitetura ilustrativa com Cloud Prix	58
1.31	Figura 31: Phantom 4 Advanced modelo quadricoptero	60
1.32	Figura 32: Diagrama de Blocos que representa o módulo de integração de sensores.....	63
1.33	Figura 33: Kit de sensores AtlasScientific ENV-SDS.....	64

LISTA DE TABELAS

1.1	Tabela 1: Disposição final de RSU no Brasil e regiões, por tipo de destinação (t/ano e %) em 2022.....	17
1.2	Tabela 2: Classificação do IQA.....	45
1.3	Tabela 3: Parâmetros e condicionantes.....	45
1.4	Tabela 4: Indicadores e especificações para o monitoramento	53
1.5	Tabela 5: Kit AtlasScientific ENV-SDS.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

- 1.1 Gráfico 1: Geração de RSU no Brasil e regiões - comparativo 2021 e 202214
- 1.2 Gráfico 2: Coleta de RSU no Brasil e regiões - comparativo 2021 e 202215
- 1.3 Gráfico 3: Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %) em 2022
17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ANA	Agência Nacional de Águas (ANA)
APP	Área de Proteção Permanente
CGA	Central de Gerenciamento Ambiental
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
GSM	System for Mobile Communications
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IoT	Internet das Coisas
IQA	Índice de Qualidade das Águas
NRs	Normas regulamentadoras
OCA	Órgão de Controle Ambiental
OD	Oxigênio Dissolvido
ORP	Potencial de redução de oxidação
PEAD	Polietileno de alta densidade
RFID	Sistema de Identificação por Radiofrequência
RNQA	Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade da Água
RS	Resíduos Sólidos
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RTLS	Real-Time Localization System
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
WIFI	Wireless Fidelity

1. INTRODUÇÃO

Em todos os segmentos do mercado a busca por aprimorar os processos e as operações têm aumentado consideravelmente. Houve uma crescente busca por utilização de tecnologias e dados em tempo real para otimização dos processos, diminuição dos custos e melhoria na tomada de decisão da gestão. Essa transformação tem sido possível através do desenvolvimento da Indústria 4.0 e dos recursos que ela possibilita.

A quarta revolução tem possibilitado às empresas um novo olhar sobre o conhecimento e informações geradas durante seus processos. Segundo Mota (2018), os modelos tecnológicos de produção inovadora, que vem sendo destaque nessa nova revolução industrial se conectam e associam por meio de sistemas virtuais e físicos que são articulados às plataformas e redes digitais com amplitude global, resultando em cadeias inovadoras, de alto valor e revolucionárias.

As organizações têm sido inseridas em um contexto em que as conexões acontecem de forma imediata entre máquina, ser humano e ambiente, onde as informações permutam em tempo real com todos os envolvidos na cadeia de produção. Isso acaba por permitir a geração de uma grande quantidade de dados, que serão processados em nuvem e que garantem a confiabilidade e segurança das informações.

Com tudo, esse processo tem direcionado a gestão das organizações para um novo nível de gerenciamento. Nesse ponto, a revolução industrial poderá complementar e transformar a gestão de resíduos sólidos urbanos realizada no aterro sanitário, CGA BARU.

A preocupação com a diminuição e mitigação dos impactos ambientais causados pela geração de resíduos tem sido crucial para nortear os caminhos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). O principal objetivo da associação é a extinção dos lixões e difusão do saneamento básico no Brasil. Para isso, são coletados diversos dados a fim de fomentar discussões e orientar investimentos necessários para desenvolvimento da gestão de resíduos sólidos.

De acordo com a ABRELPE (2022), durante todo o ano de 2022, o Brasil foi responsável pela geração de um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. Aproximadamente 50% da geração do país (111 mil toneladas diárias) é de responsabilidade da região Sudeste, enquanto a região Centro-Oeste

representa uma média de 450 kg/hab/ano, pouco mais de 7% do total gerado (Abrelpe, 2022).

Considerando os estudos sobre recursos naturais não renováveis, há uma preocupação muito grande sobre a forma de descarte irregular dos resíduos sólidos produzidos pela comunidade, indústrias, comércios e hospitais. O descarte inadequado desses resíduos pode favorecer diversos impactos na saúde da população. O aterro sanitário é visto como uma forma de solucionar o problema.

Porém, no que se diz respeito a operação de um aterro sanitário algumas considerações relacionadas ao gerenciamento e monitoramento devem ser levadas em conta. Esse processo requer uma série de controles de indicadores para manter a qualidade do serviço prestado. Na atualidade, esses controles são realizados de forma manual e/ou mecanizada o que demanda muito esforço das equipes e gera muito retrabalho.

O presente estudo tem como principal finalidade interligar as formas de gestão de um aterro sanitário hoje, com os conceitos trazidos da quarta revolução industrial. Ao final, pretende-se chegar a um modelo de monitoramento e controle muito mais eficiente e prático. Será adicionado a gestão de resíduos do aterro sanitário do CGA Baru sistemas e circuitos tecnológicos que possibilite a análise de parâmetros importantes, aumentando a produtividade do aterro, possibilitando melhorias nas operações e a construção de um banco de dados e de informações importantes para o gerenciamento eficiente do aterro. Além disso, será possível prever possíveis falhas e melhorias no processo.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

A motivação para a realização deste trabalho é descobrir formas de se fazer o monitoramento e a otimização da gestão de resíduos sólidos em um aterro sanitário por meio da utilização das tecnologias desenvolvidas pela indústria 4.0, incluindo Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem e análise de dados. A ideia é conseguir fazer a análise de dados por meio de sensores e sistemas avançados de maneira rápida para subsidiar a tomada de decisão e melhorar a gestão do aterro sanitário CGA BARU.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar os objetivos gerais relacionados no tópico anterior, o presente trabalho terá os seguintes objetivos específicos:

- Consolidar conhecimento, a partir do levantamento bibliográfico da literatura sobre: comportamento de um aterro sanitário, quais os parâmetros a serem analisados para melhorar a performance de um aterro, sensores capazes de medir esses parâmetros, como a indústria 4.0 pode otimizar a gestão de resíduos sólidos nos aterros sanitários;
- Definir quais parâmetros serão analisados ao longo do projeto;
- Determinar quais sensores e sistemas serão utilizados e de que forma serão utilizados;
- Estabelecer de que forma os dados serão analisados, periodicidade e forma de coleta.

1.3 JUSTIFICATIVA

Considerando que atualmente o mundo está cada vez mais conectado por meio das tecnologias e de ferramentas que nos permitem ter acesso a diversas informações de maneira instantânea, os segmentos do mercado têm buscado otimizar os seus processos por meio da indústria 4.0.

Houve a partir da primeira revolução industrial uma transição entre os métodos de produção artesanais para os métodos de produção mecanizados. Desde então, essas mudanças mudaram a vida das pessoas, assim como também a economia, com o aumento da produtividade. Essas transformações têm chegado também aos sistemas de gestão, sendo possível otimizar processos, diminuir custos e aumentar a produtividade apenas com a coleta de informações precisas e a análise de dados coletados em tempo real.

Segundo Bahrin et al. (2016), a fim de proporcionar eficiências de custo superiores e bens ou serviços de melhor qualidade, as máquinas usam a auto-otimização, autoconfiguração e até mesmo inteligência artificial para completar tarefas complexas. Desta forma, considerando a natureza do trabalho em um aterro sanitário, a presente pesquisa se torna importante no segmento para conseguir automatizar as atividades e fornecer dados mais precisos para melhoria do ambiente de operação e eficiência na gestão de resíduos sólidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil hoje é considerado um dos países que mais gera resíduos sólidos. Com uma população com mais de 200 milhões de habitantes a quantidade de resíduos produzidos de todos os tipos é bem alto. De acordo com o estudo realizado pelo Fundo Mundial para a Natureza (WWF) em 2019, o Brasil era o quarto país no mundo que mais produzia lixo. Ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia.

Conforme dados coletados junto a fontes primárias como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a Abelpre conclui em seu estudo que a geração de RSU no Brasil durante o ano de 2022 foi em torno aproximadamente de 81,8 milhões de toneladas (ABELPRE, 2022).

No ano de 2022, a região do Brasil que mais teve participação na geração de RSU (%) foi a região Sudeste com 49,7% e a que menos teve foi a região Centro-Oeste com 7,5%. Segue gráfico com a participação de cada uma das regiões em 2022 (ABELPRE, 2022).

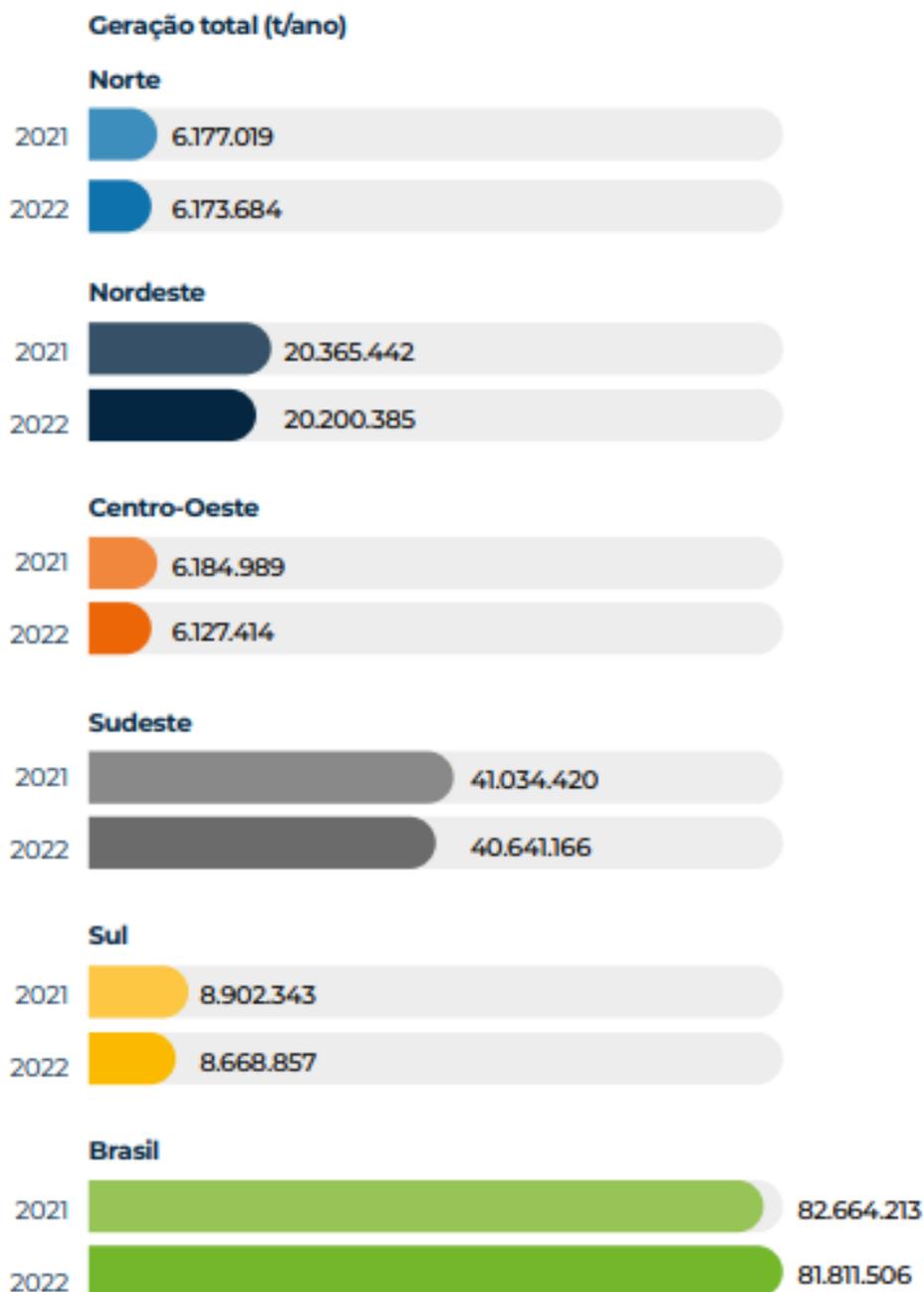
Figura 1: Geração de RSU (%) em 2022 no Brasil



Fonte: Panorama dos RSU - Portal Abelpre (2022).

Além disso, segue os dados que representam a geração de toneladas por ano de resíduos por região comparando o ano de 2021 e 2022.

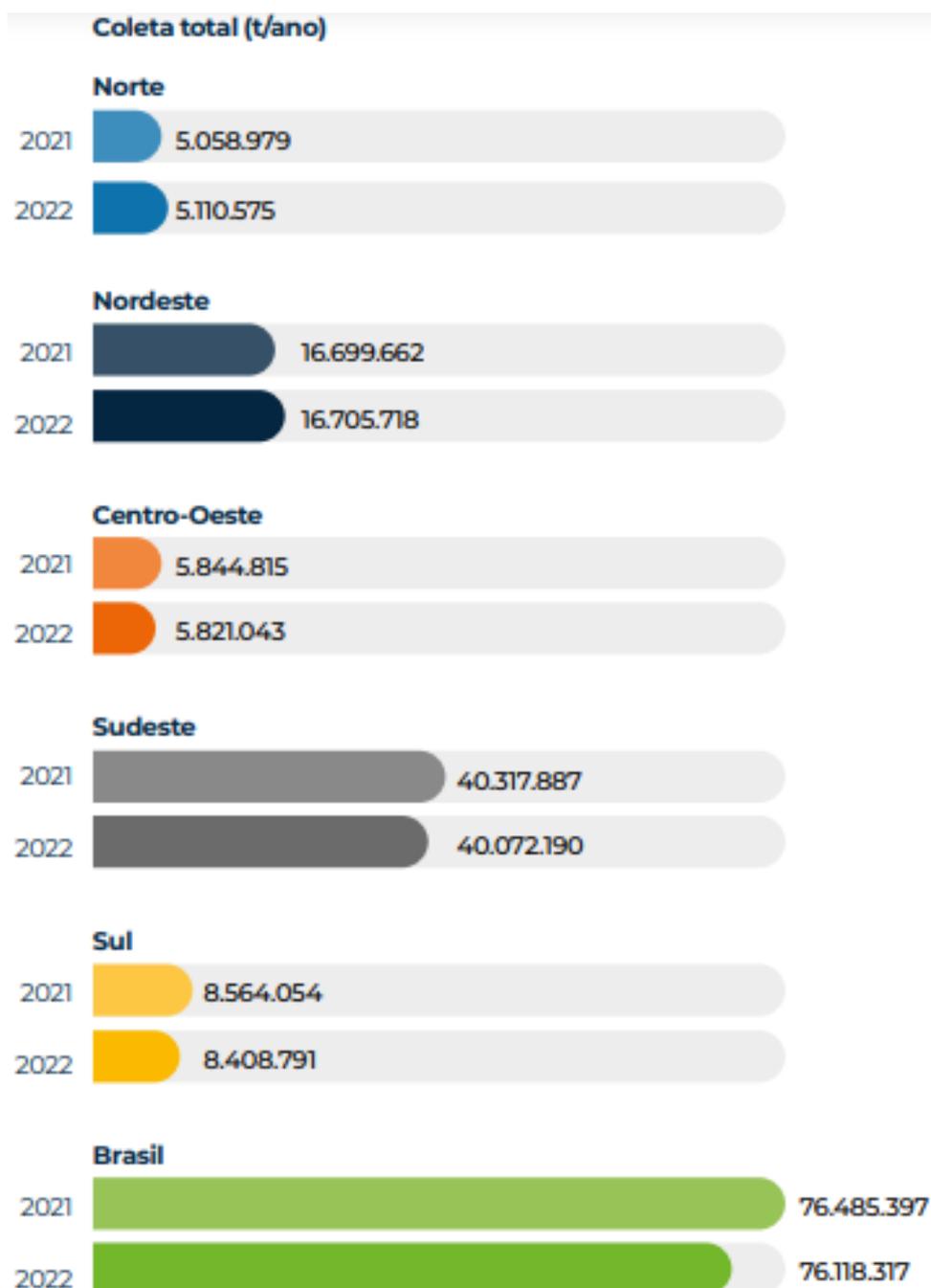
Gráfico 1: Geração de RSU no Brasil e regiões - comparativo 2021 e 2022



Fonte: Panorama dos RSU - Portal Abelpre (2022).

Em relação aos RSU coletados, se tem um total de aproximadamente de 76,1 milhões de toneladas coletadas em 2022, esse número representa uma coleta de 93%. Os serviços de coleta regular alcançam muito mais as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste que já alcançaram índice de cobertura superior à média nacional do que as regiões Norte e Nordeste que ainda apresentam índices de 83%.

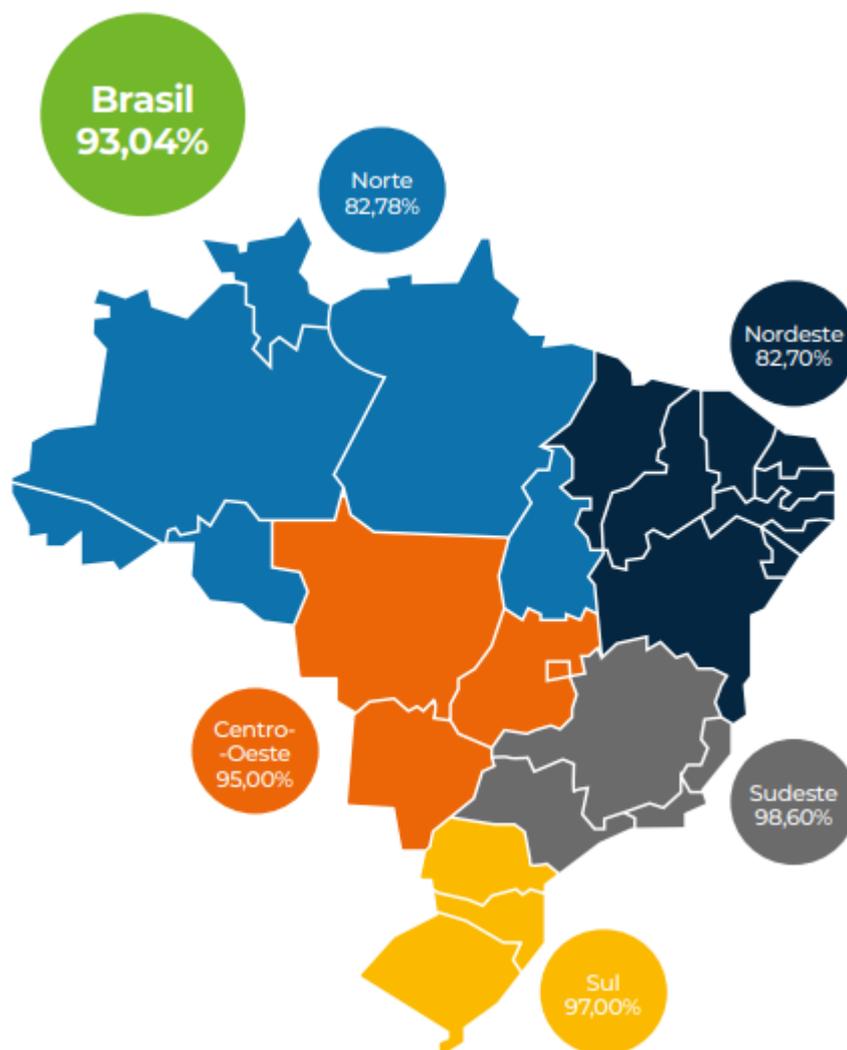
Gráfico 2: Coleta de RSU no Brasil e regiões - comparativo 2021 e 2022



Fonte: Panorama dos RSU - Portal Abelpre (2022).

A figura 2 representa os índices de cobertura de coleta por região, em porcentagem, mencionados anteriormente. A média do índice de cobertura nacional é 93,04%.

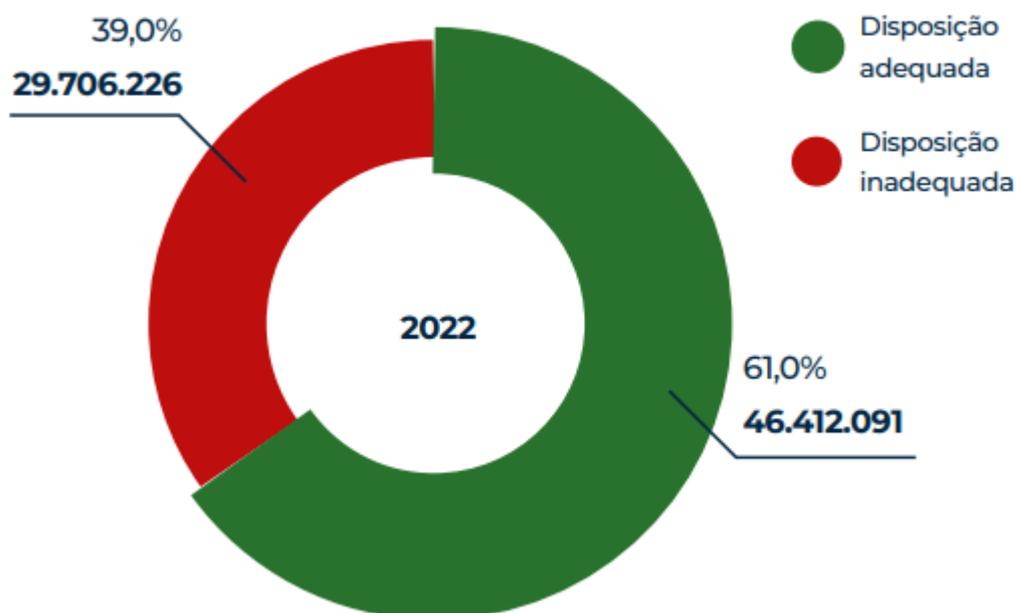
Figura 2: Índice de cobertura de coleta de RSU no Brasil e regiões (%) em 2022



Fonte: Panorama dos RSU - Portal Abelpre (2022).

De acordo com Abelpre (2022), são 46,4 milhões de toneladas coletadas adequadamente, a maior parte dos RSU coletados (61%) continua sendo encaminhada para aterros sanitários. É uma porcentagem que ainda precisa melhorar, considerando que a disposição inadequada tem prejuízos enormes para o meio ambiente e para a população no geral. Haja vista, 39% do total de resíduos coletados ainda segue com uma destinação inadequada, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas (ABELPRE, 2022). O Gráfico 3 evidencia os números e as porcentagens em relação a disposição final adequada versus disposição inadequada de RSU no Brasil em 2022.

Gráfico 3: Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %) em 2022



Fonte: Panorama dos RSU - Portal Abelpre (2022).

Tabela 1: Disposição final de RSU no Brasil e regiões, por tipo de destinação (t/ano e %) em 2022

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.870.470	36,6%	3.240.105	63,4%
Nordeste	6.214.527	37,2%	10.491.191	62,8%
Centro-Oeste	2.532.762	43,5%	3.288.281	56,5%
Sudeste	29.773.638	74,3%	10.298.552	25,7%
Sul	6.020.694	71,6%	2.388.097	28,4%
Brasil	46.412.091	61,0%	29.706.226	39,0%

Fonte: Panorama dos RSU - Portal Abelpre (2022).

A destinação final dos RSU coletados sempre foi motivo de preocupação, tendo visto que grande maioria da população ainda faz o descarte inadequado desses resíduos. Por esse motivo, o presente trabalho fomenta discussões interessantes, estimulando a melhoria na gestão e no monitoramento dos aterros sanitários, podendo assim ampliar a coleta de RSU de forma adequada. Assim, maiores serão as chances de encontrar indicadores suficientes para discutir sobre uma

melhoria nos sistemas de coleta no Brasil hoje.

Para todas as atividades profissionais é de extrema importância seguir os regulamentos e normas de segurança para propiciar um ambiente mais seguro e melhores condições ergonômicas. As atividades e operações dentro de um aterro sanitário ou de qualquer outro sistema que envolva a coleta de RSU deve seguir os regulamentos e procedimentos padrão relacionados à segurança conforme consta das normas regulamentadoras (NRs). Esse assunto será detalhado no tópico a seguir.

2.2 LEGISLAÇÃO SOBRE ATERROS DE RESÍDUOS NÃO PERIGOSOS

Para a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos é importante que se considere as normas de segurança que regem essas atividades, elas são responsáveis por ditar as condições mínimas exigidas nos aterros sanitários. As normas ABNT possibilitam que todos os envolvidos no processo possam ser instruídos e que sejam minimizados os acidentes e doenças relacionadas às atividades profissionais. A norma que regulamenta as atividades em um aterro sanitário é a NBR 13896/97.

A norma regulamentadora tem como objetivo proteger as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, fixando os parâmetros mínimos exigidos para implementação do projeto e operação em todos os aspectos do projeto de um aterro sanitário. Apesar de ter uma norma regulamentadora específica, na aplicação é relevante considerar também a NBR 8419 (Apresentação de projetos de aterros sanitários de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos)), NBR 10004 (Resíduos sólidos), NBR 10007 (Amostragem de resíduos), NBR 12988 (Líquidos livres) e a NBR 13895 (Construção de poços de monitoramento e amostragem).

Alguns dos critérios a serem observados quanto a implementação do projeto de um aterro sanitário são: Zoneamento, Proximidade da população, características da vegetação, profundidade do lençol freático, permeabilidade do solo, ventos predominantes, ruídos, mananciais de abastecimento, distância dos aeroportos, distância dos recursos hídricos, padrões de drenagem natural, características topográficas, capacidade de suporte (fundição), impacto visual, disponibilidade de solo, sistema viário, distância do centro de geração, situação do terreno, infraestrutura básica, proximidade de ETE e vida útil do aterro.

Os parâmetros mínimos exigidos de acordo com a NBR 13896/97 para a construção e implementação de um aterro, estão descritos abaixo:

- Declividade entre 1% e 30% (caso ultrapasse fica a critério do OCA (Órgão de controle ambiental));
- Desejável permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s em zona vadosa com espessura superior a 3m.
- Obrigatoriamente predominância inferior a 5×10^{-5} cm/s;
- 200 m de distância de corpos d'água (a critério do OCA);
- 500 m de distância de núcleos populacionais;
- Vida útil mínima de 10 anos;
- Proibidas áreas de inundações com recorrência de 100 anos ou superior;
- Distância vertical de 1,5 m ao lençol freático (época de maior precipitação).

Após dar a devida atenção aos aspectos legais é pertinente o aprofundamento sobre as operações e atividades que fazem parte do funcionamento de um aterro sanitário, tema do próximo tópico.

2.3 ATERRO SANITÁRIO

Hoje muito se fala em preservação, reciclagem, reuso, reutilização dos recursos, correto descarte de produtos e resíduos. É com a finalidade de colocar todas essas ações em prática que o projeto de um aterro se torna essencial e vira uma obra de engenharia sob critérios ambientais e técnicos. Sua finalidade principal é garantir a correta disposição de resíduos sólidos urbanos sem danos à sociedade e ao meio ambiente.

De acordo com a norma NBR 8419 (ABNT, 1992), aterro sanitário é:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário (ABNT, 1992).

Os aterros são projetados e construídos de diferentes formas, adquirindo características que os classificam conforme 4 tipos, aterro em vala, aterro em trincheira, aterro em encosta e aterro em área. De acordo com Fade (2014), eles são descritos conforme abaixo:

- 1) **Aterro em vala:** a operação ocorre de forma não mecanizada e a escavação com profundidade limitada e largura variável, confinada em

todos os lados;

- 2) **Aterro em trincheira:** não há limitação de profundidade e largura na escavação e se caracteriza por confinamento em três lados com operação mecanizada;
- 3) **Aterro em encosta:** este tipo é usualmente construído em áreas de ondulações ou depressões naturais, encostas de morros ou pedreiras e áreas de mineração desativadas, se caracteriza pelo uso de taludes pré-existentes;
- 4) **Aterro em área:** se caracteriza pela implantação em áreas planas acima da cota do terreno natural.

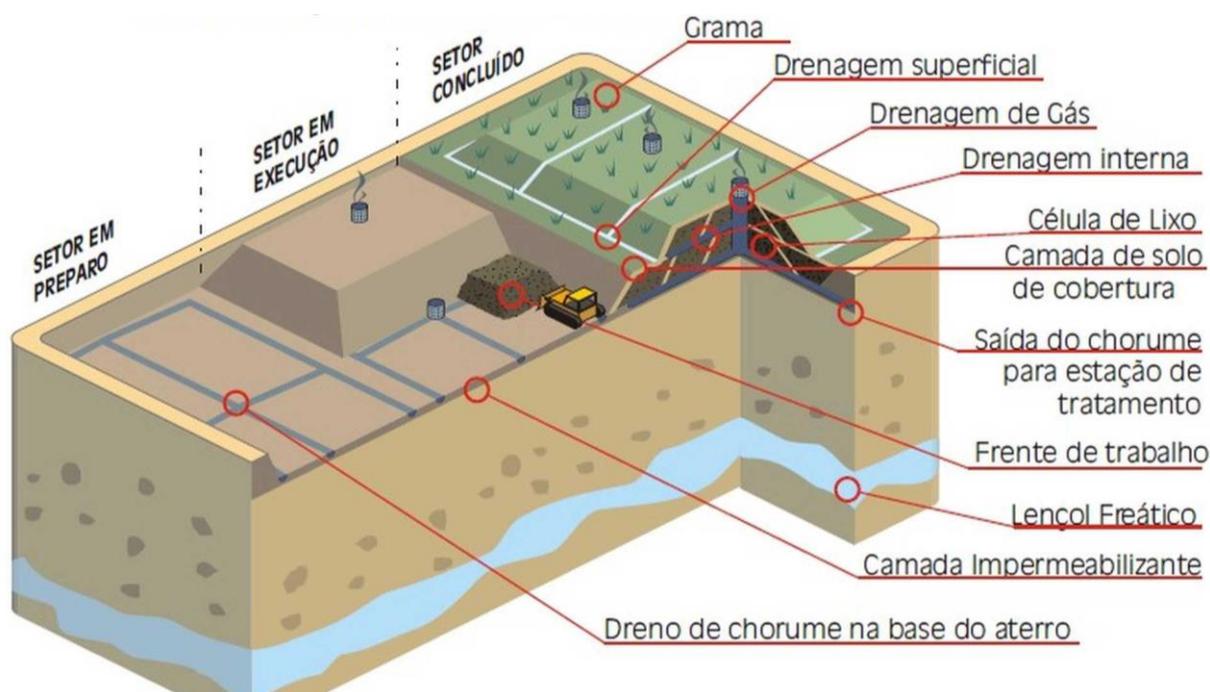
As atividades desenvolvidas e acompanhadas na operação dos aterros sanitários são rotineiras e devem passar por fiscalização frequente. Deve ocorrer verificações e elaboração de registro de cada uma das etapas operacionais. Manter cada movimento documentado poderá evidenciar ocorrências anormais e possíveis dificuldades operacionais mantendo assim bons hábitos de melhoria contínua e minimização de impactos ambientais.

As operações e atividades em um aterro orientam-se a partir da compactação dos resíduos sólidos produzidos pelos moradores (resíduos domésticos), resíduos produzidos pelas indústrias, pelos comércios, canteiros de obras e rejeitos retirados do esgoto. Os resíduos presentes nos aterros são de grande maioria formados por materiais não recicláveis.

Para o correto funcionamento de um aterro este deve conter uma base constituída por um sistema de drenagem de chorume; embaixo dessa base deve conter uma camada impermeável de polietileno de alta densidade (PEAD), em cima de uma camada de solo compactado, isso evita que haja vazamentos de líquidos para o solo; no interior do aterro sanitário tem um sistema de drenagem de gases que possibilita a coleta de biogás até a atmosfera; o aterro é constituído por um sistema de drenagem de águas pluviais que protege de infiltrações de água da chuva e os resíduos são cobertos por camadas de argila.

Os componentes de um aterro sanitário podem ser vistos na Fig. (3):

Figura 3: Cortes da seção de um aterro sanitário

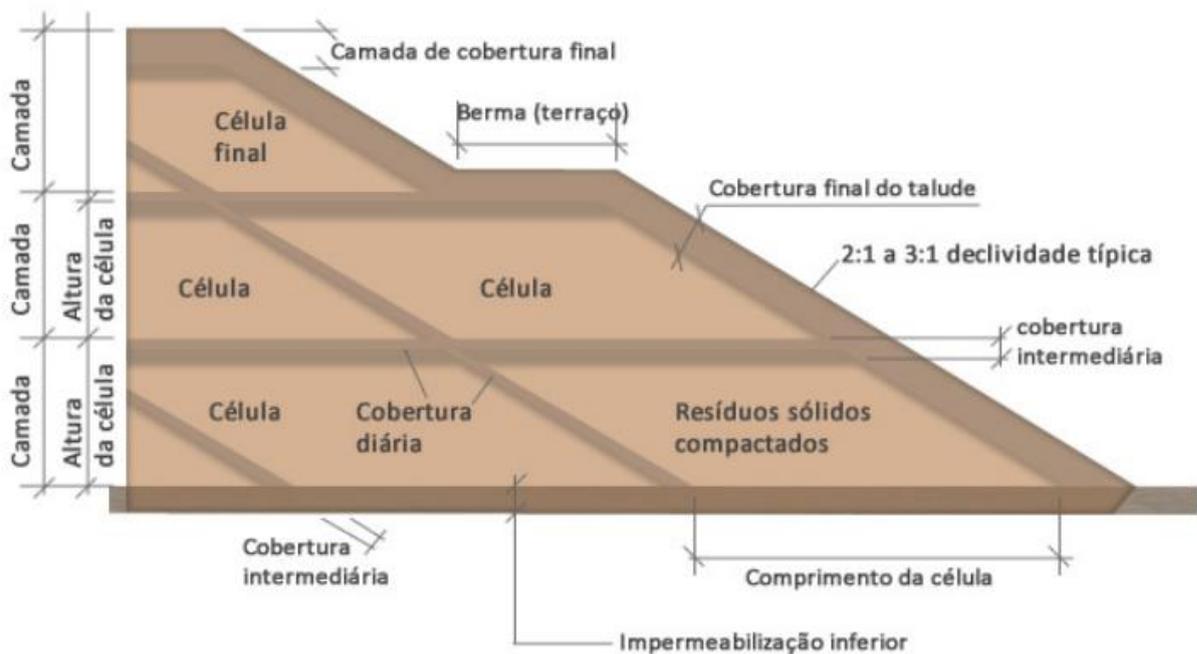


Fonte: Portal Resíduos Sólidos (2021).

Como forma de simplificar o estudo são elencados cada uma das estruturas e elementos que compõem um aterro sanitário (SA, 2012). Para Sa (2012), as estruturas e elementos constituintes de um aterro sanitário são definidas conforme abaixo:

- **Aterramento** – esse processo diz respeito ao método utilizado para colocar os resíduos sólidos (RS) no aterro sanitário. Além disso, inclui a instalação de sistemas de monitoramento ambiental e de sistemas de controle, disposição e a compactação dos resíduos e o monitoramento dos resíduos que entram no aterro.
- **Célula** – é a maneira de se referir ao volume de material colocado no aterro durante um determinado período de operação, geralmente um dia (Figura 4). Cada célula inclui o material de cobertura diária que encobre os resíduos e os resíduos depositados. Uma camada de resíduos do aterro é uma sequência de células numa mesma altura do aterro.

Figura 4: Principais elementos de um aterro sanitário



Fonte: Material didático “Disposição final de resíduos” (2012).

- **Cobertura diária** – é a disposição de solo local ou outro material alternativo como composto ou entulhos de construção, formando uma camada de 15 a 30 cm, colocados sobre as frentes de trabalho ao final de cada jornada de trabalho.
- **Patamares (ou terraços)** – toda vez que a altura do aterro exceder 15 a 20 m é preparado uma camada de patamar/terraços. Essa camada serve para manter a estabilidade dos taludes do aterro, para a colocação de drenagem de águas pluviais, para a colocação de redes de drenos de biogás, e para o trânsito de veículos e máquinas na manutenção futura dos taludes.
- **Camada de cobertura final** – quando as operações do aterro estão completadas é colocada a camada de cobertura final. Esta camada normalmente é colocada em várias camadas de solo e/ou geomembrana projetadas para diminuir a infiltração de água da chuva no aterro, dar suporte a revegetação, controlar a emissão de gases, e melhorar a drenagem superficial.
- **Encerramento do aterro** – quando o aterro atinge o volume máximo ele sofre o encerramento, termo utilizado para descrever os passos que devem ser dados para encerrar em segurança um aterro. O pós-encerramento deve adotar certos cuidados que envolvem as atividades de monitoramento

e manutenção de longo prazo do aterro após o seu encerramento (usualmente 30 a 50 anos).

2.3.1 OPERAÇÃO DO ATERRO

A sistemática dentro do aterro inicia com o recebimento da carga de resíduos. O acesso deve ser restrito aos veículos e pessoas cadastradas, além de cautela em permitir apenas resíduos autorizados para o tipo de aterro. Isso torna o processo de controle e registro de pessoas e resíduos, ponto primordial no monitoramento. O controle de acesso é realizado através da portaria ou guarita, esse ambiente deve ser equipado de dispositivos de segurança e deve estar localizado em uma área com visão privilegiada de todo o aterro e entorno. Ainda na etapa de recebimento é efetuado a pesagem dos resíduos através de uma balança rodoviária, possibilitando assim controles em relação aos volumes diários e mensais de resíduos recebidos.

Após o ingresso dos RS é realizada a disposição dos resíduos em locais adequados de acordo com o projeto, sempre iniciando no fundo da célula. Esta deve estar preparada e impermeabilizada com camadas de materiais inertes compactados e com os sistemas de drenagem de percolados e gases instalados. A descarga dos resíduos deve ser acompanhada de um controle de verificação do tipo de resíduo e se esse se adequa corretamente aos requisitos necessários.

A cada início de etapa de disposição deve ser previamente delimitado os limites laterais, a altura projetada e o avanço previsto da frente de operação, essa demarcação na maioria das vezes é realizada por meio de estacas. Esse traçado permite uma melhor manipulação do lixo, tornando o processo mais prático.

A depender dos períodos em que ocorre a disposição dos resíduos, caso seja um período de chuvas intensas ou por algum motivo haja impossibilidade de seguir o fluxo ideal, é importante que se adote o procedimento de separar uma área para descarga emergencial, previamente preparada que respeite os parâmetros do projeto.

O caminhão inicia o processo de deposição dos resíduos a jusante da frente de operação já demarcada previamente. A pilha distribuída deve ser espalhada e compactada com o auxílio de um trator de esteira.

A compactação de resíduos dependerá de diversos fatores, dentre eles: tipo, peso e número de passadas do equipamento compactador; a espessura da camada de resíduos; sentido de compactação; inclinação da rampa de

compactação; umidade e composição dos resíduos sólidos (BOSCOV & ABREU, 2000; SAVAGE et al., 1998; e CATERPILLAR, 2001).

O objetivo da compactação em aterros é promover uma maior estabilidade e uma redução volumétrica dos resíduos depositados ao longo do tempo. Conforme novas camadas vão sendo acrescentadas essa redução volumétrica vai sendo acentuada, o processo de decomposição da matéria orgânica presente também é um importante fator para diminuir esse volume.

Algumas das vantagens observadas por esse método é o fato de aumentar a vida útil dos aterros sanitários, diminuição da vazão de líquidos lixiviados, redução da migração descontrolada de gases e líquidos lixiviados, aumento da estabilidade do maciço de resíduos, melhorias no aspecto estético da massa de resíduos aterrada e a possibilidade de tráfego imediato de veículos sobre o maciço (CATAPRETA, 2008).

Os parâmetros que influenciam de maneira substancial no bom funcionamento de um aterro sanitário estão relacionados aos tipos de equipamentos compactadores empregados, número de passadas do equipamento compactador, inclinação das rampas de aterragem, densidade final e a espessura da camada de resíduos e monitoramento do líquido efluente (chorume).

No processo de espalhamento é fundamental que ocorra uma boa compactação dos resíduos dispostos, esse processo considera movimentos repetidos de baixo para cima, normalmente de 3 a 5 vezes, e um índice de inclinação especificado como ideal, podendo assumir valores como 1:2 ou 1:3 (V:H). Para uma maior eficiência na compactação é recomendado que a espessura da camada de resíduos seja menor que 0,60 m.

Por consequência, há formação das chamadas células. Pode-se denominar assim, os resíduos e o material de cobertura. São dispostas várias células que se sobrepõe formando camadas ou patamar até atingir a altura final especificada em projeto, podendo variar de 2 a 5 m.

Outro importante processo são as coberturas dos resíduos. Ocorrem diariamente antes do esgotamento do aterro e quando há o esgotamento é realizada a cobertura final.

A cobertura diária é composta por material inerte (terra, entulho etc.) com espessura aproximada de 15 a 20 cm. Seu objetivo é dificultar o arraste de material pela ação do vento ou da chuva e a disseminação de odores desagradáveis e proliferação de vetores, como moscas, ratos, baratas e aves.

Para que a cobertura diária e final possa ser considerada vantajosa é indispensável que se tenha área de terreno próxima com a mesma gleba do

aterro propiciando sua retirada e conseqüentemente diminuição de custos com transporte de material por longas distâncias e maquinário para extração.

Após o esgotamento total da capacidade do aterro é realizada a cobertura final, ela inicia com a aplicação de uma camada de argila compactada com normalmente 60 cm de espessura, podendo variar de acordo com as especificações de cada projeto e tipo de aterro. Posteriormente, é feito o plantio de vegetação gramínea nas superfícies dos taludes e platôs reduzindo os riscos de erosão e possibilitando uso futuro da área coberta.

2.3.2 SISTEMAS ESPECÍFICOS

Para um bom funcionamento do aterro, este deve conter alguns sistemas específicos capazes de auxiliar na manutenção das atividades, no monitoramento diário e no comportamento do aterro.

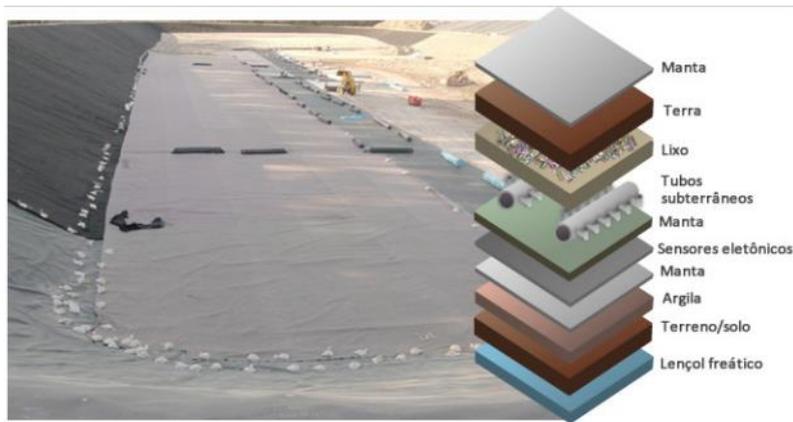
De acordo com Batista (2010),

O monitoramento em aterros sanitários se desdobra em três nichos complementares: o ambiental – que se ocupa com a qualidade do meio físico do entorno, a geração de biogás e os líquidos lixiviados; o geotécnico – responsável por avaliar recalques superficiais, movimentações internas, poro pressões nos maciços e a integridade estrutural da obra, e o operacional, que objetiva acompanhar topograficamente a geometria da obra, o volume de resíduos incorporados, a compactação na rampa de aterragem e o controle do peso específico aparente dos resíduos sólidos.

As unidades podem ser divididas e detalhadas conforme abaixo (SA, 2012):

- a) Impermeabilização da base e superior:** atividade com a função de impedir ou reduzir significativamente a infiltração no solo dos lixiviados e gases pela base ou fundo do aterro. Para a construção dessa camada de impermeabilização são utilizados vários materiais, como por exemplo, material argiloso compactado e geomembranas que formam uma série de camadas sobrepostas. Além do processo de impermeabilização da base são considerados também outros elementos de controle em aterros, sistemas de coleta e extração de biogás, camadas de cobertura diária e final, e os sistemas de coleta e extração de lixiviados. A Figura (5), mostra em detalhes a estrutura que compõem a geomembrana de PEAD de base de um aterro.

Figura 5: Instalação de manta impermeabilizante em aterro sanitário



Fonte: Material didático “Disposição final de resíduos” (2012).

b) Sistema de drenagem de águas pluviais: Para que não haja erosão nos taludes do aterro e comprometimento do funcionamento das camadas de cobertura final, deve-se fazer a instalação de um sistema de drenagem de águas pluviais. Esse sistema tem como principal finalidade minimizar a entrada de águas de chuva para o interior do aterro, drenar a precipitação sobre as áreas do aterro sanitárias já concluídas e cobertas reduzindo, dessa forma, a geração de líquidos lixiviados e o escoamento superficial, que pode provocar erosão nos taludes do aterro e comprometer o funcionamento das camadas de cobertura final (Figura 6). O sistema de drenagem pluvial é composto por solo revestido em concreto, meia-cana ou tubos de concreto, canais construídos em argila compactada, gabiões e materiais alternativos como entulho da construção civil e tiras de pneu.

Figura 6: Sistema de drenagem pluvial em aterro sanitário



Fonte: Material didático “Disposição final de resíduos” (2012).

c) Sistema de drenagem e tratamento dos líquidos percolados: Além da

execução da camada de impermeabilização, a fundação dos aterros deve conter sistemas de drenagem constituídos por tubos de concreto ou PEAD perfurados envoltos em material granular subjacentes às camadas drenantes de areia e ou brita/cascalho (Figura 7). Os tubos serão responsáveis por conduzir o percolato às unidades de tratamento localizadas geralmente na menor cota do terreno. Como forma de evitar o acúmulo na massa de resíduos e os possíveis problemas de instabilidade associados a isso, o sistema de drenagem deve ser dimensionado de forma a coletar e remover o mais rapidamente possível os lixiviados gerados.

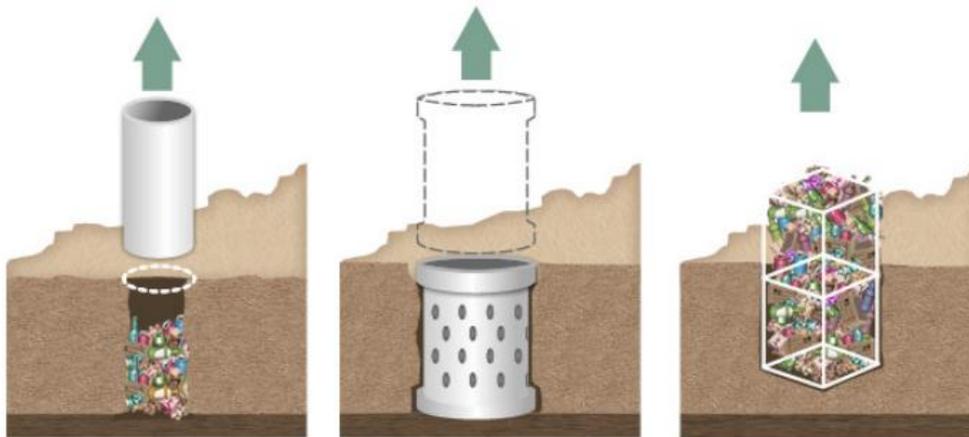
Figura 7: Sistema de drenagem de chorume em aterro sanitário



Fonte: Material didático “Disposição final de resíduos” (2012).

d) Sistema de drenagem do biogás: A decomposição de matéria orgânica no interior do aterro gera muitos gases, para fazer a captação adequada é necessário a instalação de um sistema de drenagem de biogás, esse sistema tem o objetivo de coletar e remover os gases. Para a drenagem são dispostos em diversos pontos do aterro drenos verticais quanto horizontais. Os drenos verticais de gás são os mais utilizados, sendo que, nesse caso, sempre são interligados com os drenos horizontais de lixiviados. A Figura (8), mostra como os drenos são construídos e dispostos.

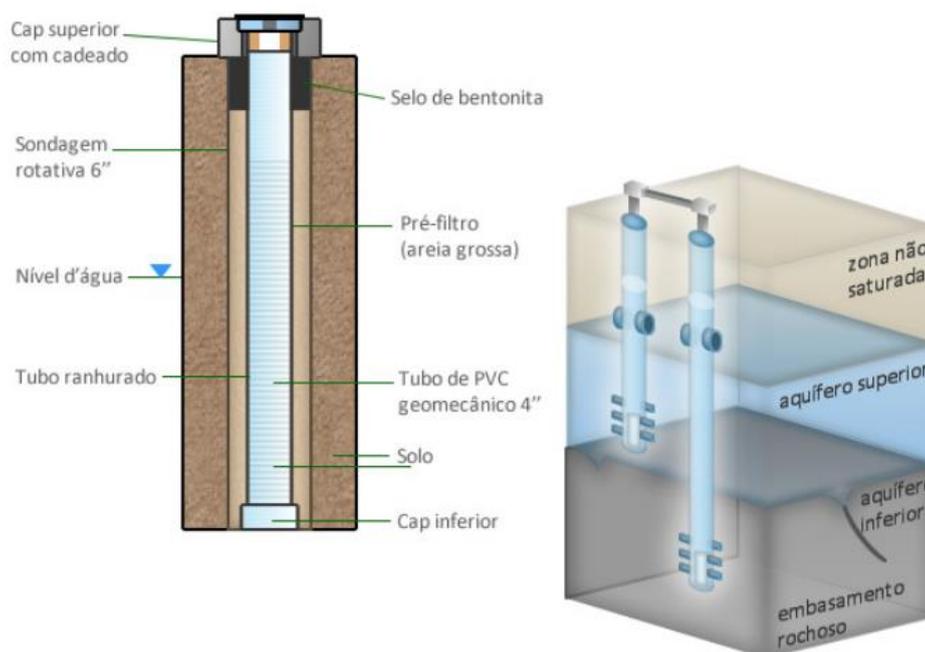
Figura 8: Formas de construção de drenos de gás em aterros sanitários



Fonte: Material didático “Disposição final de resíduos” (2012).

e) Monitoramento ambiental e geotécnico: É de extrema importância o monitoramento ambiental do aterro, este tem como objetivo verificar se as obras de drenagem e impermeabilização cumprem com a função de isolar o entorno do aterro dos resíduos e efluentes potencialmente poluidores. Esse monitoramento deve ter como principal foco a água superficial e a subterrânea (lençol freático). As águas superficiais deverão ser coletadas em dois pontos: dois próximos ao local de lançamento dos efluentes líquidos tratados, sendo um à jusante do lançamento e outro à montante. As águas de lençol freático deverão ser coletadas em piezômetros construídos ao longo do perímetro do sítio, sendo, no mínimo 3 piezômetros à jusante e um à montante, considerando o fluxo preferencial do lençol freático (Figura 9). Já o monitoramento geotécnico serve para calcular a estimativa da vida útil em um aterro, devendo ser realizado com certa periodicidade. Esse monitoramento também é uma importante ferramenta para contínua avaliação das condições de segurança, já que os RSU são materiais altamente deformáveis. O principal foco do monitoramento geotécnico é o acompanhamento periódico do recalque do aterro.

Figura 9: Esquema construtivo de piezômetros para monitoramento das águas subterrâneas



Fonte: Material didático “Disposição final de resíduos” (2012).

O modelo de implementação dos sistemas e das atividades desenvolvidas em um aterro seguem padrões e normas bem estabelecidas. Deve haver uma elevação dos níveis de monitoramento e manutenção, considerando as precauções que se deve ter na operação desses ambientes que recebem uma carga muito grande de resíduos sólidos de todos os tipos. Por esse motivo, os resultados provenientes do desenvolvimento tecnológico se mostram bastante promissores.

2.4 INDÚSTRIA 4.0

A partir da segunda metade do século XVII, houve um grande desenvolvimento tecnológico, também chamado por Revolução Industrial. Esse desenvolvimento foi se espalhando pelo mundo de tal maneira que revolucionou as estruturas sociais e os sistemas econômicos, onde o ponto de partida se deu com a mecanização dos processos.

Esse momento de mecanização ficou conhecido como Primeira Revolução Industrial, no qual representa o início do processo de industrialização. Após a Segunda Guerra Mundial iniciou-se a Segunda Revolução Industrial em que houve grandes inovações tecnológicas, desenvolvimento das indústrias químicas e do aço. Já a Terceira Revolução Industrial corresponde ao desenvolvimento não só

do setor industrial, mas também do campo científico, com invenção das máquinas com operações automáticas.

Na sequência, a indústria foi crescendo e se desenvolvendo ainda mais, chegando no que conhecemos hoje como Indústria 4.0. Sua principal característica é a interligação de todos os processos de fabricação, a partir do uso de tecnologias, máquinas avançadas e robótica. Houve a partir dessas mudanças uma maior integralização entre os processos, podendo reduzir falhas, aumentar a lucratividade e aumento da sustentabilidade.

Segundo Hermann (2016), a quarta revolução industrial é a primeira em que seus conceitos, impactos e resultados são discutidos ao mesmo tempo em que ela ocorre, diferentemente das revoluções industriais que ocorreram ao longo da história e que foram diagnosticadas anos após seu acontecimento.

Esse processo de transformação digital tem mudado a forma como as organizações, as pessoas e o mundo controlam suas produções e processos. Ela tem possibilitado um fluxo de informações mais ágil ao mesmo tempo em que consegue fazer a coleta e uso de dados importantes sobre as operações. A transformação digital está inteiramente ligada à aplicação da tecnologia digital em todos os aspectos sociais e faz parte de um grande processo tecnológico (AZEVEDO, 2017).

Monostori *et. al* (2016) afirma, que a indústria 4.0, essencialmente é fundamentada pelo uso e integração sinérgica das tecnologias de informação, comunicação e automação industrial. O sucesso da conexão integrativa e sistêmica só se dará se houver implementação de sistemas *cyber*-físicos por toda a indústria (MONOSTORI ET. AL, 2016).

Esses sistemas *cyber*-físicos proporcionam interconexão entre máquinas, transportadores e seres humanos de forma dinâmica e em tempo real, por meio da utilização de sensores e sistemas de controle. Isso possibilita que o maquinário e os produtos desenvolvidos ao longo de uma planta de produção possam se comunicar analisando dados, tomando decisões e se adaptando rapidamente as alterações de demanda em tempo real.

2.4.1 TECNOLOGIAS QUE IMPULSIONAM A INDÚSTRIA 4.0

Existem diversas tecnologias que impulsionam a indústria 4.0. Dentre elas tem-se a Internet das Coisas (IoT), Computação em nuvem, Big Data e Analytics, IA e aprendizado de máquina, dentre outras. Para melhor entendimento sobre quais

aspectos dessas tecnologias poderão auxiliar na construção de uma gestão de resíduos sólidos mais eficiente em um aterro sanitário, alguns desses pontos serão detalhados nos tópicos a seguir.

2.4.1.1 INTERNET DAS COISAS (IOT)

A IoT pode ser conceituada como sendo uma tecnologia capaz de conectar dispositivos físicos que recebem e transferem dados por meio de redes sem fio com a mínima intervenção humana possível. Essa interação acontece através da integração de tipos de objetos com dispositivos de computação simples.

A IoT viabiliza todo um conjunto de aplicações e serviços através de dispositivos físicos e digitais interconectados por meio de uma adequada infraestrutura de comunicação (MIORANDI ET. AL, 2012). Segundo Kortuem et. al. (2009) e Miorandi et. al. (2012) a IoT possibilita a identificação, comunicação e a interação de vários dispositivos através do desenvolvimento de novas tecnologias e soluções. Lopes e Moori (2021) descreve a IoT como uma tecnologia que nos permite a digitalização nas operações industriais a partir da combinação de sensores, conectividade e mobilidade.

A depender dos tipos de IoT implementados no projeto, o processo de transferência e análise de dados pode acontecer com a intervenção humana ou ainda por meio de inteligência artificial e *machine learning* praticamente em tempo real ou considerando um período maior.

De acordo com Yun e Yuxin (2010), a IoT possui três camadas principais, sendo elas: percepção, rede e aplicação. A camada da percepção pode ser caracterizada pelo sensoriamento e pela identificação dos objetos e coleta de informações. A camada de rede é composta por todos os tipos de redes de comunicação e internet. Esta tem a capacidade de fazer funcionar a rede e é responsável pela operação da informação. A camada de aplicação é a IoT combinada com a experiência na indústria (APUD JORGE, 2018).

2.4.1.2 COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Essa tecnologia diz respeito ao fornecimento de serviços de computação via internet. Esses serviços podem ser banco de dados, sistemas de gestão, armazenamento, servidores, redes, *softwares*, entre outros. Esse recurso permite o acesso a recursos computacionais abundantes como um serviço e a partir de distintos dispositivos remotos.

Para Cândido e Araujo (2022), a computação em nuvem é considerada um recurso complementar às novas tecnologias de visualização de dados, recuperação da informação e até mesmo para a Inteligência Artificial, sendo sua principal funcionalidade a melhoria contínua do desempenho no gerenciamento e integração dos dados, fator fundamental na busca por agilidade na tomada de decisão.

2.4.1.3 BIG DATA E ANALYTICS

O termo aborda a incapacidade das tradicionais arquiteturas de dados em manipular, armazenar e analisar os dados, onde é utilizada uma arquitetura escalável para realizar as atividades de forma efetiva (AZEVEDO, 2017). Segundo Nist (2015), big data pode ser definido como um conjunto enorme de dados, em que a grande massa de dados não é estruturada, mas necessita de análise em tempo real. As características do big data são conhecidas como os 5s do Big Data, sendo: Variedade – dados gerados por uma variedade de fontes; Variabilidade – coerência no conjunto de dados; Volume – tamanho do conjunto de dados; Velocidade – taxa de fluxo de dados e Valor – agregação de valor.

Para Kohavi, Rothlender e Simoudis (2002), o termo *analytics* diz respeito a interpretação, a descoberta e comunicação dos padrões significativos nos dados, tendo valor significativo nas mais diversas áreas do conhecimento, pois pode-se aplicar à análise de dados no negócio a fim de se prever, gerenciar decisões, análise de risco, melhorar o desempenho, aprimoramento de recursos, dentre outros.

2.4.1.4 TECNOLOGIA RFID

Com o desenvolvimento tecnológico vieram atualizações significativas de sistemas que já eram conhecidos anteriormente, como por exemplo sistemas de radares. Esses sistemas eram utilizados com auxílio de ondas de rádio e deram origem ao sistema de identificação automática por radiofrequência. O sistema de identificação por radiofrequência (RFID) faz a identificação de objetos através de ondas de rádio.

Utilizando-se da mesma lógica e a partir de novos estudos esses sistemas foram repaginados. Atualmente, o sinal de radiofrequência é enviado por um dispositivo leitor que possui uma antena, a um microchip, o qual é ativado, refletindo de volta o sinal enviado ou transmitindo seu próprio sinal (PINHEIRO,

2017).

De acordo com Seufitelli et al. (2010), o sistema RFID funciona com o envio de dados de um dispositivo móvel para um leitor sem utilização de fios e por meio de ondas de rádio. Esse sistema é composto basicamente por (SEUFITELLI et al., 2010):

- *Transceiver* (leitor com antena);
- *Transponder* (etiqueta, tag);
- Computador.

De acordo com Seufitelli et al. (2010), o RFID funciona como uma espécie de leitor, emitindo um sinal de radiofrequência por meio de uma antena, esta pode estar ligada ao leitor ou por um fio, tendo como principal objetivo localizar *tags* que captam e emitem sinal constantemente. Ainda de acordo com Seufitelli et al. (2010), a *tag* emite sinais também por radiofrequência enviando assim os dados vinculados ao objeto. O leitor envia, em tempo real, essas informações recebidas para o sistema computacional que tem instalado um *software* específico para reconhecer e identificar essas informações (SEUFITELLI et al., 2010). Veja Figura (10):

Figura 10: Esquema Básico do RFID



Fonte: Seufitelli et al. (2010)

Esse sistema viabiliza diversos controles sem a necessidade de contato físico por indução eletromagnética. Ademais, as informações acondicionadas nas etiquetas podem ser acessadas de maneira rápida e prática.

Além do mais, o sistema RFID possui integração com outras tecnologias já existentes o que aumenta a variedade de usos podendo modernizar vários processos de vários nichos de mercado. Essa integração pode ocorrer com o *Global Positioning System* (GPS) e o *Real-Time Localization System* (RTLS). Isso possibilita maior precisão na localização do produto, ele estando em movimento ou não.

Viabiliza a obtenção de informações quanto a hora que a carga saiu, por qual caminho percorreu, se houve roubo de carga o sistema identifica o local e a hora podendo assim agir rapidamente para recuperá-la, sabe-se a hora que a carga chega e o seu conteúdo (SEUFITELLI et al., 2010).

2.4.1.5 SISTEMA GPS

Segundo Tenutti (2014), o *Global Positioning System* (GPS) segue o princípio básico de transmissão de sinais eletrônicos por satélites, por meio de ondas eletromagnéticas e faz a captação dos sinais com apoio de receptores. Além disso, possuem a capacidade de calcular as coordenadas relacionadas a posição de um objeto, velocidade e o tempo decorrido utilizando-se de um sistema de referência.

Seu uso é bastante apreciável considerando que a transmissão ocorre independentemente de as condições meteorológicas adversas, como chuvas e ventos, entre outros fatores. O sistema GPS é constituído de 24 satélites, dos quais 21 são de uso corrente e três em “stand-by”. Eles orbitam a uma altura de 20.200 km em seis órbitas distintas, com uma inclinação orbital de 55º graus, com 4 satélites em cada órbita (TENUTTI, 2014).

2.4.1.6 SENSORIAMENTO REMOTO

Para Rodrigues et al. (2014), a análise de grandes quantidades de dados em curto espaço de tempo relacionados ao meio ambiente e uso do solo se tornam possíveis em detrimento das disponibilizações de sistemas de informação geográficas aliados as imagens de satélite.

Essa tecnologia utiliza-se dos mesmos métodos das máquinas fotográficas para captar informações da superfície terrestre com uso de sensores. Com ela é possível mapear áreas com um nível de detalhamento enorme e aprimorar os monitoramentos ambientais em todos os sentidos.

As imagens são obtidas através de satélites, que permitem o registro de amplas áreas em diferentes escalas e com alto nível de detalhamento, é possível gerar diversos cenários e em diferentes resoluções. Hoje, os satélites mais utilizados no registro de informações e para observação são o *Landsat* e o *CBERS*.

2.4.1.7 SENSORES

Os sensores têm potencial de medir grandezas de todos os tipos sem a

necessidade de um operador. Essas características os transformam em dispositivos de grande valor no monitoramento e gestão de processos. Eles são bastante eficientes em detectar estímulos e transformar esses estímulos em informações que possam ser interpretadas por outros dispositivos.

Os usos de sensores são variados e devem ser aplicados após estudo das condições ambientais do local de instalação e aos estímulos elencados para a atividade de interesse. Os sensores são capazes de captar estímulos de luz, calor, pressão, umidade, temperatura, determinados tipos de materiais, entre outras grandezas.

Os sensores responsáveis por captar estímulos de luminosidade são chamados de fotoelétrico ou ópticos. A detecção do sinal ocorre sem a necessidade de que haja contato mecânico. De acordo com Poço e Souza (2021), o princípio de funcionamento compõem-se por um emissor que gera a luz e um receptor que faz com que o sensor comute sua saída.

Os sensores magnéticos funcionam a partir da captação de campos e fluxos magnéticos. Esse tipo de sensor pode ser utilizado para detecção de partes e peças metálicas, como alumínio, aço inox, ferro, aço e latão. São criados campos magnéticos ao redor do sensor que são modificados quando um objeto metálico entra no campo de interferência.

O princípio de funcionamento dos sensores capacitivos é bem parecido com o anterior citado, este também é utilizado para identificar peças e partes de objetos, entretanto, são identificados materiais não-metálicos, como: plásticos, madeiras, vidros e derivados sintéticos. Outra funcionalidade que ele possui é de identificar o nível de líquidos.

Os sensores térmicos são responsáveis por medir variações de temperaturas e reagem a estímulos térmicos. Eles podem monitorar variações de temperatura em ambientes, de algum objeto ou componentes eletrônicos e corporal.

Para as variações de pressão podem ser utilizados os sensores de pressão. Este possibilita medir variações de pressão de gases e líquidos dentro de sistemas controlados.

Tem-se também os sensores capazes de medir as variações de umidade presente no solo. Este possui dois tipos: resistivos e capacitivos. As medições por capacitadores ocorrem quando há variação da capacidade de um capacitador. Ele absorve a umidade e altera a capacitância do capacitor. Já os resistivos utilizam-se de um material condutivo higroscópico, é por meio dele que a variação de

umidade causa mudança na resistência elétrica.

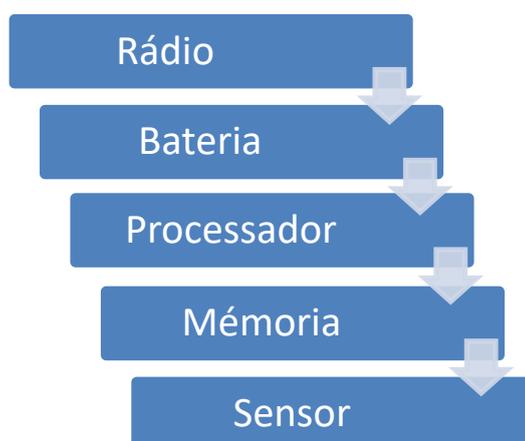
2.4.1.8 REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF)

Conforme cita Mármol e Pérez (2011), uma rede de sensores sem fio pode ser definida com um vasto número de sensores geograficamente distribuídos. São constituídas de pequenos nós que atuam em cooperação uns com os outros (APUD JORGE, 2018). Uma RSSF é vista como uma rede composta de elementos de sensoriamento, processamento computacional e de comunicações que viabilizam ao administrador dessa rede, monitoramento e reação a eventos em determinado ambiente (SOUSA; LOPES, 2011).

Conforme citam Gubbi et al. (2013), os avanços tecnológicos nas comunicações sem fio e nos circuitos integrados proporcionaram a existência de microdispositivos eficientes, de baixo custo para aplicação em detecções remotas. Esse avanço possibilitou o uso de uma grande quantidade de sensores inteligentes capazes de analisar, processar, coletar e disseminar informações importantes sobre as operações em diversos ambientes.

De acordo com Mármol e Pérez (2011), nas RSSF existem nós que são consideradas peças fundamentais e proporcionam baixo consumo energético, baixo custo e comunicação sem a necessidade de cabos (APUD JORGE, 2018). A Figura (11) mostra a estrutura de um modelo real de nó sensor, enquanto a Figura (12) mostra um tipo real de nó sensor. (JORGE, 2018):

Figura 11: Arquitetura de um nó sensor



Fonte: Adaptado de Jorge (2018)

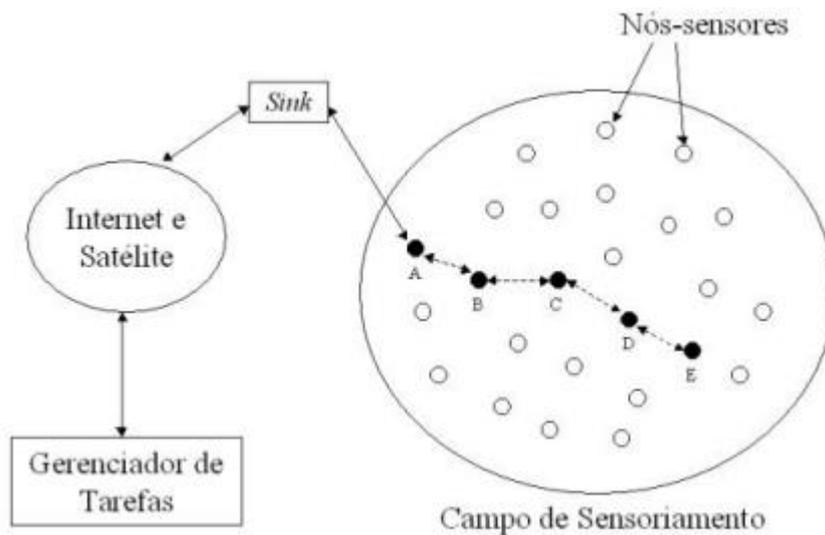
Figura 12: Nó sensor real modelo Mica 2



Fonte: Jorge (2018)

Para Jorge (2018), a arquitetura básica de uma RSSF pode ser demonstrada conforme a Figura 13, sendo composta por nós sensores, campo de sensoriamento, estação base (sink), o meio de difusão dos dados obtidos, gerenciador de tarefas, fenômeno de interesse (aplicação e observador).

Figura 13: Rede de Sensores Sem Fio



Fonte: Jorge (2018)

3. METODOLOGIA

Este trabalho utilizou buscas bibliográficas para embasar os conceitos sobre implementação de sistemas e aumento da eficiência no monitoramento de aterros sanitários, incorporando concepções advindas da evolução no âmbito da indústria 4.0. As plataformas utilizadas para o estudo foram Scielo e Google Acadêmico (Scholar), inserindo os seguintes descritores “aterro sanitário” “resíduos sólidos”, “indústria 4.0”, “IOT”, “drenagem pluvial”, “piezômetro”, “drenagem de gás”, combinados de vários modos para alcançar um número adequado de publicações.

Ao utilizar as plataformas para a busca de publicações empregou-se dos operadores AND, OR e AND NOT como forma de auxiliar na filtragem das mais de 1500 publicações encontradas, além disso foram utilizados filtros por ano para conseguir publicações de até 14 anos atrás. Salvo alguns casos em que foram encontrados resultados de anos anteriores a esse período considerados relevantes para o estudo.

As buscas geraram em torno de 1634 publicações, a partir desse resultado foi efetuado filtros de acordo com os títulos para a seleção efetiva dos artigos que mais se adequassem ao objetivo do estudo. Os resultados dessa seleção passaram por um novo filtro, este levava em consideração os resumos de cada publicação para a correta verificação do conteúdo apresentado. Diante dessa seleção iniciou-se a estruturação da redação.

O presente estudo utiliza-se das técnicas de pesquisa aplicada, ou seja, ao final da pesquisa através da busca de conhecimentos específicos deve-se responder as problemáticas elencadas no começo do projeto. É por meio das informações coletadas e analisadas que proposição de resoluções pode ser defendidas e as aplicações desse estudo no objeto de pesquisa se torna factível. De acordo com os procedimentos técnicos a pesquisa adotou a pesquisa bibliográfica para desenvolver as reflexões e coleta de informações.

A partir da análise das publicações relacionadas ao tema escolhido foi possível nortear os parâmetros mais importante de cada um dos sistemas que compõem a operação dentro de um aterro sanitário e servirá como base para posterior implementação de uma interface de monitoramento que fará a captação de informações através de sensores e sistemas de forma intuitiva no aterro de CGA Baru.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Central de Gerenciamento Ambiental (CGA), denominou o aterro sanitário privado, foco do estudo, como CGA Baru, ficando localizado no estado de Goiás, próximo à divisa com o Distrito Federal. Fica situado na Fazenda Capão Grosso, na Estrada para Cidade Eclética, s/nº, Zona Rural do município de Águas Lindas de Goiás. Ele foi projetado para receber RSU advindos de resíduos domiciliares, comerciais, de poda, capina, roçada, varrição e resíduos não perigosos. Na Figura (14) é possível verificar a área do CGA Baru.

Figura 14: Aterro de CGA Baru



Fonte: CGA Baru, 2016.

O aterro sanitário CGA Baru foi construído recentemente, o licenciamento ambiental, licença de funcionamento 95/2023, foi emitida pela SEMAD/GO em maio de 2023. A quantidade de resíduos prevista na operação dentro do aterro é aproximadamente 1.500 t/dia, possibilitando uma vida útil estimada em 20 anos. Por ser um aterro sanitário ainda em fase de implantação e construído recentemente, informações como quantidade de municípios e quais serão atendidos são mais difíceis de definir, pois o aterro ainda está em processo de fechamento de contratos. Possui uma área total de 112 hectares, Figura (15).

Figura 15: Demarcação do aterro de CGA Baru



Fonte: CGA Baru, 2016.

Ele foi projetado para ter suas atividades e operações em 4 etapas, previsto um volume disponível total para aterramento de 11.447.248 m³. Veja Figura (16) e (17):

- 2.826.196 m³ (fase 1)
- 3.009.933 m³ (fase 2)
- 2.981.397 m³ (fase 3)
- 2.629.722 m³ (fase 4)

Figura 16: Etapas aterro de CGA Baru



Fonte: CGA Baru, 2016.

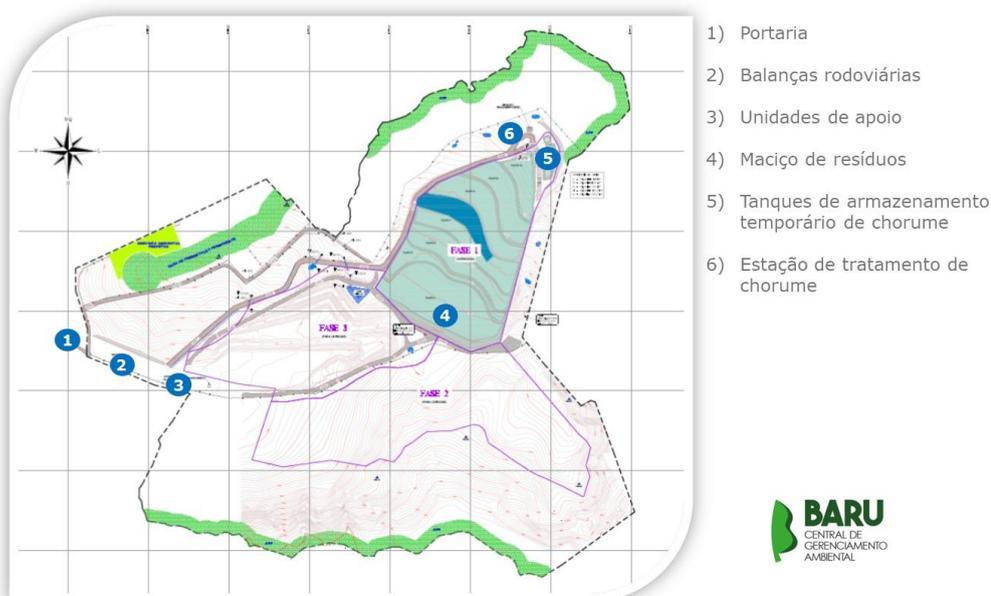
Figura 17: Disposição dos espaços no aterro de CGA Barú



Fonte: CGA Barú, 2016.

O local dispõe de uma portaria, balanças rodoviárias, unidades de apoio, maciços de resíduos, tanques de armazenamento temporário de chorume e estação de tratamento de chorume, disposto da seguinte forma, Figura (18):

Figura 18: Divisão dos locais de operação no aterro

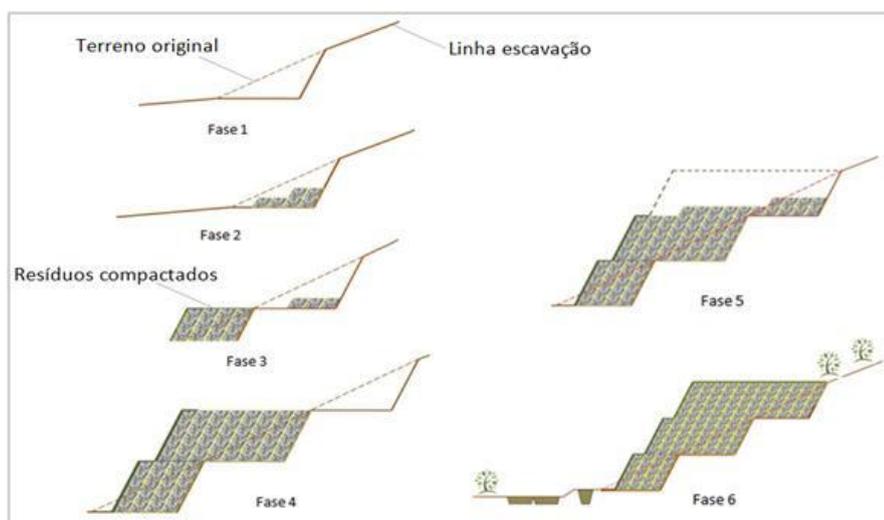


Fonte: Gomes, Pineda e Garcia, 2023.

O aterramento dos resíduos no aterro de CGA Barú utiliza-se do método de rampa e pode ser tipificado como sendo de encosta. Emprega-se essa técnica quando há um terreno de “meia encosta” e sua utilização abrangerá volumes maiores de resíduos depositados. Para instalação de aterro desse tipo é desejável que o terreno tenha declividade entre 10% e 20% e a seja viável modificar a topografia por meio de terraplenagem. É realizada diversas escavações de rampas ou plataformas onde os resíduos são dispostos, formando

células diárias. Na Figura (19) apresenta a configuração da construção de camadas e plataformas.

Figura 19: Esquema de operação de um aterro em rampa



Fonte: Mendes, J. A. M., 2019 apud Gomes, Pineda e Garcia, 2023.

A declividade da rampa deve seguir a ordem de 1:3 ou 1:2 (V:H). Essa adequação da declividade promove uma maior otimização na distribuição do peso na roda motriz do trator e confere maior compactação dos resíduos.

Assim que os resíduos chegam, são dispostos na área demarcada e posteriormente compactados, em camadas de 20 cm. Esse procedimento é realizado com a ajuda de um trator de esteiras, sempre seguindo o sentido de baixo para cima formando taludes com a declividade de 1(V):3(H). A compactação ocorre por meio do repasse dos tratores por no mínimo de 3 a 5 vezes sobre as camadas. Por fim, é preparado a cobertura diária sobre as camadas.

Esse tipo de aterro, em encosta, possui excelente vantagem no que diz respeito a capacidade volumétrica, podendo atingir alturas de 40 metros. Por consequência, demanda mais precaução dos que os demais, se tornando necessário o recrutamento de diversos profissionais especializados desde as fases de planejamento até a fase de operação e encerramento do aterro. Todos os movimentos devem ser estudados e o projeto deve ser detalhado para se evitar problemas futuros.

Para a operação é necessário além dos sistemas de funcionamento, alguns maquinários específicos. São utilizados para disposição dos resíduos, espalhamento, cobertura diária, entre outras atividades. Logo, o aterro em encosta exige um trator de esteiras em regime integral, além de pá carregadeira,

retroescavadeira e caminhões.

3.2 PARÂMETROS

Para o presente estudo é primordial que sejam definidos os parâmetros a serem observados e analisados. Os sistemas sugeridos e o padrão de coleta dos dados dependem das variáveis escolhidas, assim como definição dos condicionantes para uma intervenção no caso de sistemas não estarem funcionando como o esperado.

3.2.1 MONITORAMENTO AMBIENTAL E GEOTÉCNICO

É extremamente relevante o monitoramento das águas superficiais e subterrâneas, sendo essa fiscalização capaz de mostrar com rapidez os focos de atenção e onde o sistema deve ser corrigido para que não haja contaminação. Além desse monitoramento, deve ser feito em conjunto, a fiscalização dos efluentes do aterro e das unidades de tratamento. O efluente tratado é liberado em um local designado conforme as especificações no projeto, esse local deve estar em avaliação constantemente.

O monitoramento da qualidade das águas no Brasil era comumente realizado sem considerar critérios e parâmetros padrões específicos. A coleta de dados referente a qualidade das águas era realizada individualmente por cada estado brasileiro e esses dados eram enviados para a Agência Nacional de Águas (ANA). Apenas em 2013, a ANA lançou a Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade da Água (RNQA), o monitoramento passou a ser direcionado a nível nacional de forma padronizada e cooperativa. Os Estados continuam sendo os principais responsáveis, mas os dados recebidos estão mais fáceis de serem interpretados.

Como consequência, intitulou-se como indicador de qualidade o Índice de Qualidade das Águas (IQA), ele tem sido o principal indicador utilizado no país atualmente. O IQA é calculado conforme os seguintes parâmetros: sólidos totais, pH, temperatura da água, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total, fósforo total, turbidez e coliformes termotolerantes (RAMOS; OLIVEIRA; ARAÚJO, 2019).

O cálculo é executado através de uma fórmula matemática que gera um índice numérico entre 01 e 100 (Equação 1). Para cada parâmetro avaliado é fornecido um peso, podendo receber valores que causam mais influência que outros (Figura 20).

Equação 1: Fórmula para obter o índice de qualidade da água

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i(1)}$$

Fonte: CETESB (2017).

Onde:

IQA: Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100;

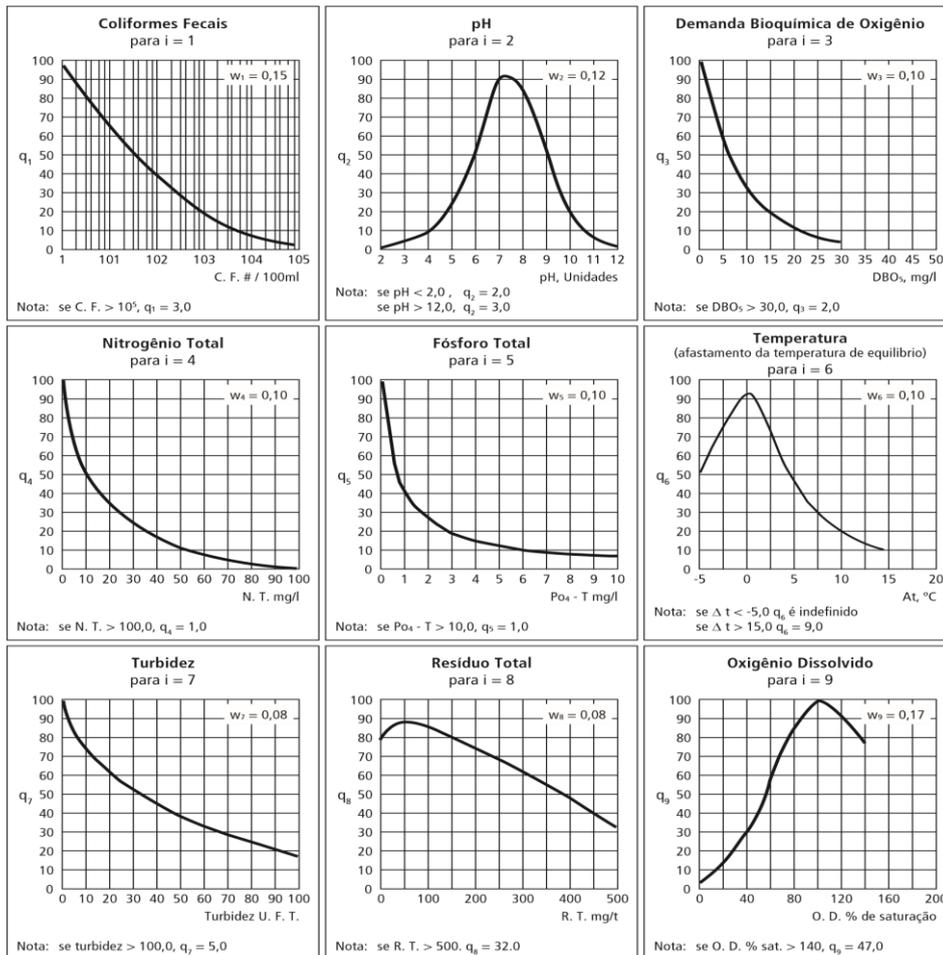
q_i : qualidade do i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida e,

w_i : peso correspondente ao i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade, sendo que:

em que:

n : número de variáveis que entram no cálculo do IQA.

Figura 20: Curvas Médias de Variação de Qualidade das Águas



Fonte: CETESB (2017).

Após efetuar os cálculos observando os valores fornecidos de pesos para cada parâmetro se obtém resultados entre 0 e 100 que podem ser classificados por categorias, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Classificação do IQA

CATEGORIA	PONDERAÇÃO
Ótima	$79 < IQA \leq 100$
Boa	$51 < IQA \leq 79$
Regular	$36 < IQA \leq 51$
Ruim	$19 < IQA \leq 36$
Péssima	$IQA \leq 19$

Fonte: Adaptado de CETESB (2017).

De acordo com Ramos, Oliveira e Araújo (2019), o pH é um dos parâmetros mais importantes para análises operacionais de qualidade da água. Os parâmetros fósforo, nitrogênio e nitrato também possuem relevância significativa na análise da qualidade da água. Martins (2018), cita que o nitrato é um indicativo de poluição relativamente recente, ele é resultado da decomposição do nitrogênio orgânico por microrganismos heterotróficos.

Em conformidade com a Resolução CONAMA nº 357/2005, segue os valores adequados para cada um dos parâmetros que compõem o IQA e parâmetros adicionais para medir a qualidade da água, Tabela (3):

Tabela 3: Parâmetros e condicionantes

Parâmetros	Condicionantes	Tipo de parâmetro
1. Coliformes Termotolerantes	Máximo de 200 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais, de pelo menos 6 amostras.	Biológicos
2. Sólidos totais	Até 500 mg/L	Físicos
3. Temperatura	Máximo 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C na zona de mistura	Físicos
4. Turbidez	Até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT)	Físicos
5. pH	Entre 6,0 e 9,0	Químicos
6. Oxigênio Dissolvido	Mínimo 6mg/L O ₂	Químicos
7. Demanda Bioquímica de Oxigênio	Até 3 mg/L O ₂ (5 dias a 20°C)	Químicos
8. Nitrogênio total	Até 1,27 mg/L	Químicos
9. Fósforo total	Até 0,020 mg/L F	Químicos
10. Nitrato	Até 10,0 mg/L N	Químicos

11. Condutividade Elétrica	Entre 10 e 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Físicos
12. Alcalinidade	Igual ou inferior a 0,5 ‰	Químicos
13. Cloretos	Até 250 mg/L Cl	Químicos
14. DQO	Média de 30.000 mg O ₂ /litro	Químicos
15. Níquel	Até 3,7mg/L N, para pH \leq 7,5 Até 2,0 mg/L N, para 7,5 < pH \leq 8,0 Até 1,0 mg/L N, para 8,0 < pH \leq 8,5 Até 0,5 mg/L N, para pH > 8,5	Químicos
16. Alumínio	Até 0,1 mg/L Al	Químicos
17. Bário	Até 0,7 mg/L Ba	Químicos
18. Cádmi	Até 0,001 mg/L Cd	Químicos
19. Chumbo	Até 0,01mg/L Pb	Químicos
20. Cobre	Até 0,009 mg/L Cu	Químicos
21. Cromo	Até 0,05 mg/L Cr	Químicos
22. Ferro	Até 0,3 mg/L Fe	Químicos
23. Manganês	Até 0,1 mg/L Mn	Químicos
24. Mercúrio	Até 0,0002 mg/L Hg	Químicos
25. Níquel	Até 0,025 mg/L Ni	Químicos

Fonte: Autoria própria.

Além da preocupação em relação aos parâmetros biológicos e físico-químicos há uma preocupação muito grande em monitorar as várias camadas de resíduos dispostas na operação do aterro e posteriormente quando há o encerramento das atividades. Devido ao número de camadas de massa empilhada se torna crucial o controle quanto a estabilização. Atualmente, esse controle é realizado por meio de instrumentos geotécnicos.

Os dados que devem ser monitorados estão relacionados abaixo (LIMA et al., 2022):

- 1) Deslocamentos verticais (recalques) e horizontais (afastamentos) – uso de marcos superficiais;
- 2) Poro pressões de líquidos e gases – pressões neutras – uso de piezômetros;
- 3) Acompanhamento da estabilidade de diques de disparo – inclinômetros e marcos superficiais instalados no dique;
- 4) Inspeções com observações de não conformidades como trincas, afundamentos, erosões, resíduo exposto, vetores – visitas periódicas nas unidades.

Para a análise dos pontos elencados utiliza-se como ferramenta o Piezômetro, ele auxilia no monitoramento geotécnico do aterro. Para Nóbrega (2017), podemos definir o piezômetro como sendo um instrumento de medição capaz de fazer leituras e avaliações da pressão hidráulica do local em que foi

instalado.

O piezômetro é um importante instrumento no monitoramento da pressão do líquido do sistema, este mede a altura a qual uma coluna de líquido se eleva contra a gravidade da água subterrânea em um ponto específico.

Os diferentes tipos de piezômetros são descritos por Soares (2010) em seu trabalho e são os seguintes (ZUCHERATTO JÚNIOR, 2022):

- Piezômetros pneumáticos: opera por pressão de gás;
- Piezômetros hidráulicos: sua operação envolve um filtro poroso que engloba um reservatório de água, contendo tubos flexíveis cheios de água separando um manômetro;
- Piezômetro elétricos: é composto por um diafragma defletor e um filtro poroso separado por um pequeno reservatório de água. É por meio de um extensômetro ou fio vibratório que as deflexões do diafragma são detectadas;
- Piezômetros standpipe ou de tubo aberto: a medição ocorre por meio de um tubo aberto no qual o nível de fluído é medido por sondagem;
- Piezômetro de casagrande: ocorre por meio de um tubo inserido em um furo de sondagem, sendo de PVC, perfurado em um ou mais trechos ou ranhurado, geomecânico ou metálico;
- Piezômetro de corda vibrante: há separação da água dos poros do sistema de medição por meio de um diafragma metálico.

Os recalques são outros importantes parâmetros a serem observados quando se trata da operação dentro do aterro. Os recalques podem influenciar no desmoronamento e desestabilização do aterro. As análises resultantes desse processo, permitem (BATISTA, 2010):

- Estimativa da vida útil;
- Avaliação da integridade dos sistemas de revestimento, de cobertura e dos dispositivos de drenagem de líquidos percolados e gases;
- O desenvolvimento de estudos para reaproveitamento das áreas ocupadas após o fechamento dos aterros;
- Quando realizado juntamente ao monitoramento físico-químicos dos resíduos, a possibilidade de estabelecimento de correlações entre recalques e degradação dos resíduos;
- Os recalques e a verificação visual da ocorrência de trincas na cobertura de bermas e taludes são indicadores de falhas e

comprometimento da estabilidade da massa de resíduos;

- Avaliar as mudanças na compressibilidade em função da degradação dos resíduos prevendo-se a instalação de medidores de recalque em profundidade no interior da massa de resíduos.

As movimentações horizontais e verticais podem ser acompanhadas através do registro topográfico sistemático. São instalados na camada de resíduos, nos taludes, nas bermas e no topo do aterro as chamadas placas de recalque. Esse dispositivo é confeccionado em material resistente à corrosão e a haste vertical deve ser protegida com tubo de PVC rígido. Após o encerramento do aterro devem ser instalados marcos superficiais que possam medir os recalques e deformações horizontais. Segue representação dos medidores de recalques Figura (21) e (22):

Figura 21: Medidores de recalques

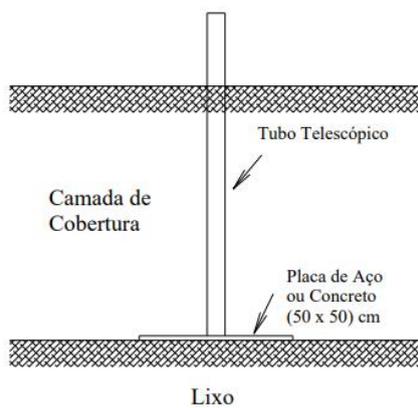
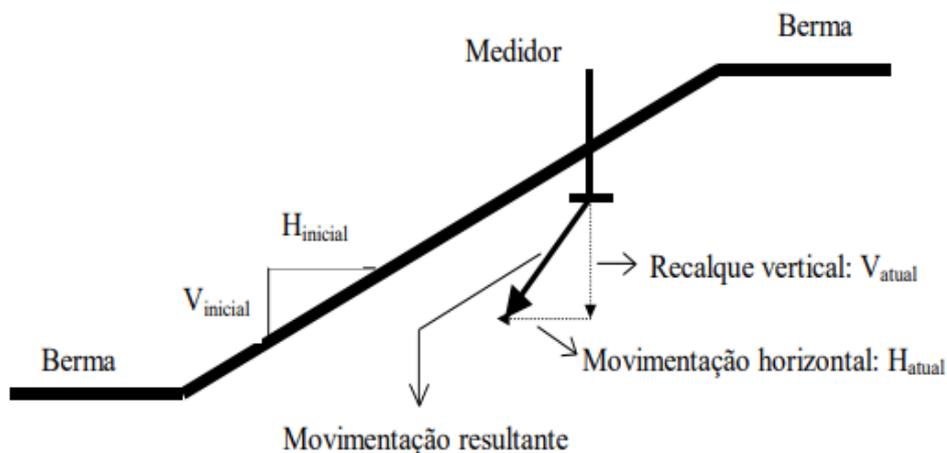


Figura 22: Esquema das movimentações dos medidores de recalques superficiais



Fonte: Simões et al., 2006 apud Batista, 2010.

Para complementar o monitoramento de estabilidade dos recalques pode-se utilizar de levantamentos topográficos, estes devem seguir uma frequência de gerenciamento mensal podendo ser alterado ao longo do período de funcionamento do aterro.

3.2.2 DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

Para Sidhu et al. (2012), os sistemas de drenagens pluviais são importantes instrumentos de condução da água a fim de proporcionar diversos fins considerando sua integralidade com os diversos corpos de água presentes. As águas coletadas por meio desse sistema podem alimentar diversos cursos d'água a jusante, além de outros usos que irão depender das características físico-químicas, microbiológicas e parasitológicas (SAUER et al., 2011).

Para o controle adequado do sistema de drenagem das águas pluviais é essencial o monitoramento da movimentação da massa de resíduos aterrada ainda em decomposição aliada ao incremento da produção de chorume quando em períodos chuvosos. Além disso, a análise de poluentes e dados de vazão e precipitação podem ser relevantes no monitoramento.

3.2.3 DRENAGEM DE GASES E LIXIVIADOS

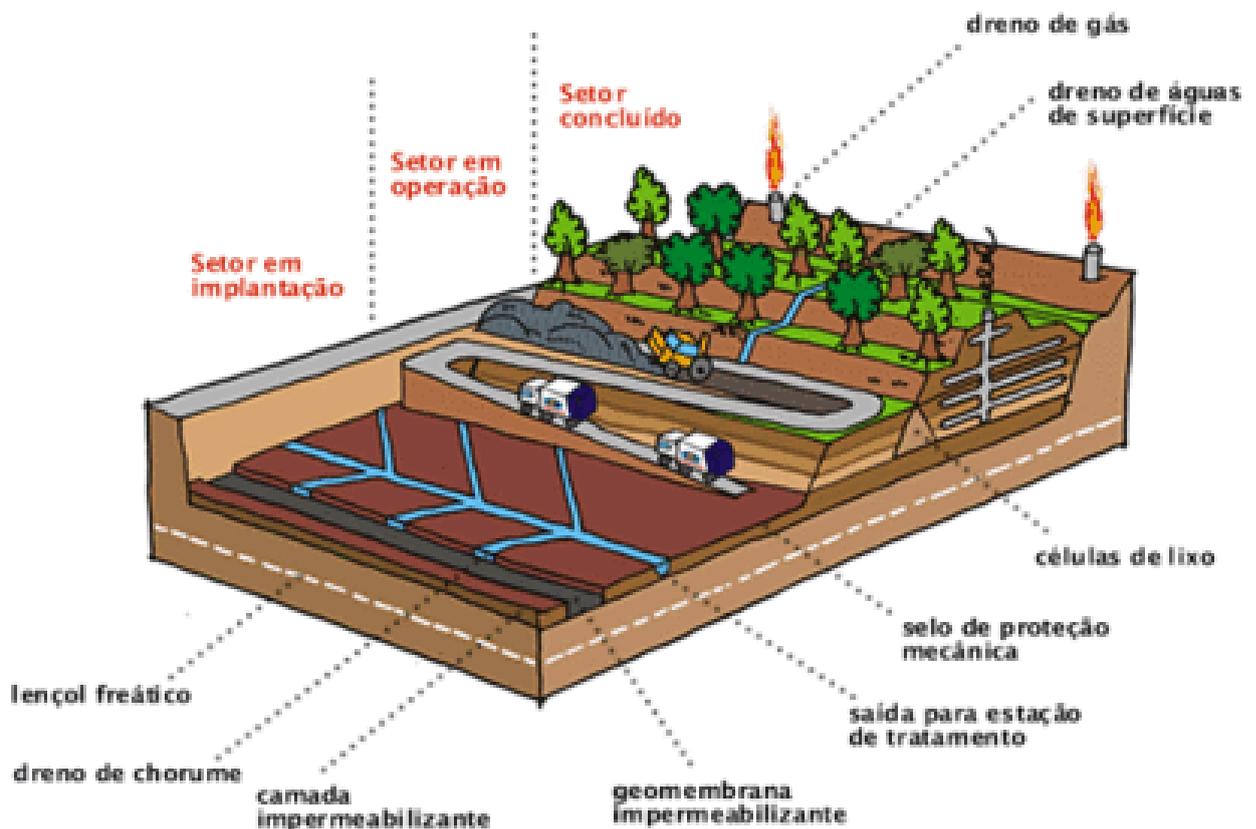
Os RS ao longo do aterro passam por um processo de decomposição anaeróbia, os diversos microrganismos presentes na matéria são responsáveis pela conversão da matéria orgânica em gases. De acordo com o Hrad et al. (2012), os gases que compõem o biogás são metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e gases traços, tais como diversos compostos orgânicos voláteis não metânicos, que podem ser tóxicos.

Considerando o setor dos resíduos, a emissão do CH₄ equivale a 18% das emissões antropogênicas de CH₄ em todo o mundo (BOGNER ET AL., 2008). Os aterros sanitários podem gerar de 35 a 69 toneladas de CH₄ para a atmosfera. A drenagem do biogás ajuda na coleta e diminuição das emissões, preserva o ambiente ao redor do aterro e pode ser incorporado como formas eficientes de fazer o monitoramento e controle das taxas de emissões.

No aterro de CGA Baru a drenagem do biogás ocorre por meio de uma rede composta por sistemas de drenos horizontais, envoltos por pedras, com inclinação para a saída do maciço (parte mais baixa do maciço) em formato de “espinha de peixe”. Utiliza-se da gravidade com o objetivo de fazer com que o

líquido desça e das correntes de convecção para coletar os gases que possuem a tendência de subir. A cada 5 metros de maciço é interligado um sistema de dreno vertical com dutos de concreto e preenchido com pedras. Conforme a Figura (23), pode-se observar os drenos horizontais quando ainda em fase de implantação e os drenos verticais quando o setor já está concluído.

Figura 23: Demonstração da disposição dos drenos horizontais e verticais



Fonte: IPT (2000).

O propósito dos drenos é fazer com que os líquidos e gases possam se movimentar ao longo do maciço de maneira rápida e obedecendo um caminho ideal, onde os líquidos descem e os gases sobem. O espaçamento dos drenos é dimensionado considerando esse processo de movimentação do maciço. Veja Figura (24).

Figura 24: Drenos horizontais e verticais no aterro de CGA Barú



Fonte: Gomes, Pineda e Garcia (2023).

A definição da posição dos drenos ao longo do aterro ocorre na etapa de projeto, o projetista deve definir o raio de influência ou de captação de biogás variando de 15 a 30m (SA, 2012).

3.2.4 TRATAMENTO DOS LÍQUIDOS PERCOLADOS

Os líquidos percolados podem ser chamados de lixiviados ou chorume, estes são produzidos por meio da decomposição da matéria nos aterros sanitários. Eles ocorrem por meio da percolação da água de chuva através dos RS e da própria umidade do material depositado nos aterros (SALLES; SOUZA, 2020).

Conforme cita Eduardo hideo fujii et al. (2019), o lixiviado possui composição variável e complexa, dependerá da idade do aterro, grau de compactação, tipo de

resíduo sólido depositado, condições climáticas locais, entre outros fatores.

Para análise dos líquidos percolados os parâmetros a serem considerados são cor verdadeira, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio amoniacal, turbidez, pH e nitrito.

Dentro do aterro, a drenagem do lixiviado ocorre através dos drenos de chorume implantados na massa de resíduos, aliados a dispositivos de medição de vazão e estruturas de acumulação desse lixiviado (sistemas de bombeamento, lagoas ou tanques). Após a captação, o líquido percolado é direcionado para sistema de tratamento adequado. Em seguida, é realizada a análise da eficiência e adequação do tratamento por meio do monitoramento do afluente e efluente e sua adequação ao lançamento em cursos d'água.

O tratamento de chorume no CGA Baru foi projetado para utilizar-se da tecnologia de osmose reversa. As instalações possuem 3 lagoas de acumulação do chorume, uma para o afluente bruto, uma para efluente tratado e outra para o condensado. Segue abaixo as instalações do sistema de tratamento de chorume no CGA Baru, Figura (25):

Figura 25: Sistema de drenagem e tratamento do líquido percolado



Fonte: Gomes, Pineda e Garcia (2023).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este tópico apresenta os resultados e análises alcançadas a partir dos pontos elencados no referencial teórico e das conclusões realizadas apoiadas no funcionamento total e monitoramento de um aterro sanitário. Foi evidenciado durante o estudo os métodos, sistemas, atividades e disposição de elementos primordiais no bom funcionamento da operação.

Para a construção desse tópico foi imprescindível considerar as observações no que diz respeito aos entendimentos dos elementos mais significativos quando consideramos o monitoramento de um aterro sanitário. A área de estudo relatada foi o aterro do CGA Baru em processo de implementação, portanto as análises e discussões apresentadas serão de grande valor e poderão ser experienciadas conforme as atividades e operações forem sendo vivenciadas no aterro.

O estudo demonstrou quais pontos são tidos como elementares quando se trata de monitoramento e gerenciamento de um aterro. Aliado a isso, é possível mesclar essas informações com os ganhos que a revolução tecnológica pôde proporcionar até o momento. Essa é uma das formas de aumentar a eficiência e ao mesmo tempo assegurar o uso correto do terreno sem motivar maiores danos ao meio ambiente.

Este trabalho irá explorar mais profundamente o monitoramento da área, volume ocupado pelos resíduos, controle de alguns parâmetros físico-químicos, controle por GPS dos caminhões e automação da balança rodoviária. O intuito é demonstrar como esses parâmetros podem ser avaliados empregando conceitos da indústria 4.0 e IOT, consulte Tabela (4).

Tabela 4. Indicadores e especificações para o monitoramento

Etapas de operação do aterro	Parâmetros monitorados	Dispositivos utilizados	Objetivo	Coleta de dados
Coleta de resíduos	Rotas realizadas até o aterro	Dispositivos de GPS, GSM ou GPRS; Tecnologia RFID	Acompanhar quantidade e características dos resíduos oriundos das populações abrangidas	Dados primários e secundários; periodicidade trimestral
Recepção de resíduos	Massa dos resíduos	Balanças automatizadas	Acompanhar a quantidade de	Dados primários;

	recepcionados no aterro		resíduos que chegam ao aterro	periodicidade diária
Descarga, espalhamento, cobertura e compactação dos resíduos	Volumes ocupados pelos resíduos e índices de compactação alcançados no aterro	Drones e tecnologia RFID	Acompanhar ocupação das células e eficiência do processo de compactação das camadas	Dados primários e secundários; periodicidade diária
Sistema de coleta e tratamento	Parâmetros físico-químicos	Sensores físico-químicos	Acompanhar variáveis significativas para o correto funcionamento do aterro	Dados primários; periodicidade trimestral

Fonte: Autoria própria.

4.1 MONITORAMENTO DA ROTA

Um dos parâmetros a serem otimizados é quanto as rotas realizadas pelos caminhões no processo de coleta até a destinação final. É de suma importância que se tenha a rastreabilidade total dos resíduos, entender quais locais estão sendo os maiores contribuintes, quais as rotas mais curtas e eficientes para a coleta e o trajeto total realizado até o aterro.

Para a rastreabilidade dos veículos e rotas como opção podem ser utilizados os rastreadores veiculares. São dispositivos que servem para coletar informações dos veículos, como localização em tempo real. O rastreamento veicular é possível a partir do uso de tecnologias como *Global Positioning System (GPS)*, o *Global System for Mobile Communications (GSM)* e o *General Packet Radio Service (GPRS)*.

Há diversas vantagens agregadas ao uso dessas tecnologias, como aumento da segurança, maior controle da frota, promove o rastreamento em tempo real com envio de dados em nuvem, bloqueio remoto, *softwares* disponíveis possibilitando geração de relatórios da operação e gestão das frotas, controle do consumo de combustível, monitoramento de rotas percorridas e monitoramento do tempo ocioso.

O uso da tecnologia RFID também pode ser incorporada a esse processo de monitoramento da rota, considerando que em todos os caminhões podem ser instalados etiquetas ou *tags* para fazer a coleta dos dados sem utilização de fios e

através de ondas de rádio. Para isso basta que se tenha um leitor que se conecte a esses dispositivos com a ajuda de uma antena de transmissão e captação.

A instalação de rastreadores veiculares deve ocorrer em todos os caminhões de coleta da frota de forma a garantir a coleta dos dados para as tomadas de decisões. A periodicidade de coleta dos dados deverá ser diária, podendo ocorrer em outros momentos conforme a necessidade dos gestores. O modelo de rastreador pode ser visto na Figura (26):

Figura 26: Rastreador veicular



Fonte: Amazon (2023)

Esse modelo permite conexão via GSM incluindo rede 4G, sendo necessário a obtenção de um cartão SIM para uso do dispositivo. O rastreador ST-901L possui rastreamento em tempo real, com possibilidade de cortar a passagem de combustível a qualquer momento, manter um histórico de utilização, modo cercas eletrônicas que basicamente funcionam como áreas delimitadas em que o veículo pode transitar, possui bateria interna e integração com a plataforma Track Prime.

Essa plataforma permite o monitoramento e gestão do veículo, controle de velocidade, gestão da rota, fiscalização em tempo real, controle via aplicativo e site eletrônico, além da possibilidade de geração de relatórios. Todos os veículos podem ser cadastrados e monitorados por meio dessa plataforma. Esse processo permite um melhor acompanhamento dos veículos, caminhões e tratores dentro do aterro, dando aos gestores maior autonomia sobre as rotas.

4.2 SISTEMAS DE PESAGEM

Após a coleta, os caminhões se dirigem ao aterro para fazer a disposição correta dos resíduos e a pesagem do montante. As unidades de apoio dentro do

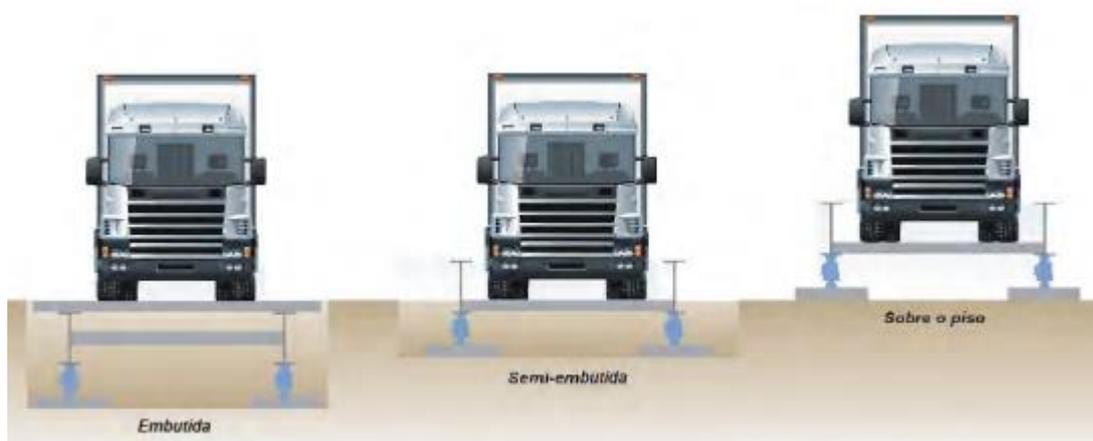
aterro contam com uma espécie de guarita onde são posicionadas as entradas e onde é realizado o gerenciamento de todos os funcionários, caminhões, tratores e máquinas. No momento que o caminhão é liberado para entrar ele se direciona para a balança efetuando assim a pesagem.

A balança visa quantificar os resíduos sólidos e fiscalizá-los conforme os limites estabelecidos no projeto. Se tratando das operações de monitoramento de caminhões, a mais indicada é a balança rodoviária, pois a finalidade é pesar os caminhões que entrarão no aterro.

Gomes (2016) cita em seu trabalho os sistemas e componentes capazes de compor a automação de equipamentos de pesagem. Esses sistemas são consequências do trabalho da empresa Toledo do Brasil, responsável por oferecer soluções de *softwares* em nuvem, balanças integradas à Inteligência Artificial e *Machine Learning* trazendo inovação para os processos de pesagem.

O equipamento durante a instalação recebe uma estrutura de concreto e é composto por uma estrutura de aço. A instalação pode seguir 3 tipos diferentes, embutida, semi-embutida e sobre o piso. Conforme mostrado na Figura (27):

Figura 27: Tipos de instalação



Fonte: Manual Toledo (2023).

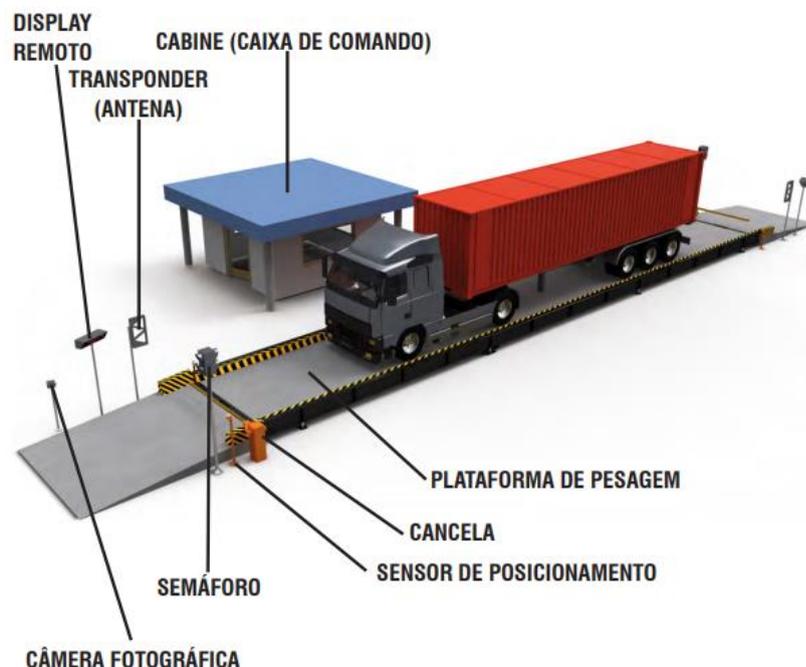
Para a automação da plataforma a Toledo oferece recursos avançados por meio de terminais de pesagens e do *Software Guardian*. Os componentes para automação são os seguintes:

- Cancelas: responsáveis pelo controle de entrada e saída do veículo na plataforma de pesagem;
- Indicador digital: fornece as mensagens orientativas sobre o equipamento e informações da pesagem;

- Semáforos: responsáveis peça sinalização;
- Sensores de Posicionamento: são encarregados de garantir o posicionamento correto do veículo na plataforma de pesagem;
- Transponder ou Código de Barras: responsável por efetuar a pesagem automaticamente, sem intervenção do operador;
- Caixa de Comandos: faz o controle manual dos recursos de automação e acompanhamento através de LED's;
- Câmera Fotográfica: fazem o registro fotográfico do veículo e/ou da carga no momento da leitura do peso para maior controle da operação.

Segue abaixo indicação dos dispositivos, Figura (28):

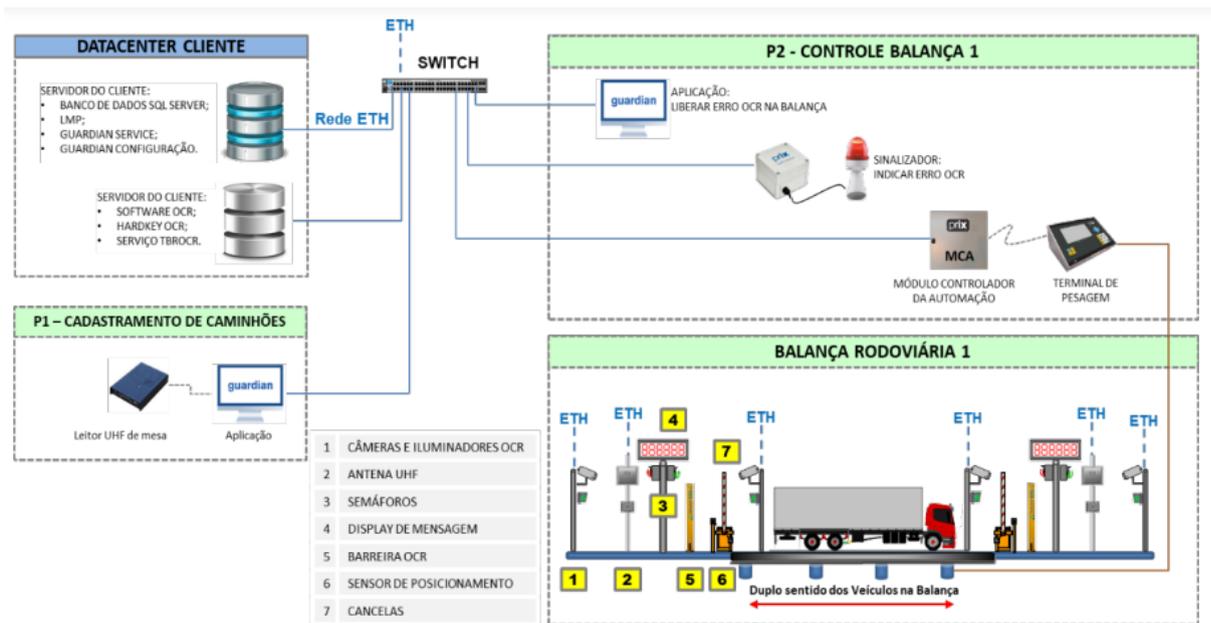
Figura 28: Dispositivos para automação de balança



Fonte: Manual Toledo (2023).

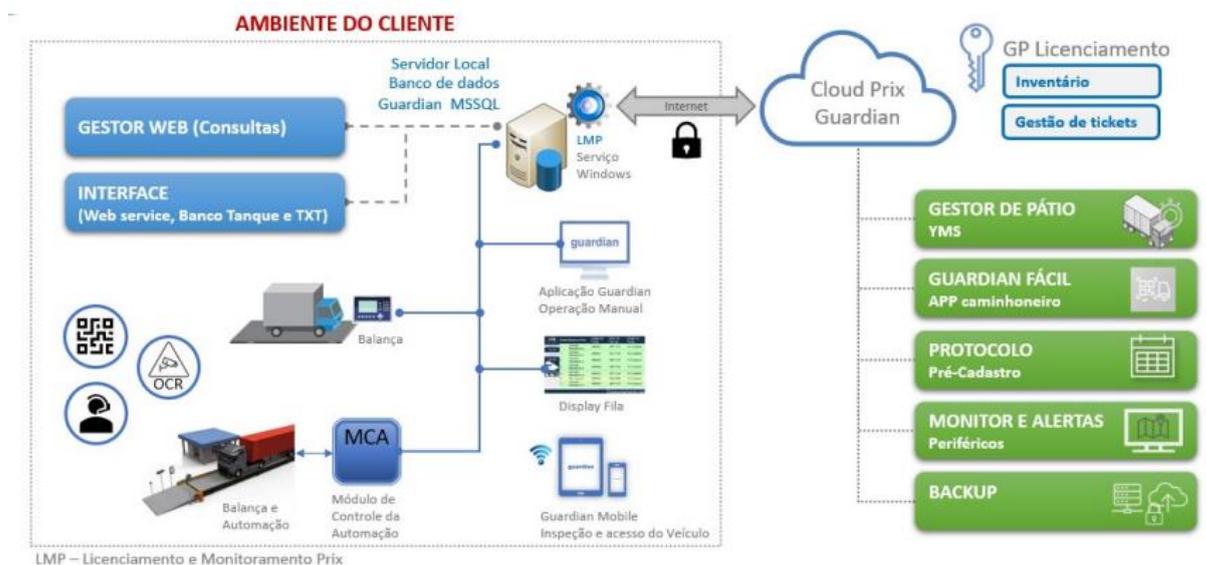
De acordo com o manual da Toledo do Brasil de 2022, o *Software Guardian* é o sistema de gerenciamento das operações de pesagem para recebimento e expedição de materiais. O sistema fornece como opção a pesagem manual, por meio da intervenção humana, e a pesagem automática, com o uso de *Tag* RFID, código de barras ou tecnologia *QR Code* para identificação dos veículos, previamente cadastrados. A edição mais completa e que melhor abrange as possibilidades de monitoramento é a versão Pro. A arquitetura do *Software Guardian* é demonstrada na Figura (29) e (30).

Figura 29: Arquitetura Ilustrativa do Guardian



Fonte: Manual Toledo (2022).

Figura 30: Arquitetura ilustrativa com Cloud Prix



Fonte: Manual Toledo (2022).

O *software* permite o pré-cadastro de veículos, o cadastro de itens, fornecedores, clientes, motoristas e transportadoras. Além disso, permite a pesagem inicial que inclui a obtenção da tara e pesagem bruta do veículo. Possibilita a pesagem final e registro de pesagem no banco de dados, com impressão automática de *tickets*, disponibilização de relatórios e integração de dados com sistema do cliente.

A implementação desse sistema de automação visa tornar o processo de

pesagem mais ágil, mais eficiente e aumentar o nível de confiabilidade dos dados. Além disso, possibilita uma gestão focada na análise de resultados e tomada de decisões mais assertivas para melhoria do processo.

4.3 MONITORAMENTO GEOTÉCNICO E OPERACIONAL

Os aspectos mais relevantes no processo de monitoramento operacional é a verificação dos volumes de resíduos sólidos distribuídos ao longo das células preparadas. O projeto define os limites e a forma como essa disposição deve ser realizada. Logo, a análise do volume e da área de resíduos deve garantir que os prestadores de serviços estejam seguindo à risca todos os parâmetros do projeto.

Para esse levantamento de terreno, atualmente são utilizadas técnicas de obtenção de dados por meio da topografia. Esse método proporciona a representação e o conhecimento de todo o relevo e formas contidas na superfície terrestre. Todavia, o uso convencional desse procedimento pode ser introduzido no âmbito da automação com a utilização de tecnologias já disponíveis no mercado.

Nesse sentido, o uso de Drones para realizar levantamentos como este, tem sido cada vez mais comum, e podem ser utilizados para melhorar a eficiência dos processos de gestão do aterro. Esses dispositivos são alicerçados diante de tecnologias bastante desenvolvidas, facilitando o processo de coleta de dados de alta resolução espacial e temporal, tornando o processo mais rápido, podendo ser repetido por diversas vezes. Além disso, estudos indicam que essa tecnologia quando comparada a outros métodos, inclusive o método tradicional, possuem custos mais baixos.

Para Komazaki et al. (2017),

Os Drones são equipados com um sistema automatizado denominado "*Autopilot*", câmera fotográfica de alta resolução, receptor GNSS - *Global Navigation Satellite System* que possibilita a captura do centro perspectivo na tomada da fotografia, possibilitando o voo automatizado, além de IMU - *Inertial Measurement Unit*, que permite a determinação dos parâmetros de atitude de cada imagem tomada durante o voo e um *link* de rádio que permite o controle remoto da aeronave.

O rebaixamento devido ao adensamento do solo sob a fundação é o que chamamos de recalque. Esse processo é de extrema importância que seja monitorado, pois pode levar a variação volumétrica ou da forma de maciço do solo, além de ocasionar fissuras. Como já mencionado em outro momento, o cálculo do recalque pode ser realizado por meio da topografia.

Alinhado com as descobertas tecnológicas que há no mercado com a necessidade de acompanhar dados importantes relacionados ao solo e ao volume do terreno, pode-se fazer uso da aerofotogrametria por drone que se assemelha bastante ao método de topografia convencional. De acordo com Rodrigues e Gallardo (2018), o dado altimétrico gerado por Aerofotogrametria por Drone permite um melhor delineamento da superfície terrestre através da geração de uma nuvem de pontos em 3D de alta densidade. Além disso, proporciona uma maior segurança aos profissionais que executam o levantamento em detrimento de não haver necessidade de deslocamento deles ao local de coleta.

O drone DJI Phantom 4 apresenta bastante compatibilidade com as atividades realizadas para o monitoramento elencado. Ele possui GPS incluso, conexão com Wifi, atinge velocidade máxima de 58 km/h, possui 4 motores, resolução máxima de 4K, tempo máximo de voo de 30 minutos e tecnologia móvel ao seu alcance. Segue representação do modelo por meio da Figura (31):

Figura 31: Phantom 4 Advanced modelo quadricoptero



Fonte: Site empresa DJI (2018) apud Rodrigues e Gallardo (2018)

Com base no trabalho de Rodrigues e Gallardo (2018), a utilização dessa tecnologia implica na definição de alguns parâmetros que influenciam diretamente no planejamento do voo. Como por exemplo, o *Ground Sample Distance* – GSD, sendo a definição da distância do menor objeto que pode ser identificado em solo através da imagem, similar à resolução espacial. Este se relaciona com a altura de voo e qualidade do sensor (câmera) embarcado no drone. A coleta de dados pode ocorrer a partir do uso de alguns *softwares* específicos, como *Google Earth*, *Map Pilot*, *Photoscan da Agisoft*.

Deve-se considerar e definir os seguintes parâmetros para o voo:

- Tempo de voo (min);
- Altura de voo (m);
- Sobreposição Lateral e Vertical (%);
- Nº de fotos;
- Área mapeada (ha).

Outro importante fator a ser inspecionado com frequência é a compactação dos resíduos, como forma de garantir que estejam seguindo corretamente o que diz as especificações do projeto pode-se utilizar também da tecnologia RFID. As informações sobre os registros de serviços realizados podem ser armazenadas e coletadas por esse sistema proporcionando assim o controle de passadas realizadas, pelos tratores e caminhões, ao longo das operações.

A automação desse tipo de monitoramento demanda menos tempo de operação, aumento na frequência de coleta de dados, o que facilita a manutenção de um histórico fidedigno e pode monitorar áreas com riscos à saúde dos trabalhadores. Por consequência, as alterações no comportamento previsto do maciço poderão ser verificadas com antecedência, fomentando adoção de medidas reativas e evitando possíveis acidentes que comprometam a integridade estrutural das células dos aterros.

4.4 MONITORAMENTO AMBIENTAL

Considerando os conteúdos já tratados sobre o controle ambiental dentro de um aterro tem-se como parâmetros principais a análise da qualidade do meio físico do entorno, da geração de biogás e dos líquidos lixiviados. Além dos parâmetros relacionados a qualidade das águas superficiais e subterrânea.

Para controle e monitoramento da qualidade da água pode-se fazer uso de sensores RSSF. Estes se mostram uma boa opção visto que podem ignorar barreiras de locais remotos e de difícil acesso, ou até mesmo locais com condições adversas ao homem. Esses sensores possibilitam também um aumento de eficiência nas amostragens.

Os sensores inteligentes IoT podem acompanhar parâmetros da qualidade da água em tempo real. As informações coletadas relacionadas a pH, temperatura, OD, presença de metais, dentre outros parâmetros citados na Tabela 3 de “Parâmetros e condicionantes” deste trabalho, são enviados para um sistema central de monitoramento, onde podem ser examinadas e utilizadas para detectar possíveis problemas e, se necessário, tomar medidas corretivas.

A partir do estudo de Lima (2018), constatou-se a possibilidade da utilização de sensores para medição de parâmetros relacionados a qualidade da água e do ambiente. Essa medição segue um fluxo em que a visualização dos dados é online e com aplicabilidade dos conceitos da IoT conjuntamente com a ferramenta Arduino. A coleta e monitoramento pode ser realizada em tempo real. Isto posto, os resultados obtidos pelo estudo podem ser aplicados para o monitoramento ambiental do aterro considerando algumas adaptações.

A medição de parâmetros como temperatura, OD, pH, condutividade, turbidez, potencial de redução de oxidação (ORP), entre outros já anteriormente citados, ganha outra forma com o uso de sensores específicos, esses sensores podem ser adquiridos através da empresa AtlasScientific. Esses sensores constituem-se de conversores/transmissores com comunicação serial, com recepção assíncrona universal ou circuito inter-integrado e modo transmissão.

O kit completo de monitoramento ambiental da água ENV-SDS inclui os seguintes itens:

Tabela 5: Kit AtlasScientific ENV-SDS

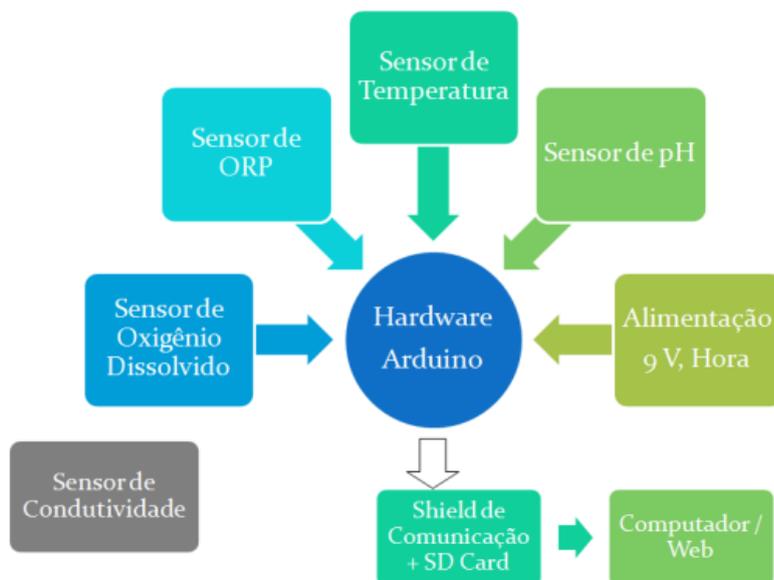
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Circuito de pH EZO™ 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 sonda de oxigênio dissolvido
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Circuito ORP EZO™ 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 sonda de condutividade
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Circuito de oxigênio dissolvido EZO™ 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 sonda de temperatura padrão
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Circuito de Condutividade EZO™ 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 soluções de calibração de pH (4.00, 7.00 e 10.00)
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Circuito de temperatura RTD EZO™ 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 solução de calibração ORP 225mV
<ul style="list-style-type: none"> • 4 placas portadoras EZO™ isoladas eletricamente 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 solução de teste de oxigênio dissolvido
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Placa Transportadora EZO™ 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 soluções de calibração de condutividade
<ul style="list-style-type: none"> • 1 sonda de pH de grau laboratorial 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 solução de armazenamento de pH/ORP
<ul style="list-style-type: none"> • 1 sonda ORP de nível laboratorial 	

Fonte: Autoria própria

A plataforma de prototipagem eletrônica Arduino pode ser utilizada para controles dos fluxos de aplicações IoT, sistemas de automação e outros. A linguagem de programação utilizada na plataforma é a tipo C, além disso possui uma enorme variedade de bibliotecas e exemplos disponíveis.

De acordo com Jiang et al. (2009), a plataforma envia os dados por meio de uma placa de comunicação para a internet e visualização em computador à distância, armazena as informações em banco de dados para transmissão dos dados por comunicação sem fio (APUD LIMA, 2018). A Figura (32) representa a ligação dos sensores ao módulo central do Arduino, com comunicação para servidor *Web* (LIMA, 2018).

Figura 32: Diagrama de Blocos que representa o módulo de integração de sensores



Fonte: Lima (2018)

Lima (2018), concluiu em seu estudo que é necessário a criação de um servidor para receber as informações da coleta de dados, publicar essas variáveis na *Web* e promover a interface com o usuário e, como forma de backup implementou-se a impressão dos dados por meio de Pen Drive (ou Cartão SD).

Esse sistema de monitoramento será composto por um microprocessador, o Arduino, conectado aos sensores e com comunicação para visualização das informações através da internet. Para os locais de mais difícil acesso à internet, podem ser utilizados o envio de dados por GSM (Global System for Mobile Communications). E no caso de haver internet sem fio, utiliza-se o módulo WiFi (Wireless Fidelity).

Segundo Lima (2018), os kits de sensores possuem transmissores e cabos que permitem a conexão com o Arduino, no site do fabricante é disponibilizado o código de programação básica dos sensores com o Arduino, para coleta de dados e calibração. Na Figura (33) são apresentados os sensores que poderão ser utilizados:

Figura 33: Kit de sensores AtlasScientific ENV-SDS



Fonte: AtlasScientific (2018) apud Lima (2018)

O uso de sensores nesse tipo de monitoramento torna o processo mais controlado e possibilita uma antecipação a desastres que possam vir a ter durante a operação dentro do aterro. Há uma melhoria significativa na análise dos dados, pois os parâmetros terão uma ocorrência de coleta seriada e os erros diminuirão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil estando entre os países que mais gera resíduos sólidos, têm como responsabilidade investir em melhores métodos de captação e disposição desses resíduos. Atualmente, muito tem se falado em conservação do meio ambiente, pois é preciso fazer uso dos recursos naturais conscientemente.

Uma das soluções viáveis e que minimizam o impacto ambiental por contaminação do solo, água e ar é a disposição dos RS nos aterros sanitários. Essa solução tem ficado mais evidente nos últimos anos e por isso tem se tornado um assunto bastante relevante. Nesse sentido, a sociedade tem buscado novas formas de gerenciar e monitorar esse tipo de operação na tentativa de minimizar cada vez mais os impactos ambientais e atingir níveis maiores de reaproveitamento.

A manutenção de um aterro sanitário requer um monitoramento muito rigoroso, pois os resíduos passam por decomposição e dos processos são gerados líquidos e gases que por vezes podem ocasionar vazamentos, chegando a contaminar os lençóis freáticos e aquíferos, além de colocar em risco a flora e a fauna localizada nas proximidades.

Considerando o interesse na melhoria dos métodos de gestão da operação no tratamento dos RS, tem sido de grande valia o aprofundamento nas tecnologias existentes advindas do desenvolvimento tecnológico. A coleta de informações e tratamento de dados tem passado por saltos revolucionários, com a possibilidade de coleta das informações em tempo real e integral, em uma velocidade impressionante. Por consequência, a tomada de decisão tem sido mais embasada e com nível mais elevado de confiabilidade. Além disso, é importante destacar que para análise do grande volume de dados gerados é necessário a utilização de recursos como Inteligência Artificial e *Big Data* e *Analytics*.

É considerando a pauta de uso da tecnologia ao favor de processos já existentes que o presente trabalho tem por objetivo demonstrar de que forma a gestão de um aterro pode se mostrar mais eficiente, com menos recursos e menos riscos aos envolvidos nos processos.

Por ser um tema ainda em desenvolvimento e com muitas vertentes em processo de descoberta, alguns temas ainda possuem poucos conhecimentos gerados necessitando de uma pesquisa mais aprofundada e por um período

maior para coletar dados mais fidedignos.

Em contrapartida, o uso de tecnologias como inteligência artificial, IoT, redes sem fio, sensores RFID, entre outros, tem demonstrado grande potencial em gerar excelentes soluções e revolucionar por completo alguns processos. Em ambientes e operações que geram riscos aos trabalhadores esse uso se torna ainda mais aplicável.

O objetivo inicial do projeto de pesquisa foi atendido, considerando que por meio das informações coletadas através da busca bibliográfica foi sugerido sistemas, sensores e automações nos processos relacionados à operação dentro de um aterro sanitário. Os resultados obtidos poderão compor o quadro de atividades do aterro de CGA Baru, construído a pouco tempo, com grande potencial de experienciar as sugestões aqui elencadas.

Como continuidade do trabalho, há possibilidade de complementação do estudo por meio de uma pesquisa mais aprofundada e por um período maior sobre os temas relacionadas às tecnologias já existentes e uso delas no monitoramento e controle de um aterro sanitário. Outra possibilidade de complementação do estudo é em relação ao aprofundamento dos temas relacionados a análise de dados com o uso de Inteligência Artificial e *Big Data* e *Analytics*, pois a partir do momento que são gerados os dados, não se torna muito viável haver uma dependência humana para analisar e checar os resultados advindos desses dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, G. **Como funciona o aterro sanitário?** Disponível em: <<https://www.vertown.com/blog/como-funciona-o-aterro-sanitario/>>. Acesso em: 17 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, NBR 8419**. 1992. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AZEVEDO, M. **Transformação digital na indústria: indústria 4.0 e a rede de água inteligente no Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BAHRIN, M.; OTHMAN, F.; AZLI, N.; TALIB, M. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. **Journal Teknologi**, [s.l.], v. 78, n.6-13, p.137–143, 2016.

BATISTA, H. P. **Desenvolvimento De Diretrizes Para Monitoramento Geotécnico E Plano De Contingência/Emergência Em Aterros Sanitários**. Orientador: Prof. Gustavo Ferreira Simões. 2010. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/FRPC-8DQH33/1/2014_05_04_dissertacao_heuder.pdf. Acesso em: 4 dez. 2023.

BOSCOV, M. E. G. E ABREU, R.C. **Aterros sanitários previsão de desempenho x comportamento real**. In: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / Núcleo Regional de São Paulo (Org.). **Previsão de Desempenho x Comportamento Real**. São Paulo: ABMS/NRSP, 2000.

BOGNER, J.; PIPATTI, R.; HASHIMOTO, S.; DIAZ, C.; MARECKOVA, K.; DIAZ, L.; KJELDEN, P.; MONNI, S.; FAAIJ, A.; SUTAMIHARDJA, R.T.M.; GREGORY, R. (2008) Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). **Waste Management Research**, v. 26, p. 11-32.

BRASIL é o 4º país que mais produz lixo no mundo, diz WWF. 5 mar. 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2019-03/brasil-e-o-4o-pais-que-mais-produz-lixo-no-mundo-diz-wwf>. Acesso em: 26 dez. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005**. Brasília, DF, 2005.

CÂNDIDO, A. C.; ARAÚJO JÚNIOR, R. H. DE .. Potencialidades do desenvolvimento de cloud computing no âmbito da gestão da informação. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 27, n. 1, p. 57–80, jan. 2022.

CGA - Barú. **Barú - Central de Gerenciamento Ambiental**. Águas Lindas de Goiás: CGA Barú, 2019. Disponível em: <https://www.cgabaru.com.br/a-empresa/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

CETESB. **Apêndice D - Índices de Qualidade das Águas**. CETESB, 2017. Publicações e Relatórios. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

COMPORTAMENTO de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação. **Programa De Pós-Graduação Em Saneamento, Meio**

Ambiente E Recursos Hídricos, [s. l.], 12 fev. 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/FRPC-7NXGDZ/1/236d.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2023.

FADE – Fundação Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jaboatão dos Guararapes, PE: Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE, 2014.

FERNANDES, G. L. et al.. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 67–77, jan. 2022.

FUJII, E. H. et al.. Composição granulométrica do filtro ascendente para pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 525–535, maio 2019.

GOMES, B. M. P. **Automação De Balança Rodoviária**: Monografia De Especialização. Orientador: Prof. Kleber Kendy Horikawa Nabas. 2016. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso De Especialização Em Automação Industrial, Departamento Acadêmico De Eletrônica, Escola de Engenharia da UFMG, Curitiba, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17083/1/CT_CEAUT_2015_04.pdf. Acesso em: 4 dez. 2023.

GOMES, P. C. R.; PINEDA, F. J. C.; GARCIA, R. C. **Aterro 4.0 – IOT Conectado**, 2023.

GUBBI, J. et al. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. **Future generation computer systems**, Elsevier, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design principles for industrie 4.0 scenarios**. In: System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on. IEEE, 2016. p. 3928-3937.

HRAD, M.; HUBER-HUMER, M.; WIMMER, B.; REICHENAUER, T.G. (2012) Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfills – an experimental simulation in lysimeters. **Waste Management**, v. 32, n. 12, p. 2324-2335.3

IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica. **Manual de Gerenciamento Integrado. Lixo Municipal**: 2. ed. São Paulo: 2000. p. 29.

JORGE, R. L. **Desenvolvimento De Um Modelo De Estimção De Confiabilidade Para Redes De Sensores Sem Fio**. Orientador: Paulo Eduardo Maciel de Almeida. 2018. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Modelagem Matemática E Computacional, Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

KOHAVI, R.; ROTHLENDER, N.; SIMOUDIS, E. **Emerging Trends in Business Analytics**. Communications of the ACM, v. 45, n. 8, p. 45-48, 2002.

Komazaki, J. M. Camargo, P. O, Galo, M. & Amorim, A. (2017). **Avaliação da Qualidade Geométrica de Modelos Digitais do Terreno Obtidos a Partir de Imagens Adquiridas com VANT**. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro.

KORTUEM, G., KAWSAR, F., SUNDRAMOORTHY, V., & FITTON, D. (2009). **Smart objects as building blocks for the internet of things**. IEEE Internet Computing, 14(1), 44–51.

LIMA, B. et al. **Importância do monitoramento geotécnico em aterros sanitários**:

comparativo entre modelos de piezômetros (elétrico, vector e standpipe), 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/a48048da-ebbb-4638-8294-0eedb952845d>. Acesso em: 1 dez. 2023.

LIMA, E. L.. **Módulo de sensores para monitoramento da qualidade da água com transmissão sem fio utilizando plataforma de prototipagem**. 2018. 79f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2018.

LOPES, Y. M., & MOORI, R. G. (2021). **O papel da IoT na relação entre gestão estratégica da logística e desempenho operacional**. *Revista de Administração Mackenzie*, 22(3), 1–27

MARTINS, A.S. **Influência de produtos de higiene pessoal e limpeza na concentração de sólidos totais, DBO, DQO, nitrogênio total e fósforo total do esgoto doméstico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal De Uberlândia Faculdade De Engenharia Civil. Uberlândia, 2018.

MELLO, C. C. D. S.; SIMÕES, G. F. Aerofotogrametria com VANT aplicada ao monitoramento volumétrico de aterros sanitários. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS (GEOSINTÉTICOS 2019)**, VIII., 2019, São Carlos/SP. REGIO [...]. São Carlos/SP: Congresso Brasileiro de Geossintético, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Caio-Mello-3/publication/340315988_Aerofotogrametria_com_VANT_aplicada_ao_monitoramento_volumetrico_de_aterros_sanitarios/links/5e83d68c299bf130796dbca0/Aerofotogrametria-com-VANT-aplicada-ao-monitoramento-volumetrico-de-aterros-sanitarios.pdf. Acesso em: 9 dez. 2023.

MIORANDI, D., SICARI, S., DE PELLEGRINI, F., & CHLAMTAC, I. (2012). **Internet of things: Vision, applications and research challenges**. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497–1516.

MONOSTORI, L. et al. **Cyber-physical systems in manufacturing**. *CIRP Annals*, v. 65, n. 2, p. 621-641, 2016.

MOTA, P. **Indústria 4.0: implicações de um novo contexto da produção**. 2018. 112 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção)—Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NÓBREGA, B. M. A. **Estudo de caso sobre a instrumentação geoambiental instalada no aterro sanitário no município de Campina Grande/PB**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.)

NIST. **NIST Big Data Interoperability Framework: Volume 1, Definitions**. v. 1, p. 32, 2015.

OLIVEIRA, A. P.; OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. **INDÚSTRIA 4.0: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**. *Revista Produção e Desenvolvimento*, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 111–124, 2018. DOI: 10.32358/rpd.2018.v4.316. Disponível em: <https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesarvolvimento/article/view/e316>. Acesso em: 17 jul. 2023.

OLIVEIRA, S. DE .; PASQUAL, A.. **Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário**. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 9, n. 3, p. 240–249, jul. 2004.

PANORAMA: PANORAMA 2022. **ABRELPE**, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 12 nov. 2023.

PASSOS, A. L. L.; MUNIZ, D. H. DE F.; OLIVEIRA FILHO, E. C. Critérios para Avaliação da Qualidade de Água no Brasil. **Revista Fronteiras de Ciências Sociais Tecnológicas e Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 290-303, 2018.

PINHEIRO, J. M. dos S. Identificação por Radiofrequência: Aplicações e Vulnerabilidades da Tecnologia RFID. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, v. 1, n. 2, p. 18–32, 2017. DOI: 10.47385/cadunifoa.v1.n2.889. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/889>. Acesso em: 6 dez. 2023.

POÇO, L. D.; SOUZA, V. S. **Análise Dos Tipos De Sensores Utilizados Na Automação De Esteiras Transportadoras**. Orientador: José Antonio Poletto Filho. 2021. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Faculdade de Tecnologia de Garça- Fatec, Garça, 2021. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/8096/1/Mecatrac3%b4nica_%202021_1_Luciano%20Dal%20Po%20a7o%203b%20Valmir%20Silva%20Souza_%20An%20a1lise%20dos%20tipos%20de%20sensores%20utilizados%20na%20automa%20a7o.pdf. acesso em: 10 dez. 2023.

RAMOS, A. D. S.; OLIVEIRA, V. D. P. S. DE; ARAÚJO, T. M. DE R. Qualidade da água: parâmetros e métodos mais utilizados para análise de água de recursos hídricos superficiais. **Holos Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 205, 2019.

REICHERT, G. A.; SILVA, A. A.; FLECK, E. Proteção De Águas Subterrâneas Na Implantação De Aterro Sanitário. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], n. 1, 1998. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22297>. Acesso em: 26 nov. 2023.

ROCHA, I. F.; KISSIMOTO, K. O.. Artificial intelligence and internet of things adoption in operations management: Barriers and benefits. **RAM. Revista de Administração Mackenzie**, v. 23, n. 4, p. eRAMR220119, 2022.

RODRIGUES, D. A.; GALLARDO, A. L. C. F. Vantagens Da Aerofotogrametria Por Drone Na Obtenção De Dados Topográficos Em Estudos De Lixões E Aterros Sanitários. **Anais do VII SINGEP**, São Paulo – SP, 22 jul. 2018 2317-8302. Disponível em: <https://www.singep.org.br/7singep/resultado/209.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2023.

RODRIGUES, M. T. et al. Sensoriamento Remoto E Geoprocessamento Aplicado Ao Uso Da Terra Para Avaliação Entre Classificadores A Partir Do Índice Kappa. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal Re.C.E.F.**, Garça, SP, ed. v.23, 6 fev. 2014. Disponível em: http://www.fae.f. revista. inf. br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/O0Rjlxkc3ZmG8WV_2014-6-13-14-26-43.pdf. Acesso em: 6 dez. 2023.

SA, J. S. **DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS**. Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, 2012.

SALLES, N. A.; SOUZA, T. S. O. DE .. Aplicabilidade do Activated Sludge Model No. 1 (ASM 1) para simulação do cotratamento de esgoto sanitário e lixiviado de aterro sanitário em lagoas aeradas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 293–301, mar. 2020.

SAUER, E. P.; VANDEWALLE, J. L.; BOOTSMA, M. J.; MCLELLA, N. S. L. Detection of the human-specific Bacteroides genetic marker provides evidence of widespread sewage contamination of stormwater in the urban environment. **Water Research**, v. 45, n. 14, p. 4081-4091, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.049>

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SEUFITELLI, C. B.; HENRIQUE, D. F.; ROSA, S. I.; CARVALHO, R. A. de. Tecnologia

RFID e seus benefícios. **Revista Vértices**, [S. l.], v. 11, n. 1/3, p. 19–26, 2010. DOI: 10.5935/1809-2667.20090002. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20090002>. Acesso em: 6 dez. 2023.

SIDHU, J. P.; HODGERS, L.; AHMED, W.; CHONG, M. N.; TOZE, S. Prevalence of human pathogens and indicators in stormwater runoff in Brisbane, Australia. **Water Research**, v. 46, n. 20, p. 6652-6660, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.012>

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. Colaboração técnica para o livro Tratamento de Minérios. Edição 5 - Capítulo 19 – pág. 831-896. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). 2010.

SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A. Desafios em redes de sensores sem fio. **dados**, v. 2, p. 3, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 9.

SOUZA, A. D. R. et al. Monitoramento Ambiental: Estudo De Caso Dos Piezômetros Do Aterro Sanitário Areias Brancas – Formiga MG. **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017**, Maceió, AL, 30 jul. 2017.

TENUTTI, J. The global positioning system (GPS) in precision forestry. **Scientific Electronic Archives**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 42–46, 2014. DOI: 10.36560/822015181. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/view/181>. Acesso em: 6 dez. 2023.

TOLEDO DO BRASIL. Toledo do Brasil Indústria de Balanças Ltda. **Manual - Balança Inteligente para Caminhões**. São Bernardo do Campo, SP: Toledo do Brasil, 2016. Disponível em: https://www.toledobrasil.com/blob/manuals/54_pt_manual_1574116933.pdf. Acesso em: 4 dez. 2023.

ZUCHERATTO JÚNIOR, N. L. **Revisão Bibliográfica Sobre Segurança Em Barragens De Terra Por Meio De Instrumentação Geotécnica**: Monografia De Graduação Em Engenharia De Controle E Automação. Orientador: Prof. Diógenes Viegas Mendes Ferreira, Me. 2021. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Departamento De Engenharia Controle E Automação, Universidade Federal De Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3813/3/MONOGRAFIA_Revis%c3%a3oBibliogr%c3%a1ficaSeguran%c3%a7a.pdf. acesso em: 7 dez. 2023.