



JOÃO MARIA ESTEVENS MALTA VACAS

Licenciado em Engenharia do Ambiente

Cenários de Evolução da Produção de Energia por Biogás de aterro – Caso de estudo nos aterros da AMARSUL S.A.

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa

Novembro, 2021



JOÃO MARIA ESTEVENS MALTA VACAS

Licenciado em Engenharia do Ambiente

Cenários de Evolução da Produção de Energia por Biogás de aterro – Caso de estudo nos aterros da AMARSUL S.A.

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa

Novembro, 2021



Cenários de Evolução da Produção de Energia por Biogás de aterro – Caso de estudo nos aterros da AMARSUL S.A.

JOÃO MARIA ESTEVENS MALTA VACAS

Mestre/Licenciado em Engenharia do Ambiente

Orientadora: Artur João Lopes Cabeças,
Professor Auxiliar Convidado (Aposentado), FCT-NOVA

Júri:

Presidente: Prof^a Doutora Ana Isabel Espinha da Silveira,
Professor(a) Catedrático(a), FCT-NOVA

Arguentes: Mestre Rui Rosado de Sousa Dores,
Professor Associado, FCT-NOVA

Orientador: Artur João Lopes Cabeças,
Professor Auxiliar Convidado (Aposentado), FCT-NOVA

Cenários de Evolução da Produção de Energia por Biogás de aterro – Caso de estudo nos aterros da AMARSUL S.A.

Copyright © João Maria Estevens Malta Vacas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, o Professor Artur João Cabeças, pela disponibilidade, pelas experiências partilhadas, pelos conhecimentos transmitidos e pelo esclarecimento de dúvidas ao longo destes meses.

À AMARSUL S.A. por ter aceitado o meu estágio, ao Engenheiro Nuno Lobato, João Sarmento, Vera Oliveira, Paulo Almeida e Paulo Antunes pelo acompanhamento ao longo destes meses. Foram todos incríveis, tiveram sempre disponíveis para me esclarecerem dúvidas, transmitir conhecimentos e para me auxiliar nas atividades relacionadas com este estudo.

À minha família, colegas e amigos por me terem acompanhado neste longo percurso na Faculdade, pois foram muito importantes nestes anos.

RESUMO

A deposição em aterro da fração biodegradável dos resíduos urbanos, por força da sua degradação biológica ao longo do tempo, gera dois efluentes residuais, os lixiviados e o biogás que, se não forem controlados e tratados, promovem impactes ambientais significativos no meio recetor natural. Ora, em Portugal, o total de resíduos depositados em aterro, por via direta e indireta, constituiu aproximadamente 58,4% do total dos resíduos urbanos produzidos, pelo que se coloca o problema do controlo dos potenciais impactes ambientais associados à presença do dióxido de carbono e metano no biogás gerado, este último um dos principais gases de efeito de estufa (GEE) pelo que a sua emissão para a atmosfera tem de ser evitada.

Sendo o biogás de aterro o tema da presente dissertação, recorreu-se inicialmente a uma revisão da literatura, à legislação em vigor e à coleta de dados de campo dos Aterros do Seixal e de Palmela da concessionária AMARSUL S.A. Paralelamente efetuou-se a construção de dois "biorreatores piloto"; um simulando as condições exigidas para os aterros de futuro pós-2035, confinando-se apenas a "Fração Resto" da TMB do Seixal e, o outro, confinando-se a atual recolha indiferenciada de RU para comparação da respetiva produção e evolução do biogás gerado. Efetuadas as respetivas medições do biogás ao longo de 4 meses, realizaram-se cenários comparativos entre os dados reais de biogás captado (nos biorreatores e nos aterros em exploração) e os estimados até 2035 pelo programa LandGEM, ponderando-se os valores e as fases de biodegradabilidade, as emissões associadas e evitadas de GEE e, os impactos provocados pelo desvio dos biorresíduos de aterro e pela suspensão do regime de remuneração garantida da energia de biogás de aterro em 2022, nomeadamente, a perda de receitas resultantes, com a evidente repercussão na tarifa a praticar pela concessionária ao município.

Do caso de estudo desenvolvido, acompanhado e estudado, concluiu-se que a recolha seletiva de biorresíduos tem forte impacto positivo na geração de biogás e nas emissões de GEE nas condições dos aterros de nova geração, ou seja, uma redução superior a 35% na produção de biogás e cerca de 33% na redução das emissões evitadas. Acresce também uma redução nos proveitos provenientes da injeção da energia devido a suspensão da subsídio do regime de remuneração garantida que se estima em cerca de 33% das condições atuais.

Palavras-chave: Aterro, biogás, metano, tratamento mecânico biológico, TMB, recolha seletiva de biorresíduos, Gás de efeito de estufa, GEE.

ABSTRACT

The landfilling of the biodegradable fraction of municipal waste produces, during its biological degradation, two waste effluents, leachate, and biogas which, if not controlled and treated, promote significant environmental impacts on the environment. However, in Portugal, the total waste landfilled, directly and indirectly, constituted approximately 58.4% of the total municipal waste produced, so the problem of controlling the potential environmental impacts associated with the presence of carbon dioxide and methane in the biogas generated, the latter one of the main greenhouse gases GHGs therefore, its emission into the atmosphere must be avoided. Landfill biogas being the theme of this dissertation, we initially resorted to a literature review, the legislation in force and the field data collection of the Seixal and Palmela Landfills of the concessionaire AMARSUL S.A. In parallel, two "pilot bioreactors" were built; one simulating the conditions required for landfills for the post-2035 future, confining only the "Rejects Fraction" of Seixal TMB and the other, confining only municipal waste collection to compare the respective evolutions of the biogas generated. The respective biogas measurements have been carried out over 4 months, comparative scenarios were carried out between the actual biogas data captured (in bioreactors and landfills in operation) and those estimated by 2035 by the LandGEM program, considering the values and biodegradability phases, the associated and avoided GHG emissions and the expected impacts on the diversion of landfill bio-waste and the suspension of the guaranteed remuneration scheme in 2022 of landfill biogas, in particular the resulting financial losses, with evident repercussion on the tariff to be practiced by the concessionaire to the municipality.

From the case study developed, followed, and studied, it was concluded that the selective collection of biowaste has a strong positive impact on biogas generation and GHG emissions in the conditions of new generation landfills, i.e., a reduction of more than 35% in biogas production and about 33% in the reduction of avoided emissions. In addition, there is also a reduction in the income from the injection of energy due to the suspension of the subsidy of the guaranteed remuneration scheme, which is estimated at around 33% of the current conditions.

Keywords: Landfill, biogas, methane, biological mechanical treatment, TMB, selective collection of biowaste, Greenhouse gas, GHG.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento geral.....	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Relevância do tema.....	4
1.4	Estrutura da dissertação	5
2	REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1	Gestão de resíduos urbanos em Portugal Continental.....	7
2.1.1	Modelos de gestão.....	7
2.1.2	Produção de Resíduos Urbanos	9
2.1.3	Caracterização Física de resíduos urbanos.....	9
2.1.4	Posicionamento Nacional face às metas.....	10
2.1.5	Tratamento e valorização de resíduos urbanos	12
2.2	Sistema integrado de Resíduos Urbanos.....	14
2.2.1	Confinamento técnico. Aterro sanitário	15
2.2.2	Tratamento Mecânico e Biológico (TMB)	24
2.2.3	Tratamento Mecânico	25
2.2.4	Tratamento Biológico.....	25
2.2.5	Valorização Energética.....	27
2.3	Decomposição dos resíduos urbanos	27
2.4	Biogás	30
2.4.1	Fatores que influenciam a produção.....	30

2.4.2	Composição do Biogás.....	32
2.5	Modelos de previsão da produção de biogás	33
2.5.1	Modelo IPCC.....	33
2.5.2	Modelo LandGEM.....	34
2.6	Modelo aritmético para a projeção de população.....	35
2.7	Gases de efeito de estufa.....	35
2.8	Alterações Climáticas.....	37
2.9	Energia renovável. Sistema fotovoltaico	40
2.10	Estudos experimentais.....	41
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	Objetivos específicos	45
3.2	Prospetiva futura. Pressupostos.	46
3.3	Caso de Estudo	51
3.3.1	Sistema Multimunicipal da AMARSUL SA.....	52
3.3.2	Balanço e Prospetiva futura da recolha de RU	64
3.3.3	Produção de biogás.....	66
3.4	Biorreatores Pilotos	68
3.4.1	Execução do biorreatores	68
3.4.2	Planeamento e Trabalhos de Campo.....	69
3.4.3	Enchimento dos biorreatores	72
3.4.4	Precipitação na zona dos biorreatores	76
3.4.5	Medições de campo nos biorreatores	77
4	TRATAMENTO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	79
4.1	Medições de biogás nos biorreatores.....	79
4.2	Biogás captado nos aterros e na CVO	81
4.3	Simulação pelo modelo LandGEM.	83
4.4	Entrada de RU nas instalações da AMARSUL.....	85
4.4.1	Deposição de RU nos aterros (1998-2015)	85
4.4.2	Prospetiva dos RU na AMARSUL.....	85
4.5	Cenários prospetivos. Produção de biogás e energia.....	86

4.6	Emissões associadas e evitadas	91
4.6.1	Emissões associadas e evitadas. CENÁRIO 1	94
4.6.2	Emissões associadas e evitadas. CENÁRIO 2.....	95
5	ANÁLISE CRÍTICA	97
5.1	Biorreatores Pilotos	97
5.2	Produção de Lixiviados	100
5.3	Cenários simulados	101
5.4	Análise económica da valorização energética do biogás	102
5.5	Painéis Fotovoltaicos	104
5.6	Análise de custos.....	105
6	CONCLUSÕES.....	107
6.1	Síntese conclusiva	107
6.2	Limitações e desenvolvimentos futuros	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Mapa da distribuição dos SGRU em Portugal Continental (RARU 2019, julho 2020).....	7
Figura 2. 2 - RUB depositados em aterro, em Portugal (RARU 2019, julho 2020).....	9
Figura 2. 3 - Caracterização física dos RU produzidos em 2019 (Fonte: APA, 2019).....	9
Figura 2. 4 - Evolução dos quantitativos de RUB depositados em aterro. (RARU, 2019)	10
Figura 2. 5 - Cálculo da taxa de reciclagem de resíduos domésticos e semelhantes.....	11
Figura 2. 6 - Cálculo da meta de preparação para reutilização e reciclagem (RARU 2019, julho 2020).....	11
Figura 2. 7 - Evolução do resultado do cálculo da meta de retoma de recolha seletiva.	12
Figura 2. 8 - Destinos finais dos RU geridos pelos SGRU de Portugal Continental.	13
Figura 2. 9 - Destino direto dos RU (RARU 2019, julho 2020).....	13
Figura 2. 10 - Sistema integrado de resíduos urbanos (Levy e Cabeças, 2006).....	14
Figura 2. 11 - Localização do Ecoparque do Seixal (a vermelho) tendo em conta as áreas residenciais mais próximas. Fonte: Google Earth.....	17
Figura 2. 12 -Sistema de impermeabilização basal do aterro (Levy e Cabeças, 2006)....	19
Figura 2. 13 - Vala de ancoragem dos Geocompósitos dos Taludes internos (Adaptado de Dores, 2020).....	20
Figura 2. 14 - Representação da travessia sistema de impermeabilização. (Adaptado de Dores, 2020).....	20
Figura 2. 15 - Talude e banquetas de pé de talude da célula D do Ecoparque do Seixal. (Foto do autor).....	21
Figura 2. 16 - Dreno vertical com acessório de tubagem curvo e dreno horizontal . (Foto do autor).....	21
Figura 2. 17 - Sistema de drenagem de lixiviados e águas pluviais. (Adaptado de Dores, 2020).....	22
Figura 2. 18 - Queimador do biogás gerado, do biogás excedente de aproveitamento ou como emergência.....	23
Figura 2. 19 - Motor de Biogás (Foto do autor).....	23
Figura 2. 20 - Circuito de emergência para a queima de biogás. (Foto do autor).....	24
Figura 2. 21 - Diagrama convencional do funcionamento do TMB. (Piedade e Aguiar, 2010).....	25
Figura 2. 22 - Esquema de um processo de compostagem (Rynk,1992)	26

Figura 2. 23 - Fases de decomposição dos resíduos em aterro (fonte: Tchobanoglous,1994).....	28
Figura 2. 24 - Produção de biogás a partir da matéria orgânica (Fonte: Amarsul, 2000).....	30
Figura 2. 25 - Emissões históricas e projeção para 2050 de gases de efeito de estufa na UE-28, 1990 2050 (Fonte: SOER 2020).....	40
Figura 2. 26 - Composição Física do Rejeitado em várias unidades TMB (Fonte: Máximo, 2013).....	43
Figura 3. 1 - Total de resíduos recolhidos de forma seletiva e indiferenciada, em Portugal. (Fonte: PorDATA, 2020).....	46
Figura 3. 2 - Caracterização física média dos RU em Portugal, em 2019. Fonte: APA.....	48
Figura 3. 3 - Evolução estimada da produção e da recolha seletiva Tri-fluxo.....	49
Figura 3. 4 - Estimativa da evolução da recolha seletiva de biorresíduos.....	50
Figura 3. 5 - Estimativa da evolução da taxa de reciclagem no período 2020-2035.....	51
Figura 3. 6 - Municípios que integram a AMARSUL.....	53
Figura 3. 7 - AMARSUL S.A. - Cadeia de valor (R&C de 2019).....	54
Figura 3. 8 - Diagrama da TMB de Setúbal.....	56
Figura 3. 9 - Fotos da linha de processo da TMB de Setúbal.	57
Figura 3. 10 - Diagrama de processo da CVO do Ecoparque do Seixal. Fonte: Amarsul S.A.	60
Figura 3. 11 - Fossas de descarga dos RU. Foto do autor.....	61
Figura 3. 12 - Tapete transportador a montante do abre-sacos.	61
Figura 3. 13 - Crivo rotativo.....	62
Figura 3. 14 - Armazenamento Intermédio da Matéria Orgânica para alimentação do digestor anaeróbio.....	63
Figura 3. 15 - Tubagens dos circuitos do digestor anaeróbio.....	63
Figura 3. 16 - Queimador de Emergência do digestor anaeróbio.	63
Figura 3. 17 - Gráfico da evolução estimada da recolha tri-fluxo, no contexto da Amarsul SA.....	65
Figura 3. 18 - Evolução estimada da recolha de Biorresíduos na Amarsul S.A.	65
Figura 3. 19 - Sistema de captação e aproveitamento energético do biogás (fonte: AMARSUL).....	66
Figura 3. 20 - Representação da zona do aterro experimental. Fonte: Google Earth. Legenda: 1 - Portaria; 2 - Área do biorreator piloto ; 3 - Oficina; 4 - CTA.....	69
Figura 3. 21 - Escavação e início da colocação do sistema de impermeabilização do biorreator. (Foto do autor).....	70
Figura 3. 22 - Sistema de drenagem de lixiviados e camada drenante no início da execução (Foto do autor).....	70

Figura 3. 23 - Dreno de biogás envolvido pelo tubo guia, dentro da massa de resíduos. (Foto do autor)	71
Figura 3. 24 - Retirada do tubo guia envolvente da tubagem de drenagem do biogás. (Foto do autor)	71
Figura 3. 25 - Colocação da geomembrana seguida da deposição das terras de cobertura. (Foto do autor)	72
Figura 3. 26 - Colocação da amostra na Mufla pelo autor. (Foto de Paulo Almeida).....	76
Figura 3. 27 - Dados climatológicos para a zona de Vale de Milhaços.....	77
Figura 3. 28 - O autor a realizar uma medição do biogás.....	78
Figura 3. 29 - Aparelho (GA 5000) utilizado para realizar medições do biogás. (Foto do autor).....	78
Figura 4. 1 - Evolução da produção de energia pela CVO com a RS de biorresíduos.Figura 3. 30 - Aparelho (GA 5000) utilizado para realizar medições do biogás. (Foto do autor)	78
Figura 4. 1 - Evolução da produção de energia pela CVO com a RS de biorresíduos.Figura 3. 30 - Aparelho (GA 5000) utilizado para realizar medições do biogás. (Foto do autor)	78
Figura 4. 2 - Gráfico da evolução das medições do biogás nos biorreatores piloto.	80
Figura 4. 3 - Valores obtidos nas medições efetuadas no biorreator piloto 2 com Resíduos Indiferenciados.....	81
Figura 4. 4 - Evolução da produção de energia pela CVO com a RS de biorresíduos.	90
Figura 5. 1 - Produção de metano nos biorreatores piloto	99
Figura 5. 2 - Receitas Acumuladas na venda da Energia Elétrica	104
Figura A. 1 - RU depositados nos aterros da Amarsul.....	127
Figura A. 2 - Biogás gerado e exportado no Aterro de Palmela.....	127
Figura A. 3 - Biogás gerado e exportado no Aterro do Seixal.....	128
Figura A. 4 - Energia Fornecida à REN pelos aterros da Amarsul.....	128
Figura A. 5 - Análise do Lixiviado do dia 28 de julho.....	128
Figura A. 6 - Análise do Lixiviado do dia 18 de agosto.....	128
Figura A. 7 - Análise do Lixiviado do dia 1 de setembro.....	128
Figura A. 8 - Análise do Lixiviado do dia 29 de setembro.....	128

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 - SGRU em Portugal Continental.....	8
Tabela 2. 2 - Infraestruturas de gestão dos SGRU no Continente (Fonte: RARU, 2019)....	8
Tabela 2. 3 - Posicionamento de Portugal face à meta de prevenção de resíduos.	10
Tabela 2. 4 - Posicionamento de Portugal face à meta de deposição de RUB em aterro. (RARU, 2019).....	11
Tabela 2. 5 - Meta de Preparação para reutilização e reciclagem de 2020 (Fonte: RARU 2019).....	12
Tabela 2. 6 - Fatores a serem considerados para uma determinada classe de aterro.	18
Tabela 2. 7 - Composição típica do biogás (Fonte: Cabeças, 2014).....	33
Tabela 3. 1 - Evolução assumida para a produção total de resíduos até 2035.....	47
Tabela 3. 2 - Estimativa da evolução da recolha seletiva de RU.....	48
Tabela 3. 3 - Estimativa da evolução de resíduos em Portugal Continental (ton/ano)....	49
Tabela 3. 4 - Estimativa da Recolha Seletiva Tri-fluxo (ton)	49
Tabela 3. 5 - Estimativa da recolha de biorresíduos.....	50
Tabela 3. 6 - Estimativa da evolução para a meta de preparação para reutilização e reciclagem.	51
Tabela 3. 7 - Densidade populacional da área de exploração. (Fonte: PORDATA, 2019)	54
Tabela 3. 8 - AMARSUL S.A. - Receção de resíduos (R&C de 2019).	55
Tabela 3. 9 - AMARSUL S.A. - Receção de resíduos por município (R&C de 2019).....	55
Tabela 3. 10 - AMARSUL S.A. - Resíduos diretos entrados no sistema AMARSUL (R&C de 2019).....	56
Tabela 3. 11 - Fluxos na Estação de Compostagem (ton) (R&C 2019).....	59
Tabela 3. 12 - Fluxos na CVO Seixal (ton) (R&C 2019)	62
Tabela 3. 13 - Estimativa da evolução da produção de RU na AMARSUL.	64
Tabela 3. 14 - Estimativa da evolução da recolha seletiva tri-fluxo na AMARSUL.....	64
Tabela 3. 15 - Estimativa da evolução da Recolha Seletiva de Biorresíduos.....	65
Tabela 3. 16 - Evolução das médias anuais da energia com base no biogás gerado (ton) (R&C 2019).....	67
Tabela 3. 17 - Dados relacionados com o Aterro do Seixal.....	67
Tabela 3. 18 - Dados relacionados com o Aterro de Palmela.....	67

Tabela 3. 19 - Planeamento das atividades para a construção e monitorização dos biorreatores	69
Tabela 3. 20 - Resumo das descargas com fração resto depositada no Biorreator Piloto 1.....	73
Tabela 3. 21 - Densidade da fração resto depositada no Biorreator Piloto 1.....	73
Tabela 3. 22 - Caracterização física da fração resto no ano 2020.....	74
Tabela 3. 23 - Enchimento do biorreator piloto 2 com descarga de RU indiferenciados.	75
Tabela 3. 24 - Densidade da massa dos RU indiferenciados depositados no biorreator piloto 2	75
Tabela 3. 25 - Determinação da humidade e matéria seca.	76
Tabela 4. 1 - Medições efetuadas dois biorreatores piloto, de julho a setembro de 2021.	79
Tabela 4. 2 - Medições efetuadas nos biorreatores piloto em outubro e novembro de 2021.....	80
Tabela 4. 3 - Resíduos diretos entrados nas instalações da Amarsul SA. (ton/ano).	81
Tabela 4. 4 - Medições anuais de CH ₄ efetuadas nas instalações da Amarsul SA.....	82
Tabela 4. 5 - Produção de energia e receitas em regime de bonificação da tarifa garantida.	82
Tabela 4. 6 - Caracterização Física das frações dos RU consideradas para o cálculo do fator DOC.....	84
Tabela 4. 7 - Parâmetros considerados para os cálculos dos L ₀	84
Tabela 4. 8 - Resíduos diretos entrados nas instalações da Amarsul SA entre 1998 e 2015. (ton/ano).....	85
Tabela 4. 9 - Resíduos diretos entrados nas instalações da Amarsul SA. (ton/ano).	86
Tabela 4. 10 - Biogás gerado no Cenário 1 e Cenário 2	88
Tabela 4. 11 - Variação do Biogás gerado entre Cenário 1 e Cenário 2.....	89
Tabela 4. 12 - Diferença de Energia gerada (MWh).....	89
Tabela 4. 13 - Energia produzida, em média, pela CVO (MWh)	90
Tabela 4. 14 - Percentagem de Valorização de Biogás no ASP.....	93
Tabela 4. 15 - Percentagem de Valorização de Biogás no ASS.....	93
Tabela 4. 16 - Biogás Captado, Energia potencial do biogás captado e de energia produzida para o cenário 1.....	94
Tabela 4. 17 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 1.....	95
Tabela 4. 18 - Biogás Captado, Energia potencial do biogás captado e potencial de energia produzida para o cenário B da Amarsul.....	95
Tabela 4. 19 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 2 na Amarsul.....	96
Tabela 5. 1 - Percentagem de biorresíduos existente nos biorreatores 1 e 2.....	97

Tabela 5. 2 - Análises efetuadas à produção de lixiviados do biorreator piloto 1 da Amarsul.....	100
Tabela 5. 3 - Avaliação do Índice de Biodegradabilidade do Biorreator Piloto 1.....	100
Tabela 5. 4 - Energia injetada e receitas obtidas (últimos 3 anos) na AMARSUL (R&C, 2019).....	102
Tabela 5. 5 - Produção de Energia de acordo com os Cenários prospectivos analisados, C1 e C2.....	103
Tabela 5. 6 - Comparação dos proveitos obtidos e do desvio até 2035, pela entrega na REN da energia produzida.....	103
Tabela 5. 7 - Produção de Energia com o painel, nas condições mínimas e máximas.	104
Tabela 5. 8 - Produção de Energia, em MWh, a partir dos painéis fotovoltaicos.....	105
Tabela 5. 9 - Preço unitário e custo total dos painéis. (Fonte: Portal Solar).....	105
Tabela 5. 10 - Custo de manutenção por ano a 65 e 85€.....	106
Tabela 5. 11 - Resultado obtido após os 15 anos de projeto.....	106
Tabela 5. 12 - Resultado da Receita perdida com a contribuição dos Painéis, nas condições consideradas.....	106
Tabela A. 1 - Características do biogás produzido no biorreator implementado na Algar S.A.....	117
Tabela A. 2 - Caracterização física, média, a nível nacional, considerado para o subcapítulo 3.2 e 5.1.....	117
Tabela A. 3 - Biogás gerado determinados no Cenário 1 e Cenário 2.....	118
Tabela A. 4 - Comparação da Energia Potencial produzida e injetada na REN entre o Cenário 1 e 2.....	119
Tabela A. 5 - Biogás captado e emitido para o Cenário 1, em m ³ /ano.....	120
Tabela A. 6 - Biogás captado e emitido considerado para o Cenário 2, em m ³ /ano.....	121
Tabela A. 7 - Densidade considerada a utilizar para os Cenários 1 e 2.....	122
Tabela A. 8 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 1.....	122
Tabela A. 9 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 2.....	123
Tabela A. 10 - Cálculos efetuados para o Cenário simulado no subcapítulo 5.2.....	124
Tabela A. 11 - Dimensão do Painel Fotovoltaico.....	125
Tabela A. 12 - Característica do Painel Fotovoltaico considerado.....	125
Tabela A. 13 - Comparação da produção de energia, estimada, a partir do biogás produzidos nos aterros com a produção de energia através de painéis fotovoltaicos.....	125
Tabela A. 14 - Investimentos e custos de manutenção.....	125
Tabela A. 15 - Geração de Receitas, por ano, considerando o valor de venda de 100 €/MWh.....	126
Tabela A. 16 - Receita Acumulada ao fim de 15 anos.....	126
Tabela A. 17 - Lucro acumulado, mínimo, médio e máximo, da Análise Financeira.....	126

Tabela A. 18 - Coeficientes Técnicos considerados. Fonte: PERSU 2020..... 127

SIGLAS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CCV	Compromisso para o Crescimento Verde
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CQO	Carência Química de Oxigénio
CVO	Central de Valorização Orgânica
DA	Digestão Anaeróbia
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DQR	Diretiva Quadro de Resíduos
ENAAAC 2020	Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas
ERM	Estação de Regularização e Medição
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ETAL	Estação de Tratamento de Águas Lixiviantes
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
GEE	Gás com Efeito de Estufa
IB	Índice de Biodegradabilidade

INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LandGEM	Landfill Gas Emissions Model
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PCI	Poder Calorífico Inferior
PERSU	Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos
PIB	Produto Interno Bruto
PNAC	Programa Nacional para as Alterações Climáticas
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
QEPiC	Quadro Estratégico para a Política Climática
RARU	Relatório Anual de Resíduos Urbanos
REA	Relatório do Estado do Ambiente
RESP	Rede Elétrica De Serviço Público
RNC 2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
RU	Resíduos Urbanos
RUB	Resíduos Urbanos Biodegradáveis
SGRU	Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos
SIGRE	Sistema Integrado de Gestão dos Resíduos de Embalagens
TM	Tratamento Mecânico
TMB	Tratamento Mecânico e Biológico

UE	União Europeia
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
wp	watt-pico

SÍMBOLOS

CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CBO ₅	Carência Bioquímica de Oxigênio no final de 5 dias
O ₂	Oxigênio

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Em Portugal, a produção de resíduos urbanos tem vindo a aumentar todos os anos, apenas verificando-se a sua estabilização e redução no período de crise económica entre 2011 e 2014, após o qual se voltou a verificar novamente aumentos graduais até 2020.

Porém neste último período verificaram-se significativas alterações a nível europeu com repercussão direta no sector de resíduos a nível nacional, impondo-se novas estratégias e orientações num caminho que se pretende direcionado para a uma real economia circular.

Em dezembro de 2015 foi apresentado o Pacote de Economia Circular pela Comissão Europeia com o objetivo de dinamizar a Economia Circular na Europa e, a 30 de maio foi aprovada a Diretiva (UE) 2018/851, do Parlamento Europeu e do Conselho, que altera a Diretiva Quadro de Resíduos (DQR) do setor dos resíduos no que diz respeito à sua gestão e às novas orientações e alterações introduzidas nas três Diretivas fundamentais: a Diretiva Resíduos, a Diretiva Embalagens e a Diretiva Aterros.

É nesta nova Diretiva Quadro de Resíduos que se integra a obrigatoriedade da recolha seletiva de novas fileiras de resíduos urbanos nas frações "*Tri-fluxo e biorresíduos*", passando assim de um cenário em que a recolha seletiva de resíduos era uma recomendação (Diretiva 2008/98) para um outro em que passou a ser uma obrigação.

Mas a ambição é ainda maior, integrando novos desafios relacionados com a economia circular no setor da gestão de resíduos urbanos até ao ano de 2035, nomeadamente:

- *Obrigação de recolha seletiva para biorresíduos após 31 de dezembro de 2023, contando para o cálculo da taxa de reciclagem apenas os biorresíduos recolhidos seletivamente;*
- *Meta de preparação para reutilização e reciclagem de RU (Resíduos Urbanos), medidas em relação aos RU totais, de 55% em 2025, de 60% em 2030 e, 65% em 2035;*

- *Meta de aumento da reciclagem de resíduos de embalagem, medidos no reciclador: a 31 de dezembro 2025 60% e de 70% em 2030, bem como proibição de deposição em aterro de resíduos recicláveis a partir de 2030;*
- *Meta de redução em aterro para o máximo de 10% do total de RU gerados até 2035, sem a presença de resíduos valorizáveis.*

Esta revisão introduz assim a obrigatoriedade de se implementar redes de recolha seletiva de biorresíduos ou proceder à separação e reciclagem na origem dos biorresíduos, requisitos mínimos para todos os regimes de responsabilidade alargada do produtor, prevendo que os produtores de produtos abrangidos (por exemplo, embalagens) assumam a responsabilidade pela gestão da fase de resíduo dos seus produtos, sendo obrigados a prestar uma contribuição financeira para esse efeito.

Estas medidas foram desde logo integradas no [Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) 2020+] aprovado pela portaria n.º. 241-B/2019, de 31 de julho de 2019, estruturado como uma reflexão estratégica e de ajuste às medidas do PERSU 2020 aprovado pela portaria n.º. 187-A/2014, de 17 de setembro.

A transposição para o regime jurídico nacional da referida Diretiva (UE) 2018/851 do Parlamento Europeu e do Conselho, das orientações, alterações e metas a que Portugal fica vinculado, foi efetuada pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro, que aprova o novo "Regime Geral da Gestão de Resíduos" tal como consta neste que *"Aprova o regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos, transpondo as Diretivas (UE) 2018/849, 2018/850, 2018/851 e 2018/852."*

Mas, ainda que o caminho aponte para o desenvolvimento de novas soluções de tratamento e valorização, os aterros sanitários são e, não deixarão de o ser, uma solução "omnipresente" num sistema integrado de resíduos urbanos.

Seja como solução de apoio para deposição direta pontual, seja como solução complementar a outras operações de valorização e tratamento, como a compostagem e a incineração, para deposição da designada "*Fração Resto*" (refugos, inertes, finos ou rejeitados) da linha de processo e, em períodos de manutenção preditiva ou paragens de emergências das instalações (Levy, J. de Q., & Cabeças, A. J., 2006).

Ora, sendo apenas possível previsível em aterros futuros de nova geração a deposição da "*Fração Resto*" (onde sempre se observa matéria orgânica residual suja na heterogeneidade da fração), importa avaliar, atempadamente, qual o nível de biodegradabilidade esperado no processo de degradação física e biológica desta matéria orgânica residual, comparativamente com a resultante de aterros tradicionais atuais onde estão presentes 35% a 40% de biorresíduos. Sendo o biogás gerado em aterros constituído essencialmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) e gases residuais, e que destes dois gases o CH₄ promove um efeito de estufa 22 vezes maior que o CO₂, é fundamental garantir o máximo da sua captação e queima evitando as suas emissões difusas

para a atmosfera ou, se possível, o seu aproveitamento para poder devolver à sociedade a produção de energia elétrica, substituindo a energia fóssil em vias de esgotamento.

É neste enquadramento que a presente dissertação se desenvolve tendo presente a influência da recolha seletiva de biorresíduos desviada dos aterros futuros, o caso de estudo inovador que se desenvolveu e os impactos técnicos e financeiros associados à produção do biogás gerado (assumindo-se o cumprimento das metas vinculativas), bem como os benefícios ambientais pela redução das emissões associadas e evitadas de Gases com Efeito de Estufa (GEE), contribuindo para a melhoria do estado do ambiente e alterações climáticas. (Yodi, 2020)

1.2 Objetivos

De acordo com o PERSU 2020+ a AMARSUL SA, bem como os restantes SGRU, terão de reduzir até 2035 a quantidade de resíduos urbanos depositados em aterro para 10%, sem a presença de biorresíduos e resíduos valorizáveis. Acresce ainda que o atual regime de remuneração garantida de energia elétrica produzida em motogeradores utilizando biogás gerado em aterro e injetada na rede elétrica de serviço público (RESP), será suspenso a partir de 2022. Suportado nestas condicionantes, desenvolveu-se um caso de estudo inovador com a construção de "*dois biorreatores*" num terreno disponibilizado no aterro do Seixal, em que se simula em cada um deles um aterro com confinamento de resíduos diferentes.

O presente estudo abrange assim três componentes de análise distintas - operacional, ambiental e económica – com vista à identificação dos fatores críticos que podem condicionar o cumprimento das metas a que os sistemas de gestão de resíduos urbanos (SGRU) estão obrigados, nomeadamente a AMARSUL SA onde se desenvolveu este trabalho.

Para a avaliação operacional, o objetivo assenta na compreensão das fases evolutivas de biodegradabilidade nos biorreatores e na respetiva produção e características do biogás gerado pela degradação de resíduos da "*Fração Resto*" de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) e, de resíduos urbanos de recolha indiferenciada. Com estes dados procede-se a um estudo comparativo entre os resultados reais de biogás captado nos aterros em exploração, nos dois biorreatores e os obtidos pelo programa LandGEM, assumindo-se neste uma evolução gradual do desvio de biorresíduos de aterro até 2035.

A avaliação ambiental, tem como objetivo a análise mais detalhada dos impactos gerados pelas emissões difusas do metano do biogás ocorrente na superfície dos aterros atuais e futuros com base nas medições nos biorreatores, bem como a redução das emissões de GEE que se estimam face ao desvio dos biorresíduos de aterro até 2035 e, à suspensão em 2022 do regime de remuneração garantida da energia produzida através do biogás de aterro.

Relativamente à componente económica, o objetivo consiste na análise das perdas de receita pela suspensão, já em 2022, do regime de remuneração garantida que permite

atualmente aos Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU), obter proveitos complementares. A energia elétrica produzida pelos SGRU é, em geral, parcialmente consumida na instalação e o remanescente injetado na Rede Elétrica de Serviço Público (RESP) a um valor superior ao valor do kWh que é consumido.

Ora, como as receitas que os SGRU dispõem com a energia injetada tem contribuído para manter as tarifas de tratamento dos resíduos urbanos (praticado aos municípios) mais baixas, as receitas perdidas a partir de 2022 serão um fator que irá contribuir para aumentar a tarifa atual, já de si elevada de uma forma geral.

Por último, e com base nestes trabalhos e na respetiva ponderação e discussão dos resultados obtidos, apresentam-se as respetivas conclusões e limitações do estudo.

1.3 Relevância do tema

A gestão de resíduos urbanos e o caso particular da gestão dos biorresíduos, assumem um papel relevante desde logo pela sua conexão com o novo paradigma da economia circular, com as alterações climáticas por via da redução da geração de biogás e das emissões de gases com efeitos de estufa e, com a redução do desperdício alimentar e as políticas nacionais e europeias de ambiente.

Ora, os biorresíduos representam em Portugal continental cerca de 35% a 40% dos RU gerados, sendo a sua gestão realizada através da recolha indiferenciada e, em algumas zonas do país por recolha seletiva, mas apenas numa percentagem que não ultrapassa os 5%.

Assim, é fundamental para mitigar e adaptar os efeitos de GEE do biogás gerado nos aterros, que os biorresíduos e outras frações multimatéria sejam desviadas de aterro através da sua prévia recolha seletiva e valorização. A relevância do tema em estudo prende-se fundamentalmente com a visão futura destas infraestruturas sanitárias, nomeadamente:

- *Ao nível da produção e qualidade do biogás gerado, tendo presente a recolha seletiva de biorresíduos e os limites de confinamento dos Resíduos Urbanos (RU) em aterro impostas pela meta de 2035;*
- *Ao tempo associado às várias fases de biodegradabilidade da tipologia de resíduos passíveis de serem confinados nas condições exigidas, certamente muito diferente dos atuais aterros tradicionais;*
- *À previsão futura dos níveis de emissões associadas e evitadas de GEE até 2035 e, impactos associados ao nível das alterações climáticas.*

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, cada um dos quais dividido em diferentes subcapítulos, tendo em conta as diferentes temáticas abordadas.

Capítulo 1 - Introdução - Aborda a temática em estudo na dissertação enquadrando as metas a que Portugal está vinculado, a influência da recolha seletiva de biorresíduos, os efeitos e impactos associados à produção de biogás de aterro bem como, os benefícios ambientais pela redução das emissões associadas e evitadas de Gases com Efeito de Estufa (GEE) para a melhoria do estado do ambiente e alterações climáticas.

Capítulo 2 - Revisão da Literatura - Este capítulo enquadra o estado de arte do setor de resíduos urbanos a nível nacional, a descrição do aterro sanitário enquanto infraestrutura de tratamento e confinamento de RU acrescido de outras tecnologias de tratamento. Abordam-se os conceitos e fases de biodegradabilidade na formação e produção de biogás de aterro e efeitos nas emissões de GEE e repercussões nas alterações climáticas, bem como os modelos teóricos de previsão de produção de biogás e a sua correlação com outros estudos experimentais.

Capítulo 3- Metodologia - Diz respeito à metodologia utilizada para a elaboração do presente estudo, através do qual se apresentam os indicadores e os processos utilizados para a recolha dos dados necessários à obtenção de resultados. Descreve-se o caso de estudo desenvolvido na AMARSUL, o plano de intervenção e os procedimentos de monitorização, as medições do biogás e as condições de biodegradabilidade observadas, bem como os problemas que ocorreram.

Capítulo 4 - Tratamento e Avaliação de Resultados - Apresentam-se os resultados obtidos do caso de estudo dos "*biorreatores piloto*", bem como a sua análise, ponderação com os dados de aterros tradicionais, calculando-se o balanço de emissões evitadas de GEE simulados através de cenários evolutivos com base no método LandGEM.

Capítulo 5- Análise Crítica - Tomando por base a investigação realizada e os resultados ponderados, elabora-se uma análise crítica sobre todo o processo, indicadores e efeitos expectáveis, quer ao nível do biogás gerado, quer ao nível da redução das emissões diretas e associadas de GEE sem esquecer a perda de receitas pelos SGRU devido à suspensão em 2022 do regime de remuneração garantida da energia produzida através do biogás de aterro.

Capítulo 6 - Conclusões - Neste capítulo apresentam-se as conclusões retiradas da pesquisa efetuada no caso de estudo e na avaliação dos resultados obtidos. Identificam-se as dificuldades impostas pelo novo método de avaliação para o cumprimento das metas vinculativas, bem como na significativa redução do potencial de aproveitamento energético do biogás de aterro com impacto negativo nas receitas dos SGRU a partir de 2022. Por último são apresentadas as principais limitações ao estudo, assim como possíveis desenvolvimentos futuros relacionados com o tema desta dissertação.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Gestão de resíduos urbanos em Portugal Continental

2.1.1 Modelos de gestão

Atualmente existem em Portugal Continental 23 SGRU, dos quais 12 são multimunicipais e os restantes 11 são intermunicipais, tendo cada um deles a função de garantir o destino adequado para os resíduos urbanos gerados na respetiva região. Em termos de estrutura e prestação de serviços, estes sistemas de gestão de resíduos urbanos (SGRU) foram definidos, por opção estratégica nacional, num regime de monopólio legal de modo a assegurar que há um único prestador por área geográfica (ERSAR, 2019).

É neste contexto que foram sendo criados os atuais Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU), multimunicipais e intermunicipais, que representam hoje as estruturas de gestão com meios humanos e logísticos, equipamentos e infraestruturas ajustadas às operações inerentes à gestão integrada de resíduos urbanos para o cumprimento dos objetivos e metas estabelecidas a nível nacional (APA, 2019). Os vinte e três (23) SGRU cobrem a totalidade do território, ainda que apresentem uma elevada heterogeneidade entre eles quanto ao número de municípios abrangidos, dispersão geográfica, demografia e condições socioeconómicas.

Na tabela seguinte identificam-se as empresas concessionárias dos doze (12) Sistemas Multimunicipais e as onze (11) de Sistemas Intermunicipais, organizados de Norte para Sul do



Figura 2. 1 - Mapa da distribuição dos SGRU em Portugal Continental (RARU 2019, julho 2020)

continente. Neste quadro assinala-se também o respetivo cluster onde os SGRU se encontram agrupados (de acordo com as suas características e dinâmicas homogêneas) para efeitos dos valores de contrapartida financeiras definidos por cada cluster, devido pelas entidades gestoras no âmbito valor das contrapartidas financeiras do Sistema Integrado de Gestão dos Resíduos de Embalagens (SIGRE).

Tabela 2. 1 - SGRU em Portugal Continental.

Multimunicipal	Intermunicipal	CLUSTER	
Valorminho	Ambisousa	A	Valorminho, Resíduos do Nordeste, Ecobeirão, Resiestrela, Ecoleziria Valnor Ambilital, AMCAL, Resialentejo.
Resulima	Lipor		
Braval (*)	Resíduos do Nordeste		
Resinorte	Ecobeirão	B	Ambisousa, Gesamb, Valorlis, Resitejo, Resulima, Braval.
Suldouro	Resitejo		
Valorlis	Ecolezíria		
ERUc	Tratolixo	C	Amarsul, Suldouro, Resinorte, Ersuc, Algar.
Resiestrela	Ambilital		
Valnor	Gesamb		
Valosul	Resialentejo	D	Tratolixo, Lipor, Valorsul
Amasul	Amcal		
Algar.			

As infraestruturas e diferentes equipamentos e tecnologias que estes SGRU dispõem para a recolha, tratamento, valorização e destino final de resíduos urbanos gerados identificam-se na tabela seguinte através do número de unidades das principais infraestruturas de gestão que operam no continente.

Tabela 2. 2 - Infraestruturas de gestão dos SGRU no Continente (Fonte: RARU, 2019).

INFRAESTRUTURAS	Unidades
Aterros Sanitários	32
Tratamento Mecânico (TM)	5
Tratamento Mecânico e Biológico (TMB)	18
Central de Valorização Orgânica (<i>Recolha indiferenciada</i>)	16
Central de Valorização Orgânica (<i>Recolha seletiva</i>)	5
Central de Valorização Energética	2
Estação de triagem	30
Estação de transferência	90
Ecocentros	197

2.1.2 Produção de Resíduos Urbanos

Em Portugal Continental, segundo o RARU 2019 de julho de 2020, foram produzidas 5,007 milhões de toneladas de RU, ligeiramente superior a 1% relativamente ao ano anterior, verificando-se que se mantêm a tendência do crescimento nos últimos anos, conforme se pode observar pelo gráfico da figura seguinte.

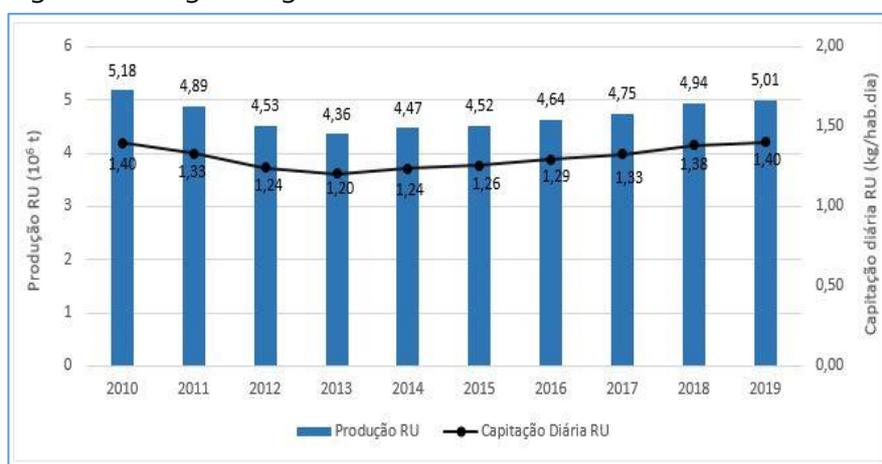


Figura 2. 2 - RUB depositados em aterro, em Portugal (RARU 2019, julho 2020).

A captação em Portugal Continental em 2019 foi de 511 Kg/hab.ano, ficando acima da média europeia que se situa em 489 Kg/hab.ano (Eurostat, 2018). Incluindo as Regiões Autónomas, a captação sobe para 513 kg/hab.ano.

2.1.3 Caracterização Física de resíduos urbanos

A caracterização física dos RU produzidos em Portugal Continental que se apresenta na figura seguinte, está elaborada de acordo com as especificações técnicas da portaria nº 851/2009.

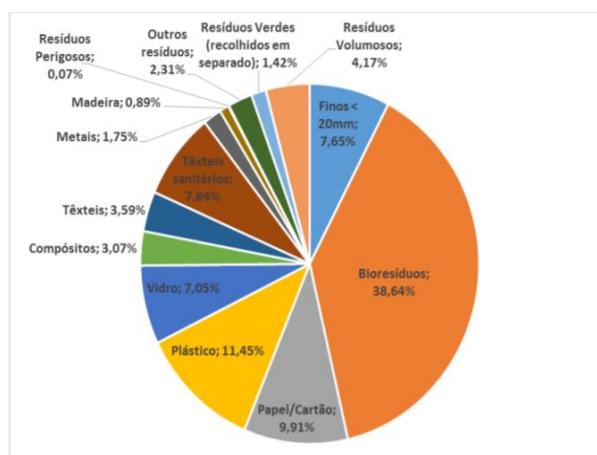


Figura 2. 3 - Caracterização física dos RU produzidos em 2019 (Fonte: APA, 2019).

Observando a composição física dos resíduos urbanos é evidente a clara predominância dos Biorresíduos (essencialmente resíduos alimentares), que representam cerca de 39%, em peso, do total de RU proveniente da recolha indiferenciada.

2.1.4 Posicionamento Nacional face às metas

No que diz respeito à meta nacional de prevenção de resíduos, apresenta-se na tabela seguinte o resultado obtido em 2019, face ao valor de capitação de RU determinado para 2012, de 456 Kg/hab.ano.

Tabela 2. 3 - Posicionamento de Portugal face à meta de prevenção de resíduos.

Indicador	Redução de Produção (kg/hab.ano)	Produção (kg/hab.ano)
Resultado obtido 2019	1,13	513
Meta 2020 face a 2012	10,0	410

Relativamente à meta nacional de deposição de RUB em aterro, de acordo com o PERSU 2020, Portugal Continental teria de reduzir para 35% (face às quantidades de 1995), a quantidade de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) depositados em aterro até 2020.

Na figura seguinte pode observar-se que, tendo em conta a meta a atingir para a redução da quantidade de RUB a depositar em aterro em 2020, no ano de 2019 foi alcançada apenas uma percentagem de 45%, longe dos exigidos 35%.

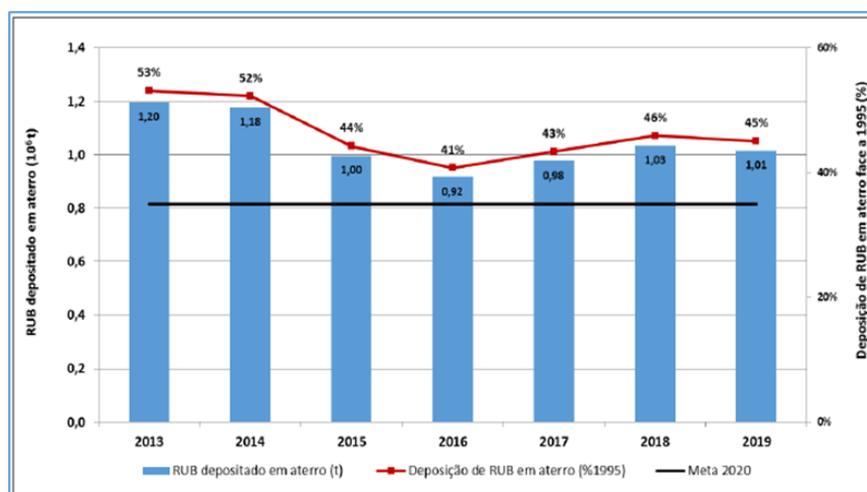


Figura 2. 4 - Evolução dos quantitativos de RUB depositados em aterro. (RARU, 2019)

É de notar que entre 2015 e 2016 a evolução de RUB em aterro decresce, mas a partir de 2017 verifica-se o aumento da quantidade de RUB em aterro.

Todavia, em 2019, verifica-se uma redução de 1% relativa ao ano anterior, mas o alcance do objetivo pretendido, ou seja, a concretização da meta de 2020, esta está comprometida.

Tabela 2. 4 - Posicionamento de Portugal face à meta de deposição de RUB em aterro. (RARU, 2019)

Indicador	RUB depositado em aterro (%)	RUB em aterro (t)
Resultado obtido 2019	45	1 014 897
Meta 2020 face a 1995	35	788 452

Se tivermos em conta as medidas do PERSU 2020+ em comparação com o PERSU 2020, verifica-se que ainda são mais exigentes e desafiantes para Portugal.

Note-se que até 2035 Portugal Continental vai ter que reduzir a deposição de resíduos urbanos biodegradáveis em aterro até 10% e, limitado apenas à deposição de resíduos urbanos não valorizáveis e inertes.

Para avaliação do cumprimento da meta de “preparação para reutilização e reciclagem de RU”, Portugal optou por utilizar o “Método de Cálculo 2 - Taxa de reciclagem de resíduos domésticos e semelhantes”, previsto no anexo I Decisão da Comissão, de 18 de novembro de 2011 (Decisão 2011/753/EU).

O cálculo da taxa baseou-se nas orientações estabelecidas na referida Decisão da Comissão tendo sido considerada a expressão de cálculo que se apresenta em seguida.

$$\text{Taxa de reciclagem de resíduos domésticos e semelhantes} = \frac{\text{(Recolha seletiva (papel, cartão, plástico, metal, vidro, madeira) + Recicláveis TM/TMB recuperados (papel, cartão, plástico, metal, vidro, madeira) + Valorização RUB (54\% recolha indiferenciada + 100\% recolha seletiva) + escórias metálicas de Incineração com produção de energia + outros materiais recicláveis)}}{\text{Total RU reciclável produzido (plástico, metal, vidro, madeira, RUB, outros materiais recicláveis)}}$$

54% é a fração de RU valorizada organicamente nas TMB. O denominador corresponde a 73,4% dos RU.

Figura 2. 5 - Cálculo da taxa de reciclagem de resíduos domésticos e semelhantes.

A meta de preparação para reutilização e reciclagem de RU, no período 2013 a 2019 pode ser observada na figura seguinte.

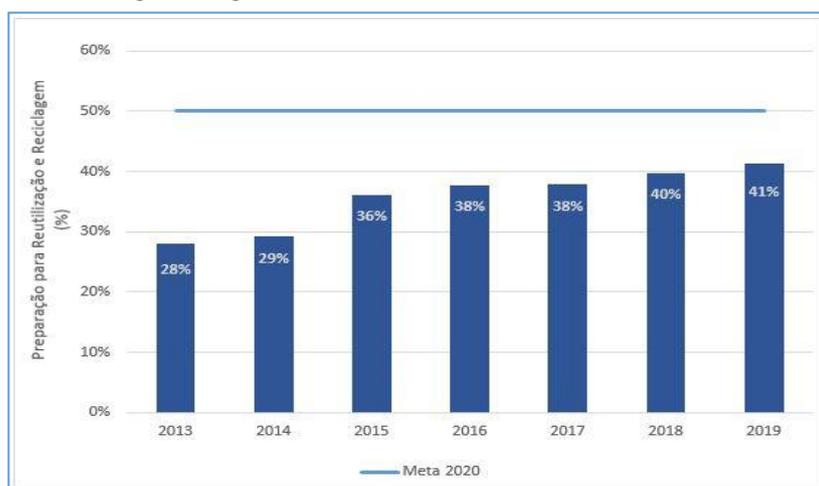


Figura 2. 6 - Cálculo da meta de preparação para reutilização e reciclagem (RARU 2019, julho 2020).

Verificou-se entre 2014 e 2015 um aumento significativo da fração sujeita a preparação para a reutilização e reciclagem, mas, em 2016 e 2017 houve uma estagnação, com recuperação em 2018 com um reduzido crescimento, mantido em 2019.

Na tabela seguinte apresenta-se o posicionamento de Portugal em 2019, onde se verifica um desvio acentuado face à meta estabelecida para 2020.

Tabela 2. 5 - Meta de Preparação para reutilização e reciclagem de 2020 (Fonte: RARU 2019).

Indicador	Taxa de reciclagem de RU (%)
Resultado obtido 2019	41
Meta 2020	50

Relativamente à meta de retoma de recolha seletiva, a evolução do resultado da aplicação da fórmula para o respetivo cálculo consta na figura seguinte.

Neste particular verificou-se um crescimento no período 2015-2019 tendo sido atingida a meta 2020.

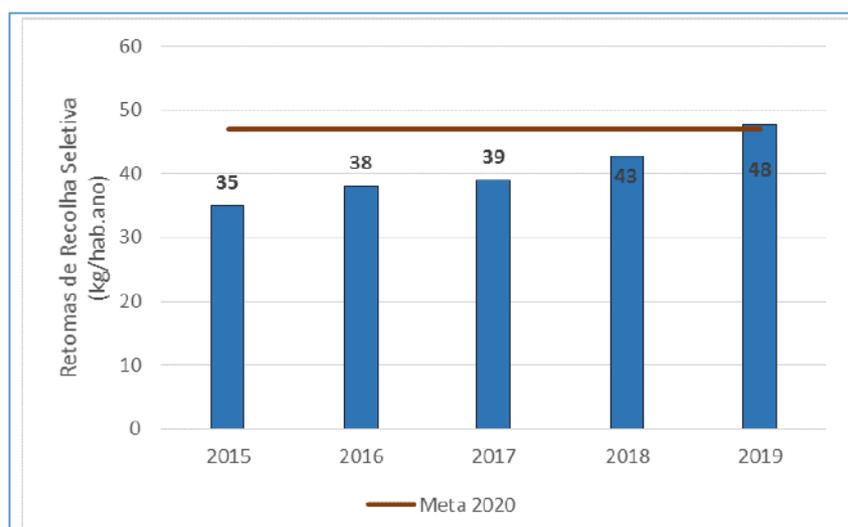


Figura 2. 7 - Evolução do resultado do cálculo da meta de retoma de recolha seletiva.

2.1.5 Tratamento e valorização de resíduos urbanos

No gráfico seguinte apresenta-se a relação dos destinos finais dos RU geridos pelos SGRU de Portugal Continental, para os anos 2018 e 2019.

Esta informação teve por base a metodologia do EUROSTAT - Guidance on municipal waste data collection, September 2016.

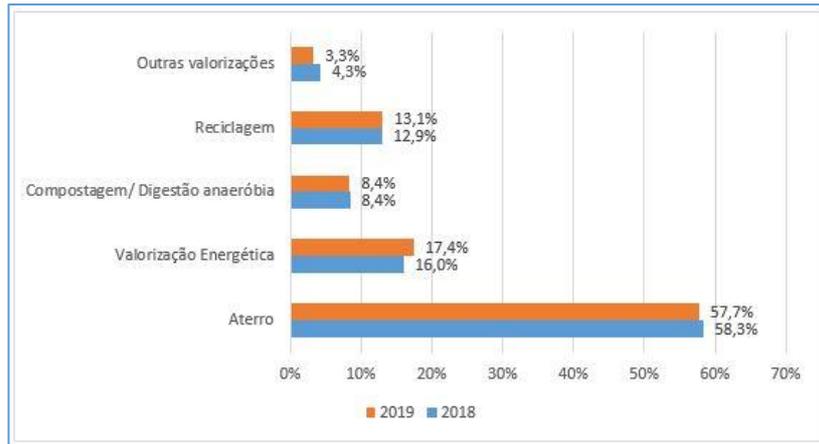


Figura 2. 8 - Destinos finais dos RU geridos pelos SGRU de Portugal Continental.

Em Portugal Continental, a fração total de resíduos depositados em aterro, por via direta e indireta, entendendo-se esta última como os refugos dos processos de tratamento, constituiu cerca de 58,4% do total de resíduos geridos, consideravelmente superior aos 33% apurados como destino direto que consta da figura seguinte, revelando uma elevada percentagem de refugos/rejeitados dos tratamentos que não está a ser valorizada.

O encaminhamento direto de RU para as principais operações de gestão, em Portugal Continental, mantêm-se desde 2015, em termos totais, conforme se observa na figura seguinte.

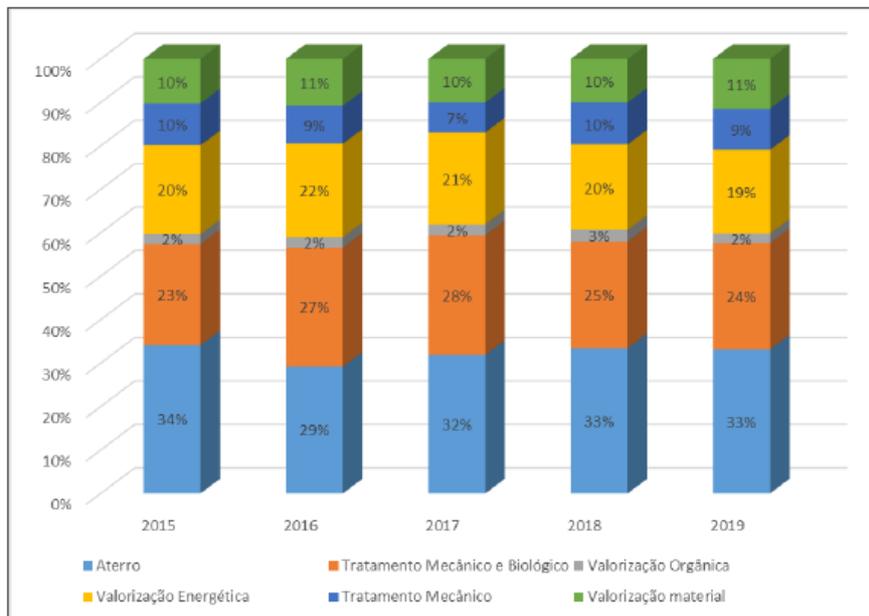


Figura 2. 9 - Destino direto dos RU (RARU 2019, julho 2020).

Contudo, numa análise global, ao longo dos anos conseguiu-se desviar grandes quantidades de resíduos dos aterros e, desta forma, outras operações como o TM e o TMB tornaram-se mais relevantes na gestão de resíduos sem, todavia, aproximar Portugal das metas definidas pelo PERSU 2020.

2.2 Sistema integrado de Resíduos Urbanos

Um Sistema Integrado de resíduos urbanos traduz o conjunto das operações de acondicionamento e transporte dos resíduos bem como as soluções de tratamento, valorização e/ou destino final construídas (com integração das diferentes tecnologias disponíveis) que, dentro de um modelo institucional ou particular de gestão, responde aos objetivos gerais e sectoriais dos interesses de uma região e das prioridades da política nacional e comunitária nesta matéria.

Um sistema integrado de resíduos urbanos constitui assim uma estrutura unitária que funciona pela complementaridade das suas componentes distintas, a saber;

- *Deposição, Recolha, Transporte/Transferência.*
- *Sistema de Tratamento e Destino final.*
- *Sistema de Valorização dos resíduos.*
- *Modelo institucional e de gestão.*
- *Sistema financeiro de suporte.*

Os respetivos subsistemas que o integram constituem as etapas parciais que, numa sequência complementar, permitem garantir em fim de linha o tratamento, a valorização e destino final dos resíduos, conforme esquema que em seguida se sintetiza.



Figura 2. 10 - Sistema integrado de resíduos urbanos (Levy e Cabeças, 2006).

Ora, o caso de estudo desenvolvido na AMARSUL e que se descreve no capítulo seguinte, consistiu na construção de *dois biorreatores piloto* num terreno disponibilizado no aterro do Seixal, simulando dois aterros sanitários com um confinamento diferenciado de resíduos.

Na sua construção foram cumpridos todos os requisitos e exigências constantes no Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto, onde estão definidas as especificações técnicas que um aterro sanitário deve possuir em função da tipologia dos resíduos a serem depositados que, neste caso, reportam à classe de “resíduos não perigosos”.

Neste contexto abordam-se de seguida os diferentes sistemas tratamento e destino final de resíduos urbanos.

2.2.1 Confinamento técnico. Aterro sanitário

Em termos técnicos, um aterro sanitário deve ser entendido como o conjunto de construções e equipamentos que garantam adequadas condições para o bom desenvolvimento de tarefas operacionais, administrativas e sociais que ali se vão realizar.

Um aterro sanitário não é só e apenas a zona onde se depositam os resíduos.

Esta infraestrutura sanitária tem de ser concebida dentro de uma solução integrada onde se estabeleçam as necessárias interfaces entre operações de controlo, gestão, operação, exploração, manutenção e monitorização, que no seu conjunto, traduzem as mais-valias ambientais e de segurança que este tipo de obra tem de observar.

A. Instalações de Apoio à Operação, Exploração e Tratamento

O aterro sanitário, de modo a garantir todas as necessidades associadas à manutenção, operação e infraestruturas de gestão deve dispor de uma zona alargada para localizar o conjunto de instalações de apoio e infraestruturas complementares necessários ao trabalho diário.

Assinala-se em seguida, algumas das instalações e infra estrutura que em regra se consideram essenciais neste tipo de solução técnica de tratamento e destino final;

1. Construção Civil – vedação e Instalações de apoio

- Vedação metálica periférica e portão do aterro; Vedação arbórea envolvente;
- Portaria para receção, vigilância e controlo de entradas com sistema de vídeo e cancela;
- Unidade de pesagem automática com báscula informatizada e leitura de cartões por sistema ótico (com uma capacidade mínima de 60 ton) e com software de controlo que permita transmissão de informação e ligação com a sede da sociedade concessionária;
- Edifício Administrativo contemplando (opcional):
 - o Área de escritório com sala de reuniões e gabinetes;
 - o Área administrativa; Salas de arquivo/arrumos
 - o Auditório, em plano desnivelado, para sessões de formação e sensibilização.
 - o Área para laboratório;
 - o Área para posto médico/primeiros socorros;
 - o Balneário (zona limpa/zona suja), com duchas e área para cacifos;
 - o Refeitório com capacidade para os funcionários e área social;
 - o Instalações sanitárias (homens e mulheres).

- Armazém de materiais de consumo e peças de reserva, com sanitário .
- Instalação para estacionamento de máquinas incluindo zona oficial;
- Plataforma e instalação de um posto de abastecimento de combustível
- Instalação coberta para estacionamento das viaturas de recolha seletiva;
- Parque de estacionamento para viaturas ligeiras e autocarros (a descoberto);
- Plataforma com alvéolos para armazenamento de materiais:
- Plataforma específica para lavagem do equipamento mecânico;
- Unidade de lavagem de rodados, com sistema automático por pressão;
- Unidades complementar de tratamento caso sejam concebidas;
- Centro de Triagem dos materiais da recolha seletiva e valorização de RU;
- ECOCENTRO interno com plataforma para depósito de objetos volumosos ("monstros"),

2. Construção Civil - Vias Internas

- Vias internas de circulação, até à zona de descarga dos RU; rampa interna de acesso;
- Vias de acesso e envolvente das instalações ;
- Parque de estacionamento para viaturas ligeiras e autocarros;
- Via de acesso ao sistema de tratamento das águas lixiviantes.

3. Abastecimento de Água

- Rede interior das instalações; Rede de abastecimento e distribuição de água, com toma específica junto das plataformas modeladas para instalação de unidades complementares de tratamento (triagem dos materiais da recolha seletiva e valorização de RU); Rede de incêndio no interior do aterro sanitário; Rede de rega.

4. Sistema de Drenagem e Tratamento de Águas Residuais

- Rede interior de drenagem de águas residuais domésticas das instalações propostas e respetivo sistema de tratamento. Esta rede não deve ligar à rede de drenagem das águas lixiviantes na sua fase final pois existe o risco da entrada de biogás para o interior dos edifícios.

5. Eletricidade

- A Rede de iluminação exterior; Rede interna de eletricidade das instalações propostas; Iluminação das frentes de trabalho; Força motriz.

6. Estação de Tratamento de Águas Lixiviadas (ETAL)

- Esta infraestrutura é muito importante, do ponto de vista de proteção ambiental, pois os lixiviados são efluentes bastantes ricos em CQO e CBO₅, logo necessitam de ser tratados para não causarem danos ao ambiente. Em alguns Aterros Sanitários o tratamento dos lixiviados é feito por osmose inversa, no entanto, existem outros tipos de sistemas que também podem ser utilizados.

7. Via de circulação interna e de acesso externo

- Neste tipo de infraestruturas, como o nome indica, destina-se à circulação de todos os tipos de veículos que necessitam para exercer as suas funções. Normalmente, são

construídos dois tipos de vias, isto é, vias para circularem veículos pesados, com uma largura de seis a sete metros, e vias para veículos ligeiros com uma largura de quatro metros.

8. Parque de Estacionamento

- Como o nome indica será para que os colaboradores da Entidade Gestora estacionei os seus veículos pessoais ou da própria entidade.

9. Central de Valorização Energética

- É nesta infraestrutura onde se valoriza a produção de biogás em aterros sanitários ao produzir energia a partir do mesmo, este processo é resultante da decomposição da matéria orgânica existente nos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários. O processo relacionado com a produção de biogás e as suas fases associadas estão apresentadas no tópico seguinte.



Figura 2. 11 - Localização do Ecoparque do Seixal (a vermelho) tendo em conta as áreas residenciais mais próximas. Fonte: Google Earth.

B. Confinamento técnico de resíduos urbanos.

Os sistemas de proteção ambiental a garantir na zona de confinamento técnico de resíduos urbanos para evitar fugas quer de lixiviados quer de biogás ao longo da sua vida útil, são os seguintes;

- *Sistema de impermeabilização basal (fundo do aterro) e de taludes e banquetas internas;*
- *Sistema de drenagem pluvial separativo na zona basal e respetivo controlo;*
- *Sistema de drenagem e captação das águas lixiviantes , unitário ou separativo por banquetas intermédias;*
- *Sistema de tratamento das águas lixiviantes (ETAL);*
- *Sistema de drenagem, captação, queima/aproveitamento do biogás.*

Relativamente ao sistema de impermeabilização basal e de taludes e banquetas internas este é constituído, em todas as zonas do terreno que fiquem em contacto com os RU por duas barreiras de proteção, ou sejam:

- **Barreira passiva**
- **Barreira ativa**

Descreve-se em seguida constituição destas duas barreiras de proteção ambiental que no seu conjunto formatam o sistema de impermeabilização.

Barreira Passiva - barreira geológica natural ou, artificialmente colocada, no cumprimento das exigências da Dec. Lei 183/2009, de 10 de agosto, ou seja, constituído por:

- Uma formação geológica de baixa permeabilidade e espessura adequada, devendo para determinada classe do aterro serem respeitados os fatores respeitantes ao coeficiente de permeabilidade (K, m/s) e espessura (m).

No caso de um aterro sanitário inserido na classe de aterro para resíduos não perigosos, os valores que devem ser cumpridos para cada fator pode-se observar na tabela seguinte.

Tabela 2. 6 - Fatores a serem considerados para uma determinada classe de aterro.

Fator	Aterro para resíduos não perigosos
Coeficiente de permeabilidade (K, m/s)	$\leq 1 \times 10^{-9}$
Espessura (m)	≥ 1

Para reforço da formação geológica caso o coeficiente de permeabilidade do solo não seja possível de atender na sua extensão global, deve equilibrar-se esta situação em toda a sua superfície com a colocação de um reforço com :

- Geocompósito Bentonítico com $K = 10^{-11}$ m/s sobre toda a formação (barreira) geológica natural.

Sobre a Barreira Passiva coloca-se em seguida a Barreira Ativa formatando este conjunto os referido sistema de impermeabilização do aterro sanitário em toda a zona basal, taludes e banquetas internas.

Barreira Ativa - este sistema de proteção ambiental desenvolve-se sobrejacente à *barreira passiva*. Em toda a zona basal, taludes e banquetas internas, a barreira ativa é constituída, no sentido ascendente sobre a barreira passiva, por:

- Geomembrana HDPE (de 2,0 mm de espessura)
- Geotêxtil não tecido, colocado sobre toda a geomembrana HDPE, dimensionado para resistência às solicitações mecânicas (mais desfavoráveis) do Punçoamento, Rasgamento e Tração;

Sobre a Barreira Ativa coloca-se de seguida a **Camada Drenante** com uma espessura mínima de 0,5 m de espessura e um $K = 10^{-4}$ m/s.

Esta camada de 0,50m deve ser constituída, no sentido ascendente, por:

- Camada de areia de granulometria grossa com uma espessura de 0,20 m, seguida de,
- Camada de material britado não calcário de granulometria 40/80 com uma espessura de 0,30 m.

Sobre a Camada Drenante é opcional a colocação de geotêxtil não tecido dimensionado com uma porometria adequada à altura de resíduos a confinar na área de exploração.

Na figura seguinte pode observar-se a estrutura final sistema de impermeabilização basal e de taludes e banquetas composta pelo conjunto das duas barreiras de descritas.



Figura 2. 12 -Sistema de impermeabilização basal do aterro (Levy e Cabeças, 2006).

Em relação às melhores práticas construtivas que devem ser adotados para os taludes da zona de confinamento de RU e nas banquetas para estabilização dos seus paramentos (planos laterais), assinalam-se as seguintes condições :

- Inclinação mínima de 2% para os paramentos laterais;
- Para o sistema de impermeabilização inicial a colocar nos taludes, sem ainda se encontrar em contato com os RU confinados, a estrutura pode ficar constituída apenas por; Terreno natural (barreira geológica); Geocompósito Bentonítico; Geomembrana HDPE de 2,0 mm de espessura.

A composição da estrutura de impermeabilização das banquetas que ficam desde logo em contacto com os RU, devem seguir a seguinte orientação:

- Terreno natural (barreira geológica);
- Geocompósito Bentonítico;

- Geomembrana em HDPE;
- Geotêxtil não tecido.

Na figura seguinte pode observar-se um conjunto de pormenores construtivos que ficam estabilizados na vala de ancoragem onde ficam amarrados os Geocompósitos do sistema de impermeabilização da zona de confinamento.

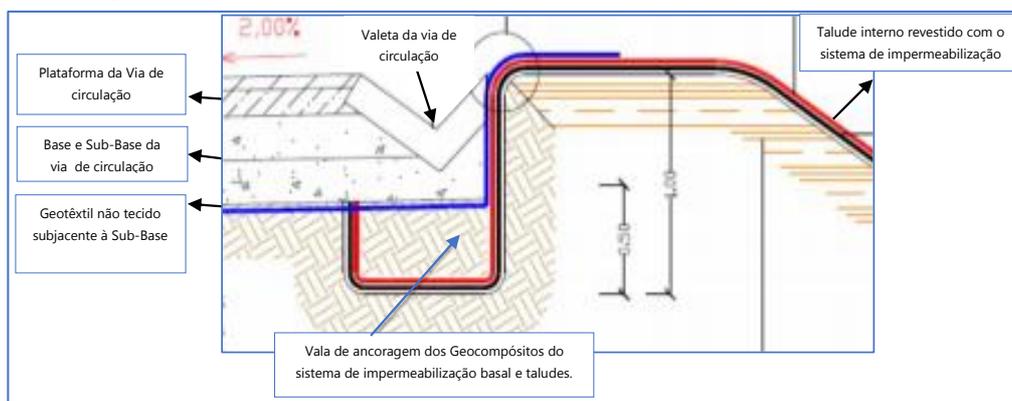


Figura 2. 13 - Vala de ancoragem dos Geocompósitos dos Taludes internos (Adaptado de Dores, 2020).

No sistema de impermeabilização torna-se necessário por vezes executar atravessamentos da geomembrana com tubagem de HDPE.

Neste atravessamento importa introduzir um reforço com argamassa moldada na zona interior do talude envolvendo a tubagem para minimizar eventuais assentamentos diferenciais.

Na soldadura deve sempre utilizar-se cordão de soldadura HDPE com as características semelhantes à geomembrana colocada.

Na figura seguinte pode observar-se uma solução de atravessamento da geomembrana, assinalando-se a vermelho a geomembrana e, a azul, o geotêxtil não tecido.

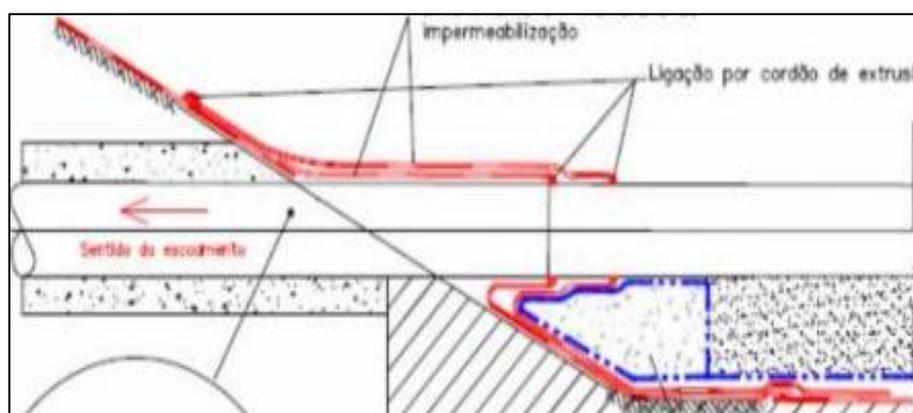


Figura 2. 14 - Representação da travessia sistema de impermeabilização. (Adaptado de Dores, 2020).

Na figura seguinte pode observar-se, para melhor visualização deste tipo de intervenção, um exemplo de talude da célula C do Ecoparque do Seixal onde se fizeram alguns atravessamentos para prolongar para o exterior o sistema de drenagem e captação horizontal de biogás captado.

Observa-se também o ramal que liga através de uma Estação de Regularização e Medição (ERM) ao coletor perimetral que encaminha o biogás para o motorgerador do sistema de aproveitamento energético instalado neste aterro.



Figura 2. 15 - Talude e banquetta de pé de talude da célula D do Ecoparque do Seixal. (Foto do autor).



Figura 2. 16 - Dreno vertical com acessório de tubagem curvo e dreno horizontal . (Foto do autor).

O Sistema de drenagem e captação das águas lixiviantes, unitário ou separativo por banquetas intermédias, é formado por valas principais e secundárias incorporadas na camada drenante, possuindo coletores (perfurados a meia-cana e/ou de secção cheia) que acompanham a modelação imprimida à zona basal e permitem de forma estratégica, captar e drenar todas as escorrências líquidas para um poço de captação e derivação interno ou externo.

Em toda a secção coloca-se a tubagem HDPE no mínimo de 250 mm de diâmetro, ranhurada a meia cana e preenche-se todo o seu espaço com material granular britado #40/60.

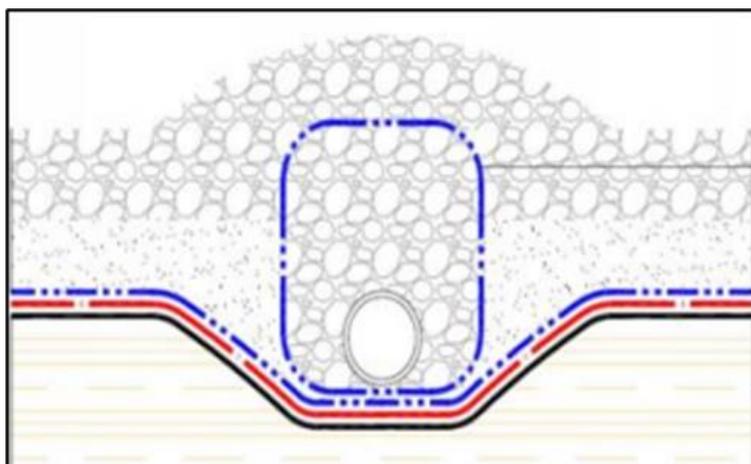


Figura 2. 17 - Sistema de drenagem de lixiviados e águas pluviais. (Adaptado de Dores, 2020).

Saliente-se que entre o topo da vala de drenagem e os resíduos depositadas coloca-se um geotêxtil não tecido com a função de filtro, permitindo o livre fluxo de efluentes líquidos residuais para a tubagem, sem que haja arraste de finos.

O Sistema Separativo de Drenagem de águas pluviais é formado por valas complementares que, possuindo coletores perfurados a meia-cana e/ou de secção cheia, permitem de forma estratégica captar e drenar as águas pluviais desviando-as para o exterior.

O sistema de drenagem de águas pluviais tem de ser dimensionado tendo em conta a precipitação que ocorre na zona, de modo a determinar o diâmetro mais indicado das tubagens a serem colocadas. A construção e constituição deste tipo de sistema é igual ao sistema de drenagem de lixiviados.

Estação de Tratamento de águas lixiviantes (ETAL) - é fundamental o tratamento dos lixiviados de modo a evitar a contaminação das águas envolventes. Os lixiviados de um aterro sanitário terão que ser convenientemente contidos, recolhidos, tratados e monitorizados.

O tratamento dado aos lixiviados recolhidos constitui a base para uma boa gestão do aterro sanitário bem como dos próprios lixiviados em conformidade com a legislação em vigor.

Dada variabilidade da quantidade e qualidade dos lixiviados, as estações de tratamento dos lixiviados (ETAL) nos aterros terão de ser consideravelmente mais flexíveis do que as estações de tratamento de efluentes domésticos. Enquanto os poluentes orgânicos são mais eficazmente tratados biologicamente, os contaminantes inorgânicos são mais facilmente removidos por processos físico-químicos.

Assim, dado os lixiviados conterem tanto poluentes orgânicos como inorgânicos, a estação de tratamento, regra geral, deverá ser uma combinação destes dois tipos de tratamento. O indicador que revela a eficácia dos tratamentos biológicos e o da biodegradabilidade, pode-se medir pela razão CBO/CQO.

1. *Em lixiviados oriundos de aterro sanitário recente, a razão CBO/CQO é de cerca de 0,5, revelando que a matéria orgânica é facilmente degradável, logo o tratamento biológico é a solução recomendada.*

2. Em aterros antigos, esta razão situa-se entre 0,05 e 0,2 indicando uma matéria orgânica dificilmente biodegradável, logo os processos biológicos não são aconselháveis.

As soluções tratamento podem integrar processos biológicos, físico-químico e/ou Osmose Inversa - estação de tratamento dos efluentes residuais líquidos captados, que permite a saída destes para o meio recetor natural nas condições admissíveis pela legislação em vigor.

O Sistema de Drenagem de Biogás é constituído por tubagens de HDPE ranhuradas a 360° para extração contínua deste efluente residual gasoso.

O sistema de drenagem e extração do biogás gerado na massa de resíduos sólidos fica garantido com a execução dos respetivos drenos verticais e horizontais que se divide em três fases:

1. Fase de Arranque;
2. Fase de Exploração;
3. Fase de Encerramento;

Estação de Queima de biogás - para queima em contínuo do biogás captado, incluindo a sua monitorização, controlo e viabilização do seu aproveitamento energético;

a) Sistema de drenagem e tratamento de biogás

Na Figura 2.18 está apresentado o aparelho utilizado para realizar medições do biogás, estes tipos de medições podem ser feitas nos motores de biogás ou nas células, ou seja, nos drenos existentes nas mesmas.

Permite determinar quando determinados drenos estão prontos a serem ligados, caso esteja pronto a ser emitido biogás do mesmo, ou fechados caso já não exista biogás suficiente para os motores continuarem a sugar.

Numa perspetiva de operação na área de produção do biogás, o aparelho apresentado anteriormente permite otimizar o funcionamento do motor, pois após as medições efetuadas pode-se determinar qual será o caudal de biogás afluyente pretendido sem esforçar o motor em demasia tendo em conta o volume de biogás existente.



Figura 2. 18 - Queimador do biogás gerado, do biogás excedente de aproveitamento ou como emergência



Figura 2. 19 - Motor de Biogás (Foto do autor)

Por questão de segurança é crucial existir um queimador de emergência perto dos motores de biogás, pois pode ocorrer alguma situação em que os motores tenham uma avaria e seja necessário queimar o biogás para evitar a emissão deste gás para a atmosfera



Figura 2. 20 - Circuito de emergência para a queima de biogás. (Foto do autor).

2.2.2 Tratamento Mecânico e Biológico (TMB)

O Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) é um método que combina processos de triagem mecânica, onde se pretende separar a matéria biodegradável dos restantes que constituem os resíduos indiferenciados encaminhados para tratamento, tais como materiais recicláveis, volumosos, inertes e outros, encaminhando a matéria biodegradável para o tratamento biológico por compostagem em pilhas ou túneis ou por digestão anaeróbia.

Na linha de tratamento mecânico recuperam-se por triagem manual, ótica e mecânica, resíduos de embalagens, papel/cartão, vidro que não tenham sido depositados e retirados através da recolha seletiva Tri-fluxo, bem como refugos com potencial de aproveitamento energético, nomeadamente para a produção do que se designa por CDR (Combustível Derivado de Resíduos).

O tratamento biológico consiste na valorização orgânica da fração biodegradável, recorrendo à digestão anaeróbia e/ou à compostagem, resultando um composto com potencial de valorização agrícola e ainda, no caso da digestão anaeróbia, a produção de biogás.

A qualidade do composto produzido através dos resíduos indiferenciados pode comprometer a viabilidade da sua utilização, devido à maior probabilidade de contaminação dos resíduos, relativamente àqueles provenientes de recolha seletiva (Piedade e Aguiar, 2010 in Mendes, 2014).

De acordo com Piedade e Aguiar (2010), as unidades de TMB que recebam resíduos provenientes de recolha seletiva de orgânicos, produzem uma menor quantidade de rejeitados, bem como um composto de melhor qualidade e com maior valor comercial.

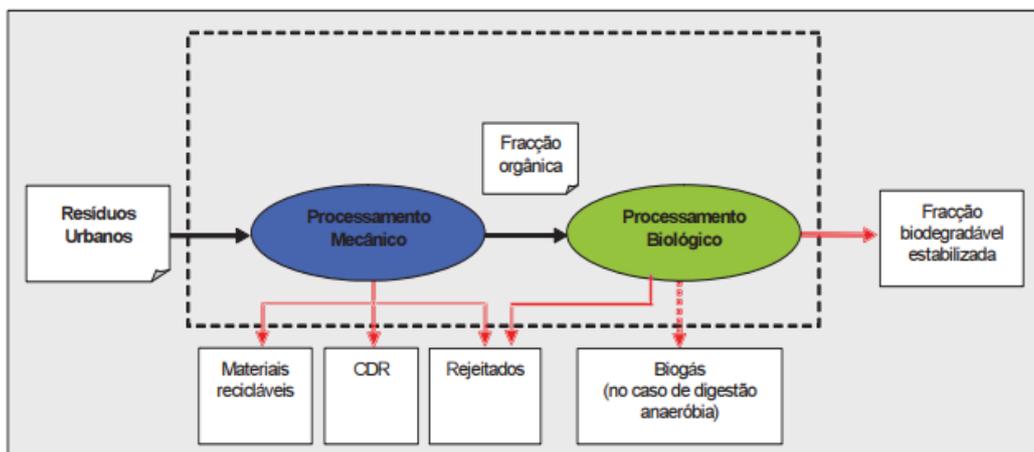


Figura 2. 21 - Diagrama convencional do funcionamento do TMB. (Piedade e Aguiar, 2010).

2.2.3 Tratamento Mecânico

O tratamento mecânico compreende diversas etapas que têm como objetivo a redução de tamanho, a separação e recuperação de recicláveis a partir dos resíduos recolhidos, bem como a preparação do fluxo de resíduos para as etapas a jusante (DEFRA (UK), 2013b; in Silva, 2016).

O tratamento mecânico permite a separação da fração orgânica, retirando-se materiais com potencial de reciclagem, tais como plásticos, metais e vidros, encaminhando-se estes materiais para operadores de reciclagem, e resultam refugos com potencial de produção de CDR e rejeitados.

O Combustível Derivado de Resíduos (CDR) é o combustível sólido preparado a partir de resíduos não perigosos, cuja utilização visa a recuperação de energia em unidades de incineração ou de coincineração.

A utilização de refugos para produção de CDR leva a que a quantidade de refugos e rejeitados encaminhados para aterro seja menor, contribuindo assim para o cumprimento da meta de desvio de aterro.

2.2.4 Tratamento Biológico

O tratamento biológico recebe a fração orgânica dos RU, previamente separada dos restantes RU, transformando esta fração num material estável. Resulta deste tratamento um material orgânico estável, podendo ser utilizado como fertilizante ou corretivo orgânico (Silva, 2016). O tratamento biológico pode realizar-se por compostagem (em pilhas estáticas ou com arejamento, e túneis) ou por digestão anaeróbia.

b) Compostagem

A compostagem é um processo aeróbio (na presença de oxigénio) de decomposição da matéria orgânica por ação de microrganismos, em condições controladas, provocando a

libertação de calor e a produção de composto (Martinho et al., 2011 in Mendes, 2014) com potencial de utilização como fertilizante ou para corretivo de solos.

Neste processo, ocorre a metabolização da matéria orgânica, transformando-se em dióxido de carbono (CO_2) e água (García-López et al., 2014 in Mendes, 2014; Silva 2016).

Este processo é composto por três fases (Levy e Cabeças, 2006):

- Pré-processamento;
- Fermentação;
- Maturação,

Estes processos são influenciados por diversos fatores, tais como: pH; temperatura; presença de microrganismos; humidade; relação C/N (Carbono/Azoto); arejamento do sistema (Silva, 2016).

O tratamento de resíduos orgânicos de recolha seletiva, como é o caso dos biorresíduos, influencia a duração das fases da compostagem, apresentando duração inferior face ao tratamento de resíduos de recolha indiferenciada (Diaz et al., 2002 in Silva, 2016).

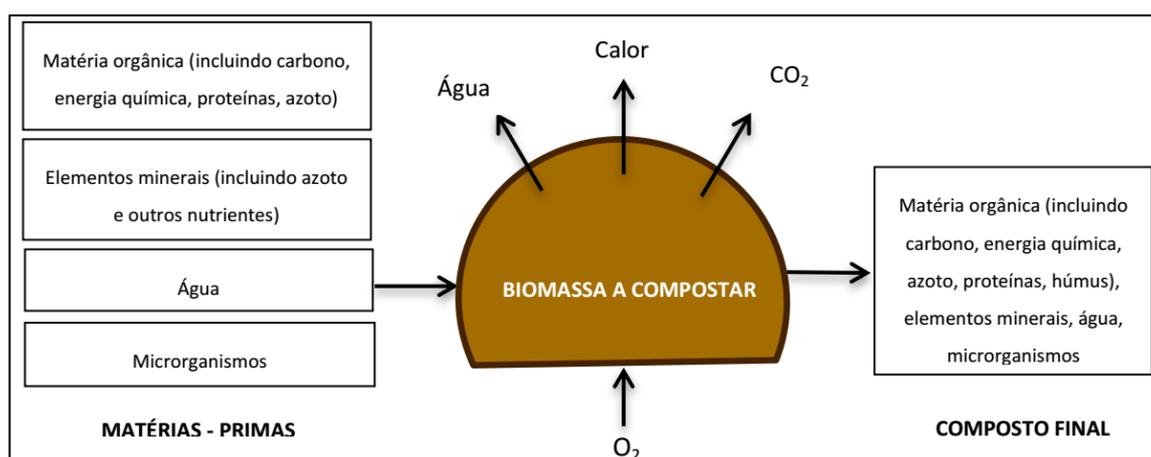


Figura 2. 22 - Esquema de um processo de compostagem (Rynk,1992)

c) Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico no qual decorre, na ausência de oxigénio, a decomposição da matéria orgânica.

Deste processo resulta biomassa estabilizada, uma mistura gasosa composta essencialmente por dióxido de carbono e metano (biogás) (Carrilho, 2012), e uma fração líquida.

Este processo decorre em ciclo fechado, compreendendo quatro etapas (Ferreira, 2013 in Querido, 2015):

- Hidrólise;
- Acidogénese;
- Acetogénese;
- Metanogénese.

A digestão anaeróbia pode ser economicamente benéfica para o sistema, visto que se pode valorizar energeticamente o biogás obtido, consumindo e vendendo a restante energia elétrica produzida à rede elétrica, bem como o composto produzido.

Este processo apresenta como vantagens a estabilização e higienização completa dos resíduos, e ainda o menor consumo energético (aproveitamento do calor para o digestor) comparativamente à digestão aeróbia (Levy e Cabeças, 2006 in Mendes, 2014).

A fração líquida obtida apresenta diferentes destinos disponíveis, tais como a sua recirculação novamente para o digestor, misturando-se com os novos resíduos, ou a sua utilização nos solos como fertilizante ou, o seu encaminhamento para uma ETAR (Crespo, 2013).

2.2.5 Valorização Energética

A valorização energética dos RU dá-se através da incineração e da co-incineração. Na ótica da gestão integrada dos resíduos, segundo Martinho et al. (2011), deverá evitar-se a incineração de RU de recolha indiferenciada, devendo destinar-se idealmente à valorização de refugos e rejeitados dos processos de gestão de resíduos.

A incineração é um processo térmico de oxidação do material combustível dos resíduos, resultando calor, gases da combustão, resíduos sólidos (cinzas) e efluentes líquidos (Martinho et al, 2011), sendo o seu objetivo a redução do volume (90%) e peso dos resíduos (80%) (Levy e Cabeças, 2006), a recuperação de energia e a estabilização dos resíduos (Mendes, 2014).

Os gases resultantes deste processo são sujeitos a processos de tratamento e as cinzas resultantes são encaminhadas para aterro.

A Co-incineração é o 'processo de tratamento dos resíduos através da combustão controlada destes juntamente com combustíveis, em fornos industriais ou outros, para a produção de energia térmica a ser utilizada localmente nos processos industriais' (Reis, 2016), destacando-se a utilização de CDR nas indústrias cimenteiras e nas centrais térmicas.

Outros processos térmicos disponíveis para valorização energética são: Pirólise; Gaseificação; Oxidação húmida; Transformação do vapor; Hidrogaseificação (Levy e Cabeças, 2006 in Mendes, 2014).

2.3 Decomposição dos resíduos urbanos

Os resíduos urbanos durante a sua decomposição após confinamento, nomeadamente, resíduos alimentares e outros resíduos orgânicos como o papel, o cartão e outros, ocorre através de várias etapas/fases associadas à geração de biogás e lixiviados, que ao longo do tempo apresentam características distintas.

A produção de biogás pode ser descrita em cinco fases distintas, a primeira fase, aeróbia, a segunda fase, primeira fase de transição, a terceira fase, segunda fase de transição, a quarta fase, fase do metano e a quinta fase que consiste na redução da atividade bacteriana.

Na figura seguinte pode observar-se a variação da composição do biogás nas diferentes fases e o intervalo de tempo em cada uma das fases.

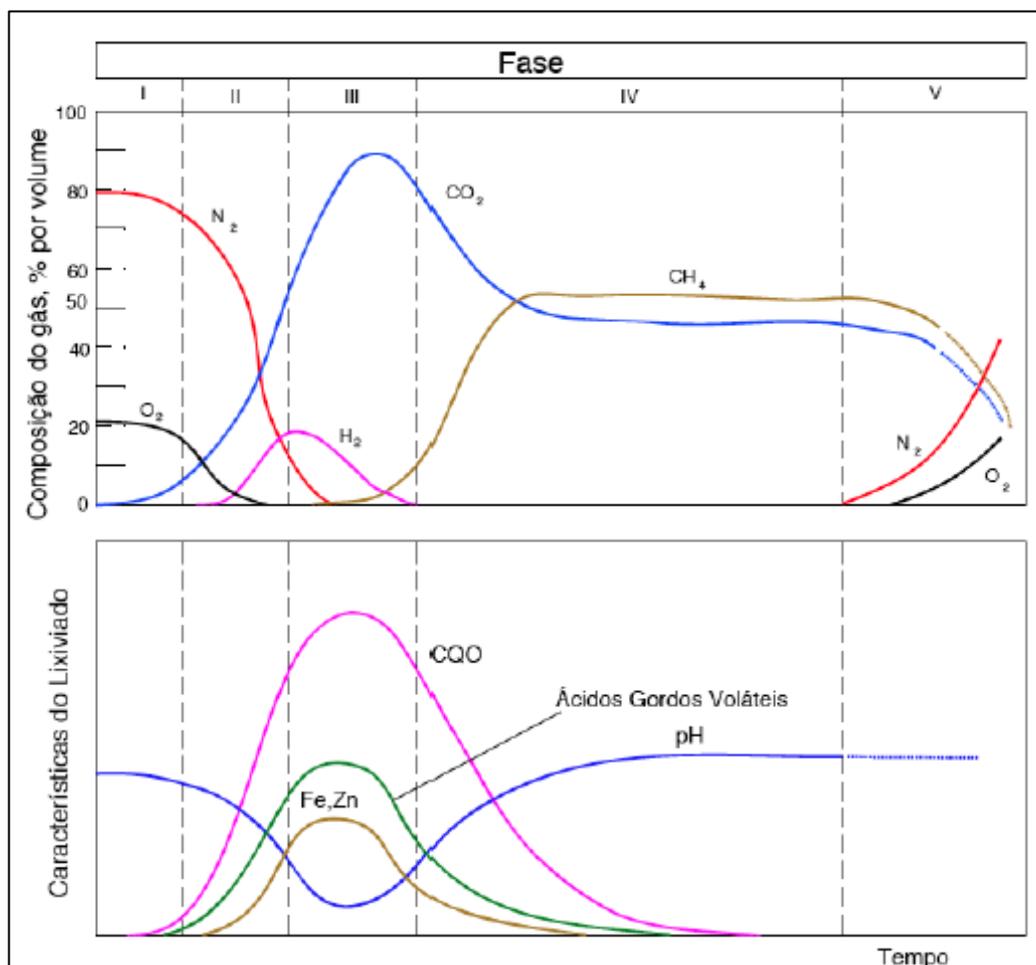


Figura 2. 23 - Fases de decomposição dos resíduos em aterro (fonte: Tchobanoglous,1994).

As cinco fases do processo podem ser descritas, de forma sucinta, da seguinte forma:

Fase I - Degradação Aeróbia

A primeira fase consiste na degradação da matéria orgânica, cuja é facilmente metabolizada devido à existência de oxigénio e à sua difusão na massa de resíduos, contribuindo para que seja formado dióxido de carbono e para a subida de temperatura.

Tal como se pode observar na figura anterior, esta fase é bastante curta em relação às fases seguintes.

d) Fase II - Transição ou Hidrólise e Fermentação

Após a fase aeróbia surge o período anaeróbio, nesta fase começam a desenvolver-se ácidos orgânicos e de dióxido de carbono, provenientes das bactérias fermentativas, na fase ácida.

Teremos também a formação de amónia, esta poderá aumentar significativamente devido à hidrólise e fermentação de proteínas, poderá haver também a produção de hidrogénio pois este pode ser gerado pelas bactérias fermentativas.

Como nesta fase são produzidos muitos ácidos, o pH poderá descer significativamente e, como é evidente, haverá um aumento da concentração de ferro, cálcio e metais pesados.

A concentração de sulfato começará a diminuir, e haverá produção de sulfureto, que poderá provocar a precipitação de ferro, manganês e metais pesados que serão libertados em ambiente ácido.

e) Fase III -Acidogénese (*segunda fase de transição*)

É na terceira fase que se inicia a produção de metano, o aumento da sua concentração resulta na diminuição da concentração de hidrogénio, a concentração de dióxido de carbono diminui em simultâneo com a metabolização dos ácidos orgânicos. O pH e a alcalinidade vão aumentar devido ao metabolismo ácido.

O aumento da concentração de sulfureto, o aumento de pH e alcalinidade vão provocar uma maior redução das concentrações de metais pesados, ferro e cálcio.

A Amónia continuará a ser libertada e irá atingir concentrações elevadas, uma vez que que não é metabolizada no meio anaeróbio.

f) Fase IV -Acetogénese (*ou, Metanogénese instável*)

Dependendo de vários fatores do meio onde se encontram as bactérias, a produção de metano estabilizará entre poucas semanas e/ou poucos anos, tendo como resultado concentrações de metano relativamente estáveis entre 40-65% (volume).

Durante esta fase os ácidos são metabolizados instantaneamente, pelo que a sua concentração é baixa, resultando na produção de ácido acético (acetato), dióxido de carbono e hidrogénio. Esta fase é, normalmente, bastante longa pois pode durar entre 25 e 50 anos.

g) Fase V - Metanogénese

A última fase corresponde ao processo no qual as bactérias metanogénicas transformam os produtos formados nas fases anteriores, tais como o ácido acético (acetato), dióxido de carbono e hidrogénio, em metano (CH₄) e dióxido de carbono.

A diminuição da atividade bacteriana, predominando microrganismos estritamente anaeróbios denominados metanogénicos, o que resulta na diminuição da produção de metano para níveis tão baixos que o azoto atmosférico começará a aparecer no biogás.

Poderão aparecer zonas aeróbias nas partes mais altas do aterro e este estará numa fase de estabilização.

As bactérias metanogénicas dividem-se em dois grupos tróficos distintos: Bactérias Hidrogenófilas e Bactérias Acetoclásticas (Ince *et al.*, 1995 *in* Ferreira, 2010; Silva, 2014).

2.4 Biogás

2.4.1 Fatores que influenciam a produção

A decomposição anaeróbia processa-se basicamente em dois estágios, conforme se referiu anteriormente, em que a matéria orgânica é, em primeiro lugar, acidificada e, subseqüentemente, as bactérias geradoras de metano transformam os ácidos em metano e dióxido de carbono, com uma composição de cerca de 60% de metano e 40% de dióxido de carbono.

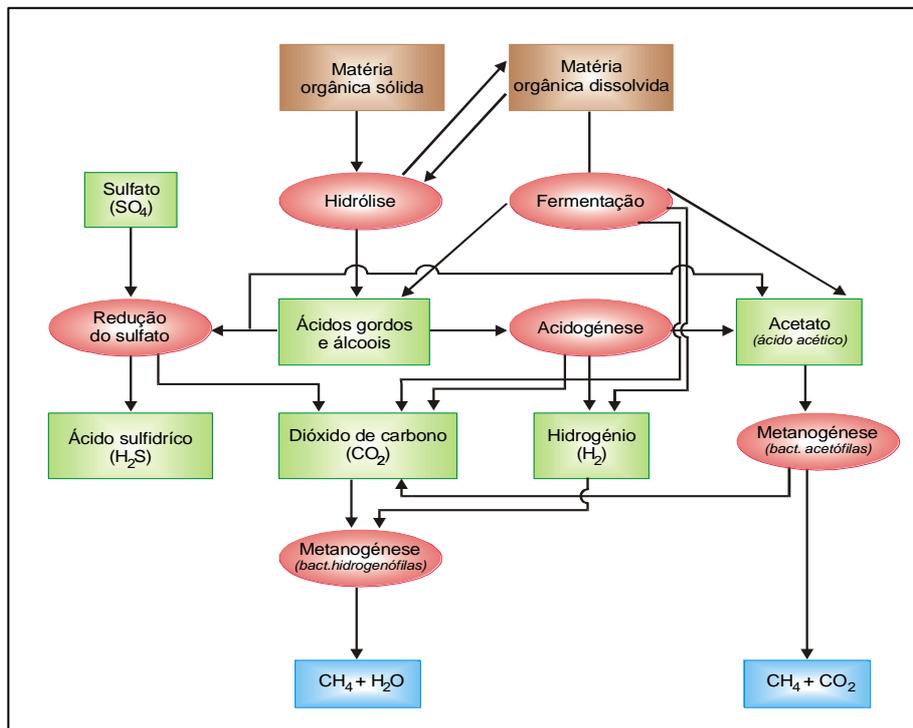


Figura 2. 24 - Produção de biogás a partir da matéria orgânica (Fonte: Amarsul, 2000)

Os fatores que influenciam a produção do biogás são os seguintes:

h) Composição dos resíduos urbanos depositados

A geração de biogás em aterro está diretamente relacionada com a composição dos resíduos urbanos depositados, uma vez que afeta a produção do biogás de forma qualitativa e quantitativa.

Quanto maior for a percentagem de materiais biodegradáveis, maior será a quantidade de substrato para os microrganismos responsáveis pela biodegradação dos resíduos, aumentando deste modo a taxa de produção do biogás.

i) Tamanho das Partículas

Existe uma relação inversamente proporcional entre a superfície exposta dos resíduos e o tamanho dos mesmos, expressa pela superfície específica (área da superfície a dividir pelo volume dos resíduos). De facto, observou-se um aumento da velocidade de degradação

quando a massa é composta por resíduos menores, o que tem levado ao uso de trituradores. Portanto, tanto em processos aeróbios como anaeróbios, o tamanho das partículas tem influência na degradação dos resíduos.

j) Humidade

Depois da composição, para muitos aterros, a humidade contida nos resíduos é o fator mais significativo na produção de biogás. As condições de humidade dentro do aterro dependem de muitos fatores. Entre eles, temos:

- Humidade dos resíduos, ou seja, a humidade dos resíduos na deposição em aterro;
- Impermeabilização da zona basal;
- Pluviosidade da região onde se opera o aterro; Tipo de cobertura colocada.

Na maioria dos casos, os resíduos urbanos quando são depositados no aterro não estão saturados. Os dois fatores que contribuem para a saturação dos resíduos são: A água pluvial e a pressão das sucessivas camadas superiores.

Assim que a saturação é alcançada, a pressão da água livre acelera as reações químicas e biológicas.

k) Temperatura

A temperatura é um fator bastante significativo no processo de decomposição de resíduos visto que esta atua na cinética das reações bioquímicas responsáveis pela conversão de resíduos em gases, líquidos e compostos bio estabilizados.

A formação de metano pode ocorrer numa faixa bastante ampla, entre 0 °C e 97 °C, porém a percentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre nas seguintes faixas de temperatura: 30 a 35 °C para mesófilas ou de 50 a 55 °C para termófilas.

O mais importante é a manutenção de uma temperatura uniforme dentro dos biorreatores, pois variações bruscas de temperatura podem provocar o desequilíbrio entre as populações microbianas envolvidas, com conseqüente falha no processo (Chernicharo, 1997).

Relativamente à temperatura, existem dois aspectos que devem ser tomados em consideração: A temperatura desenvolvida dentro da massa de resíduos; A influência da temperatura externa sobre os processos que ocorrem internamente.

A atividade enzimática das bactérias depende estritamente da temperatura, visto que, as alterações bruscas de temperatura causam desequilíbrio nas culturas envolvidas, principalmente nas bactérias que formam o metano.

l) pH

O pH tem fundamental importância para a manutenção do crescimento ótimo dos microrganismos e dos processos de conversão nos sistemas anaeróbios. A gama de variação de pH para a produção de metano situa-se entre 6 e 8. As bactérias mais sensíveis às variações de pH são as metanogénicas, apresentando uma gama ótima para a digestão anaeróbia que varia entre 6,5 e 7,6. Um pH ótimo para as bactérias situa-se entre 6,7 e 7,5 e é dentro desta

gama que se desenvolve a Metanogénese, onde a produção de gás metano é maximizada. Para um pH abaixo de 6 ou acima de 8 a produção de metano é severamente limitada (Borba, 2006).

m) Impermeabilidade ao ar

As bactérias metanogénicas são basicamente anaeróbias. A decomposição de matéria orgânica na presença de ar (oxigénio) irá apenas produzir dióxido de carbono. Em contrapartida, se a decomposição da matéria for feita sem contacto com o ar (oxigénio) irá produzir metano.

Nenhumas das atividades biológicas dos microrganismos, incluindo o seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo, exigem oxigénio. Se o biorreator não estiver perfeitamente vedado a produção de biogás é inibida (Borba, 2006).

n) Tempo de vida dos resíduos depositados

O processo de produção de gás em aterros passa por cinco fases distintas sendo que, a produção de metano só se verifica a partir da terceira fase (fase metanogénica). A duração de cada fase depende das condições próprias de cada aterro.

Resíduos novos possuem um maior potencial de produção de metano do que resíduos antigos que, em condições de humidade adequada, já passaram pelos processos de biodegradação (Borba, 2006).

o) Operação no aterro

Sempre que se verifique uma maior compactação de resíduos, a presença de oxigénio na massa será menor, o que leva a uma diminuição do processo aeróbio e, conseqüentemente, leva a uma provável antecipação na produção de metano. Esta maior compactação irá, também, diminuir a superfície de exposição e dificultar a passagem de líquidos e gases.

A recirculação irá diminuir as elevadas concentrações de CBO_5 e do CQO, que são causadas pelos ácidos orgânicos na decomposição dos resíduos no interior do aterro, levando desta forma a um rápido desenvolvimento de bactérias anaeróbias ativas produtoras de metano (Borba, 2006).

2.4.2 Composição do Biogás

O biogás é composto, essencialmente, por CH_4 e CO_2 , em que estes dois gases representam cerca de 95% com baixa a nula concentração de O_2 . A percentagem de cada um destes gases que formam o biogás variam consoante a fase de degradação em que se encontra a massa de resíduos, tal como descrito anteriormente.

Geralmente em termos quantitativos e nas condições ideais, os diferentes gases que formam o biogás apresentam, normalmente, as seguintes porções; o CH_4 com 50% a 60%, o CO_2 com 40% a 45% e, as componentes vestigiais, na ordem dos 5%.

Este tipo de gás encontra-se, a temperaturas elevadas e possui um odor característico.

Tabela 2. 7 - Composição típica do biogás (Fonte: Cabeças, 2014)

Composição do biogás		Intervalo	Média
Metano (combustível)	CH ₄	30 – 75 %	48 %
Dióxido de carbono	CO ₂	30 – 50 %	40 %
Azoto	N ₂	5 – 30 %	10 %
Hidrogénio (combustível)	H ₂	0 – 3 %	1 %
Oxigénio	O ₂	0 – 5 %	0,5 %
Árgon	Ar	0 – 0,4 %	0,1 %
Ácido sulfídrico	H ₂ S	0 – 100 ppm	20 ppm
Enxofre total	S	0 – 200 ppm	20 ppm
Cloro total	Cl	0 – 100 ppm	20 ppm

2.5 Modelos de previsão da produção de biogás

2.5.1 Modelo IPCC

O modelo do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), de 1996, possui dois métodos para a previsão da emissão de CH₄ a partir da degradação de resíduos urbanos; o primeiro método denomina-se de método padrão e o segundo por decadência de primeira ordem (DPO).

O método de DPO difere pelo facto de este método devolver um conjunto de dados de emissões dependentes do tempo, o que torna este método mais confiável porque é o que se aproxima mais da realidade do processo de degradação ao longo do tempo.

Enquanto o método padrão baseia-se na hipótese de que todo o potencial do metano é libertado no ano em que foram depositados os resíduos.

É relevante ter em conta que, para o método padrão, caso a quantidade ou a composição dos resíduos depositados num aterro mudar rapidamente ao longo do tempo, este método não conseguirá devolver uma série de dados precisa.

O método de DPO é expresso pela Equação seguinte.

$$\text{CH}_4 \text{ gerado num ano } t \left(\frac{\text{Gg}}{\text{ano}} \right) = \sum_x [(A \cdot k \cdot \text{MSW}_T(x) \cdot \text{MSW}_F(x) \cdot L_0(x)) \cdot e^{-k(t-x)}]$$

Onde:

t = ano correspondente

x = anos para os quais os dados de entrada devem ser adicionados

A = (1 - e^{-k})/k; fator de normalização que corrige o somatório

k = taxa de geração constante de metano (1/ano)

MSW_T(x) = Total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no ano x (Gg/ano)

MSW_F(x) = Fração de RSU depositados em aterro no ano x

L₀(x) = Potencial de produção de metano

2.5.2 Modelo LandGEM

Os cálculos para a determinação da existência de fugas e emissões difusas nos aterros do Ecoparque de Palmela e do Seixal foram determinados tendo em conta a seguinte metodologia, em que, para a determinação da produção de biogás teórica teve como base o programa LandGEM cujo foi criado pela United States Environmental Protection Agency. (U.S EPA). De seguida, após a obtenção de todos os dados necessários para continuar o estudo, de modo a estimar os valores de produção de biogás, recorreu-se aos princípios teóricos da produção de biogás a partir do programa LandGEM. Este programa baseia-se na seguinte expressão:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k \cdot t_{ij}}$$

Q_{CH₄} – Metano Produzido no ano de cálculo (m³/ano)

L₀ – Potencial de produção de metano (m³/Mg Resíduos)

M_i – Massa de resíduos confinados no ano *i* (Mg)

n – (Ano de cálculo) – (Ano de arranque da instalação)

i – Incremento de tempo (1-ano)

j – Incremento de tempo (0,1-ano)

t_{ij} – Período *j* que decorre desde o confinamento da massa de resíduos *M_i* no ano *i* (ano)

Potencial de Produção de Metano, L₀

De seguida, para se determinar o parâmetro L₀, cujo é obtido tendo em conta a composição de resíduos recolhidos e através da seguinte expressão, primeiro calculou-se o parâmetro DOC que está apresentado na expressão posterior à do parâmetro L₀.

$$L_0 = MCF * DOC * DOC_f * F * 16/12 \text{ (CH}_4\text{/ton. RU)}$$

MCF - Fator de correção da produção de metano (adimensional)

DOC - Fração de carbono orgânico biodegradável (Ton.C/ton RU)

DOC_f - Fração de carbono orgânico não biodegradável (%)

F - Fração de metano no biogás

16/12 - Fator de conversão de C para CH₄.

Antes de proceder com a determinação do parâmetro L₀ temos que determinar primeiro o DOC, o mesmo está apresentado na seguinte expressão.

$$DOC = (0,4*A) + (0,17*B) + (0,15*C) + (0,3*D)$$

A - Fração de RU inserida nas categorias Papel e têxteis

B - Fração de RU inserida na categoria resíduos de jardim

C - Fração de RU inserida na categoria putrescíveis

D - Fração de RU inserida na categoria madeira

E, por último, em relação ao parâmetro *k* foi considerado um valor empírico de 0,05.

2.6 Modelo aritmético para a projeção de população

De forma a obter os dados relacionados com a população e a captação de resíduos, consultou-se a PORDATA e os relatórios do estado do ambiente disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Para estimar a evolução da população residente na Península de Setúbal recorreu-se ao método de projeção aritmética, a saber:

p) Taxa de Crescimento, T_a

Primeiro determina-se a taxa de crescimento associada aos dados da população dos anos anteriores para projetar a população futura. A taxa de crescimento é determinada pela seguinte equação.

$$T_a = (P_2 - P_1) / (t_2 - t_1)$$

Sendo que:

T_a - Taxa de crescimento aritmético

P_1 e P_2 - População conhecida (hab.)

t_1 e t_2 - Anos de referência (hab.)

q) População Projetada, P_n

Para determinar o valor da população projetada para um determinado ano, pode-se então recorrer à seguinte expressão:

$$P_n = P_0 + (t_n - t_0) * T_a$$

P_n - População futura (hab.)

P_0 - População o último ano considerado (hab.)

t_n - Ano correspondente à população P_n

t_0 - Ano correspondente à população P_0

2.7 Gases de efeito de estufa

O gás existente no biogás que causa maiores preocupações em termos de gases com potencial para o aquecimento global da Terra é o CH_4 . Este gás tem um potencial de aquecimento global oito vezes superior a uma molécula de gás de CO_2 . É importante seguir todas as medidas de proteção ambiental passiva e ativa de modo a prevenir qualquer fuga indesejável deste gás para a atmosfera.

Segundo (Levis & Barlaz, 2011; Miller *et al.*, 2013) as principais preocupações ambientais relativamente aos aterros é a emissão dos gases gerados para a atmosfera, uma vez que o biogás gerado é uma mistura constituída principalmente por 30-75% de CH_4 e 25-50% de CO_2 (Amini & Reinhart, 2011).

Sendo ambos gases com efeito de estufa, o CH_4 é aquele que representa maior preocupação, uma vez que o seu Potencial de Aquecimento Global (PAG) é 22 a 25 vezes superior ao

do CO₂, (Forster *et al.*, 2007), pelo que é considerado gás de efeito estufa nos modelos de cálculo de aterros do IPCC (Börjesson *et al.*, 2007).

Saliente-se que cerca de 18% das emissões antropogénicas globais de CH₄ a nível mundial são geradas pelo sector dos resíduos urbanos e águas residuais, sendo os aterros a principal fonte (Bogner *et al.*, 2008).

Estima-se que os aterros libertem entre 35 e 69 Tq CH₄ por ano para a atmosfera (Huber-Humer *et al.*, 2011) e que sejam responsáveis por 3-7% das emissões globais de CH₄ (Chanton *et al.*, 2011).

Releva-se que as autoridades reguladoras australianas consideram que, embora o CO₂ seja um gás de efeito estufa, foi estabelecido que o CO₂ proveniente de aterros tem um efeito de estufa neutro devido à sua origem biogénica não aprovando os métodos de medição direta das emissões dos aterros. É apenas obrigatório o reporte das emissões de CH₄ e, o CO₂ gerado diretamente pelo aterro ou pela combustão de CH₄, não é considerado uma emissão de GEE (IPCC, 2006).

❖ Dióxido de Carbono

O CO₂ é produzido na biodegradação da matéria orgânica tanto aerobiamente como anaerobiamente, sendo um dos principais gases produzido em aterros sanitários. O dióxido de carbono constituiu um gás com elevados efeitos em termos de GEE e do potencial global de aquecimento do planeta.

❖ Metano

A capacidade de um gás com efeito de estufa contribuir para o aquecimento global da terra é normalmente expressa pelo seu Potencial de Aquecimento Global (PAG). O PAG indica até que ponto uma substância é mais poderosa do que a substância padrão, ou seja, o CO₂, que por definição tem um PAG igual a um.

O gás metano possui um maior Potencial de Aquecimento Global quando comparado ao dióxido de carbono. Isso ocorre devido ao alto coeficiente de absorção por radiação ultravioleta e longa residência na atmosfera. Vários valores do potencial de aquecimento global do metano são relatados na literatura e variam entre 21 e 28 vezes maior que o CO₂ (Fischer *et al.*, 1999; Christophersen *et al.*, 2001).

O metano é um gás com efeito de estufa porque retém calor (proveniente das radiações infravermelhas) e impede a sua libertação para o espaço, contribuindo para o aumento das temperaturas da atmosfera e da superfície terrestre e, deste modo, para o "*efeito de estufa global*".

O metano tem um tempo de vida na atmosfera relativamente curto em relação aos outros principais gases com efeito de estufa, e desta forma a redução das emissões de metano contribuiria para melhorar o problema do aquecimento global de um modo relativamente

rápido (o CH₄ tem um tempo de permanência médio na atmosfera de 12 a 17 anos enquanto para o CO₂ este valor é de 50 a 200 anos).

Por outras palavras, o efeito da aplicação de uma estratégia de redução das emissões de metano exerceria um impacto sobre o efeito de estufa global a um prazo bastante mais curto do que no caso do CO₂, em que os benefícios de tal estratégia apenas seriam perceptíveis a médio ou longo prazo.

A simples combustão do metano transforma este gás em CO₂ e elimina 95% do seu potencial de aquecimento. Por conseguinte, as estratégias de redução do metano oferecem um meio eficaz de atenuar o aquecimento global num futuro próximo, constituindo não só uma alternativa atraente a curto prazo como também um compromisso imprescindível a longo prazo.

❖ Hidrogénio

O hidrogénio é produzido por bactérias acetogénicas e fermentativas, sendo posteriormente consumido pelas bactérias metanogénicas. Principalmente em aterros jovens, verifica-se inicialmente uma acumulação de hidrogénio, chegando a concentrações maiores que o limite de explosividade de 4% (Fischer *et al.*, 1999) pelo facto de as bactérias metanogénicas ocorrerem de forma lenta.

2.8 Alterações Climáticas

As alterações climáticas é um dos temas mais falado atualmente, hoje em dia, já são registados acontecimentos que foram previstos por estudos realizados, tal como o aumento de cheias, incêndios florestais, entre outros.

Este fenómeno acontece devido, essencialmente, à atividade humana. Devido a mais de um século de industrialização, desflorestação e de produção agrícola em grande escala, foram emitidas grandes quantidades de GEE para a atmosfera. Com o aumento da população, o aumento economia e do tipo de estilos de vida vai aumentar o nível de emissões de gases de efeito estufa.

Foi provado cientificamente que, a concentração de GEE na atmosfera está diretamente relacionada com a temperatura média global da Terra, que a concentração destes gases tem aumentado constantemente e que o GEE mais abundante, responsável por cerca de dois terços dos GEE, é o CO₂, cujo provém essencialmente da queima de combustíveis fósseis.

Está previsto que, devido ao aumento da temperatura dos oceanos o gelo continuará a derreter, e como consequência o nível médio do mar irá aumentar 24 a 30 centímetros em 2065 e 40 a 63 centímetros em 2100, em relação ao período de referência de 1986-2005. Mesmo que as emissões de GEE sejam interrompidas os seus impactes continuarão presentes.

Para combater as alterações climáticas foi definido o Acordo de Paris com o principal objetivo de limitar a temperatura média global abaixo dos 2°C.

Caso seja quebrado este limite, os cientistas consideram que estará associado um risco catastrófico de consequências ambientais à escala mundial. No entanto, a ONU alertou que a meta do Acordo de Paris pode não ser alcançada. (ONU, 2021). No ano de 2018 a IPCC emitiu um relatório sobre os impactes do aquecimento global de 1,5°C, e foi concluído que para limitar o aquecimento global a este nível requeria mudanças rápidas, profundas e sem precedentes em todos os aspetos da sociedade.

O clima da Terra tem como principal influência a quantidade de energia que recebe do sol, para além de fatores como a quantidade de gases com efeito de estufa (GEE) e aerossóis (pequenas partículas) presentes na atmosfera, e das propriedades da superfície terrestre, que intervêm na forma como a energia solar é retida ou refletida de volta para o espaço. Desta forma, tanto a sociedade como os ecossistemas vão ser beneficiadas. (ONU, 2021).

Numa perspetiva do estudo a ser realizado, é relevante ter em conta que as emissões difusas que podem ocorrer não importantes de conter ao máximo para evitar a sua emissão para a atmosfera. A libertação de gases com efeito de estufa (GEE) induzido pelas atividades humanas está a alterar o equilíbrio natural e a provocar o aumento da temperatura, visível que já hoje com a ocorrência inesperadas de catástrofes e intempéries, antes pouco normais e frequentes em várias zonas do globo terrestre. Estima-se que a temperatura global subiu cerca de 0,8°C nos últimos 150 anos. Dos dez anos mais quentes, nove deles ocorreram depois de 2000, demonstrando uma tendência contínua no aquecimento global de longo prazo.

Segundo dados do *Relatório sobre o ambiente na Europa – estado e perspetivas 2020 (SOER 2020)* entre os anos 2000 e 2017 as emissões de metano, gás com efeito de estufa, subiram para valores que os cientistas admitem que irão provocar um aquecimento de três a quatro graus celsius antes do fim do século. Em 2017, o último ano de dados globais disponíveis sobre metano, a atmosfera terrestre absorveu quase 600 milhões de toneladas de gás metano, que tem um efeito de estufa 28 vezes mais potente do que o dióxido de carbono, ao permanecer na atmosfera durante mais de 100 anos.

Devido às suas características geográficas, Portugal encontra-se entre os países europeus com maior vulnerabilidade a estas alterações.

Para limitar o aumento e prevenir os impactes das alterações climáticas existem atualmente duas linhas de atuação: reduzir os GEE na atmosfera, reduzindo emissões e aumentando o sequestro de carbono (*medidas de mitigação*) e adaptar o país às mudanças previsíveis para minimizar os efeitos negativos das alterações climáticas nos ecossistemas e na qualidade de vida da população (*medidas de adaptação*).

A nível de Portugal, a resposta política e institucional nesta matéria encontra-se espelhada nos seguintes instrumentos em vigor:

- **Quadro Estratégico para a Política Climática** - O QEPiC estabelece a visão e os objetivos da política climática nacional no horizonte 2030, estabelecendo um quadro integrado, complementar e articulado de instrumentos de política climática. O QEPiC contém ainda ferramentas no domínio da monitorização, comunicação, financiamento e governação relativas às alterações climáticas.
- **Programa Nacional para as Alterações Climáticas** - O PNAC 2020/2030 estabelece linhas de orientação para políticas e medidas setoriais; define metas setoriais que consubstanciam os objetivos de redução de emissões nacionais, decorrentes do Compromisso para o Crescimento Verde (CCV) e previstas no QEPiC, e identifica um conjunto de opções de políticas e medidas setoriais com potencial custo-eficaz.
- **Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas** - A ENAAC 2020 estabelece os objetivos, as atividades e o modelo de organização e funcionamento da Estratégia até 2020, com vista a promover a integração da adaptação às alterações climáticas nas diversas políticas públicas e instrumentos de operacionalização, designadamente de carácter territorial, bem como na sociedade em geral.
- **Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)**, estabelece as trajetórias que conduzem à neutralidade carbónica, identificação dos principais vetores de descarbonização e estima o potencial de redução dos vários setores da economia nacional: a energia e indústria, a mobilidade e os transportes, a agricultura, florestas e outros usos de solo, bem como os **resíduos e águas residuais**. Este documento demonstra que existem trajetórias custo-eficazes tecnologicamente exequíveis e economicamente viáveis para alcançar a neutralidade carbónica, tendo um impacto positivo na economia e na criação de emprego, fomentar o investimento e criar um maior dinamismo económico. Adicionalmente, tem associados diversos impactos positivos, como a melhoria da qualidade do ar que se traduz inevitavelmente em ganhos ao nível da saúde.

Assinale-se que o *Acordo de Paris*, alcançado em 2015, estabeleceu objetivos de longo prazo de contenção do aumento da temperatura média global a um máximo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com o compromisso por parte da comunidade internacional de prosseguir todos os esforços para que esse aumento não ultrapasse 1,5°C, valores que a ciência define como máximos para se garantir a continuação da vida no planeta sem alterações demasiado gravosas.

Limitar o aquecimento global a 1,5 °C, em linha com os objetivos mais ambiciosos do *Acordo de Paris* e do *Relatório Especial do Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC)* sobre o aquecimento global de 1,5 °C, requer a transformação sem precedentes das sociedades e a redução urgente e profunda de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em todos os setores de atividade, com mudanças comportamentais e o envolvimento de todos os atores.

A União Europeia (UE) prepara-se para adotar a sua estratégia de longo prazo, com base na Comunicação da Comissão Europeia «*Um Planeta Limpo para Todos*», apresentada a 28 de novembro 2018. Segundo esta estratégia, as projeções indicam que as políticas e os objetivos já estabelecidos para a UE como um todo permitirão uma redução das emissões de GEE de cerca de 45 % até 2030 e de cerca de 60 % até 2050.

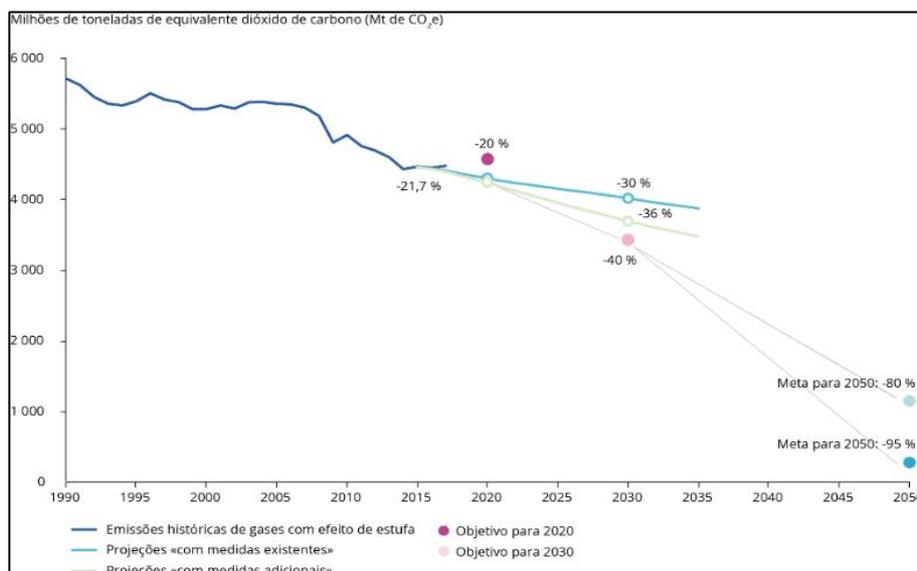


Figura 2. 25 - Emissões históricas e projeção para 2050 de gases de efeito de estufa na UE-28, 1990 2050 (Fonte: SOER 2020)

2.9 Energia renovável. Sistema fotovoltaico

Em Portugal, de acordo com o REA de 2021, numa perspetiva de consumo de energia primária por fonte energética, o petróleo e derivados permanecem como a fonte energética mais utilizada, representando 40,3% do consumo de energia primária em 2020.

Nesse mesmo ano Portugal obteve uma total produção bruta de 53 054 GWh, no entanto, as perdas associadas ao transporte e distribuição foram cerca de 4 477 GWh, representado cerca de 8% da total produção bruta. (DGEG, 2021).

Numa vertente de custos associados aos impactos ambientais, sabemos que a preocupação com os impactos ambientais associados às atividades antropogénicas tem vindo a ser um tema debatido frequentemente.

A necessidade crescente de produzir energia para satisfazer todas as necessidades básicas do ser humano tem um impacte significativo no ambiente, pelo que existe a necessidade de optar por outras formas de produzir energia de modo a ser mais sustentável para o planeta.

Numa ótica da produção de energia a partir de sistemas fotovoltaicos, a eficiência associada à produção de energia a partir deste tipos de sistema ainda relativamente baixo face à às características climáticas que Portugal oferece.

Contudo, pode e deve ser um caminho a fomentar e dinamizar para substituir de forma consistente o petróleo e derivados como a fonte energética mais utilizada.

2.10 Estudos experimentais

Foram realizados ensaios de campo num aterro experimental de Belo Horizonte, onde se estimou que o fluxo médio de CH₄ e de CO₂ na camada de cobertura, ao utilizar a metodologia da placa de fluxo, foi de 375 kg e 353 kg, respetivamente, emitidos diariamente para a atmosfera.

Em relação à qualidade do biogás, do aterro experimental mencionado, foram registadas reduções entre 38 e 68% da concentração do metano comparativamente às concentrações internas e os valores emitidos pela camada de cobertura.

Neste estudo realizado em Belo Horizonte foram comparados os valores determinados com o modelo LandGEM com os valores reais, observando-se valores bastantes diferentes.

O material utilizado na cobertura também foi diferente, foi utilizado um material fino proveniente da região central de Belo Horizonte.

Os resíduos coletados na área municipal que foram depositados são constituídos, em média, por 53,82 % de matéria orgânica, 17,30 % de papel, 2,29 % de metal, 2,85 % de vidro e 7,54 % de inertes. (Fernandes, 2009).

▪ Em contexto nacional

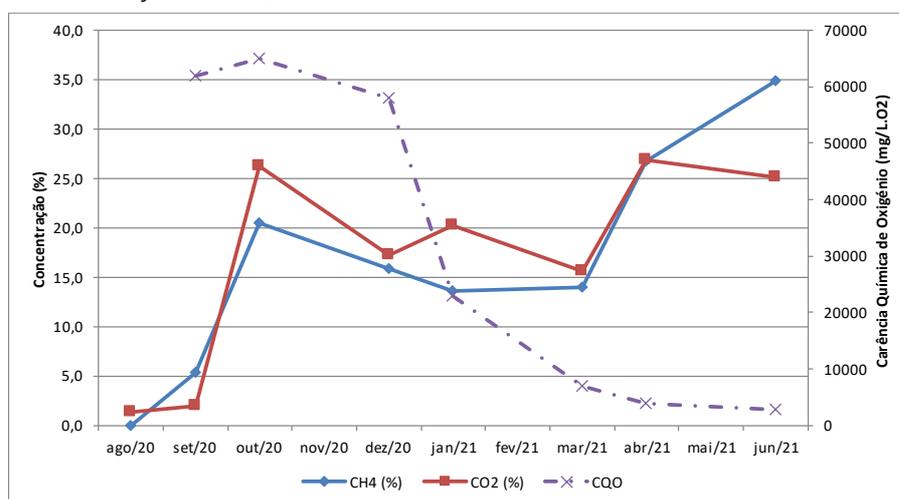
Em Portugal foi realizado um caso de estudo na concessionária da ALGAR, S.A., utilizando um contentor de grande capacidade, de 30 m³ para o desenvolvimento de um *biorreator piloto* experimental que foi preenchido por camadas sucessivas com a "*fração resto*" proveniente da respetiva TMB localizada em S. Brás de Alportel. (Costa, 2021).

Neste estudo foram realizados ensaios e medições no *biorreator piloto* entre agosto de 2020 e junho de 2021, que permitiram identificar a evolução da degradação da matéria biodegradável residual depositada em função das concentrações que foram sendo registadas dos seus principais gases como sejam, o metano, o dióxido de carbono, o oxigénio e o gás sulfídrico. No período inicial deste estudo a válvula de fundo do biorreator foi fechada e, só após 4 meses, foi aberta para recolha de amostras de lixiviados.

Quando se abriu a válvula de fundo com a saída livre do lixiviado gerado pelo dreno inserido no biorreator, o ambiente interno do biorreator altera-se e as concentrações do CH₄ e CO₂ decresceram rapidamente e, logicamente o O₂ aumentou. Este novo ambiente afetou a estabilidade e a eficiência da Metanogénese iniciada pela alteração das condições anaeróbias que estavam em curso na *fase de Acidogénese*. Segundo (Costa, 2021) esta situação resultou do facto de parte de matéria biodegradável ter-se dissolvido no lixiviado retido no interior devido ao fecho da válvula e, após a abertura da válvula, este saiu e arrastou ainda mais finos soltos, abrindo vazios por espaços/canais criados no interior dos refugos depositados.

Porém, após estabilização da massa de resíduos e o esgotamento de consumo do O₂, as medições seguintes registaram já valores próximos dos 40% (entre 36% e 40%) e teores de dióxido de carbono de 22% a 28%, com valores de oxigênio de 0%, revelando o início de uma *fase de Metanogénese*. Ou seja, atingiu-se em *120 dias a fase acidogénica* com a válvula de fundo fechada e, com a abertura da válvula o ambiente alterou-se nos 90 dias seguintes (janeiro/fevereiro/março), mas, após esse período, nos 90 dias seguintes (abril/maio/junho) foi recuperado o ambiente de degradação em anaerobiose da matéria biodegradável residual, tendo sido atingida a *fase Metanogénica*.

A correlação que se verificou entre a degradação da matéria residual biodegradável no biorreator em termos do biogás com a evolução das características dos lixiviados nos mesmos períodos, apresenta-se no gráfico seguinte, observando-se a evolução do CH₄ e CO₂ comparativamente com a evolução do CQO.



O CQO atinge os seus maiores valores na fase de arranque do biorreator, correspondendo às características de um aterro jovem, estando em linha com os valores de bibliografia.

A partir de abril e até junho é notória a correlação. O CH₄ e o CO₂ sobem para um pico de 40% e 29%, respetivamente, e o CQO diminui drasticamente revelando o esgotamento da degradação da matéria orgânica residual do biorreator. Acresce que o índice de biodegradabilidade obtida pela relação CBO5/CQO era inferior a 0,1 e o pH tinha aumentado para o valor de 7,1. Verifica-se assim uma correlação perfeita, característica em ambas situações, da etapa de fase Metanogénese no biogás e nos lixiviados. Pode-se assim salientar que a comparação entre a evolução do CQO e os principais gases do biogás pode ser um indicador a utilizar para avaliação do ambiente de degradação da matéria orgânica em aterro.

▪ Composição física da Fração Resto obtidas em unidades TMB

Através de bibliografia foi possível referenciar outras situações onde constam os dados pesquisados sobre dados da Fração Resto em instalações de TMB em operação em Portugal.

Em cinco sistemas de gestão de resíduos urbanos, Amarsul (AS), Resinorte (RE), Suldouro (SD) Tratulixo (TL), Valnor (VN) e Valorsul (VL) a Fração Resto obtida nestas TMB é maioritariamente composto por *vidro, pedras e outros*, possuindo ainda *resíduos de metal, tijolo, plástico e cerâmica*.

Nesta pesquisa, a fração "outros" é referente à *fração com granulometria inferior a 2,8 mm*, sendo composta essencialmente por matéria biodegradável, inertes e sujidade.

A fração "outros" na qual se insere a matéria biodegradável, tem um peso entre os 7,3% nas instalações da TRATOLIXO revelando uma linha de processo com grande eficiência e, de 49 % na VALNOR. Este valor elevado na Valnor justifica-se pelo facto de, após a triagem mecânica inicial existir uma outra linha de separação da Fração Resto em instalações complementares, apenas com equipamentos de trituração e com separação gravimétrica, para recuperação e doseamento desta fração e obter o designado CDR (combustível derivado de resíduos) para posterior valorização energética em cimenteiras. Nas outras centrais a eficiência não era elevada verificando-se que nesta Fração Resto ainda se encontra matéria biodegradável residual após a separação nominal dos RU indiferenciados, quer na cabine de triagem de volumosos, quer na linha de tratamento mecânico.

A composição física da Fração Resto das respectivas unidades TMB anteriormente referidas apresenta-se na figura seguinte.

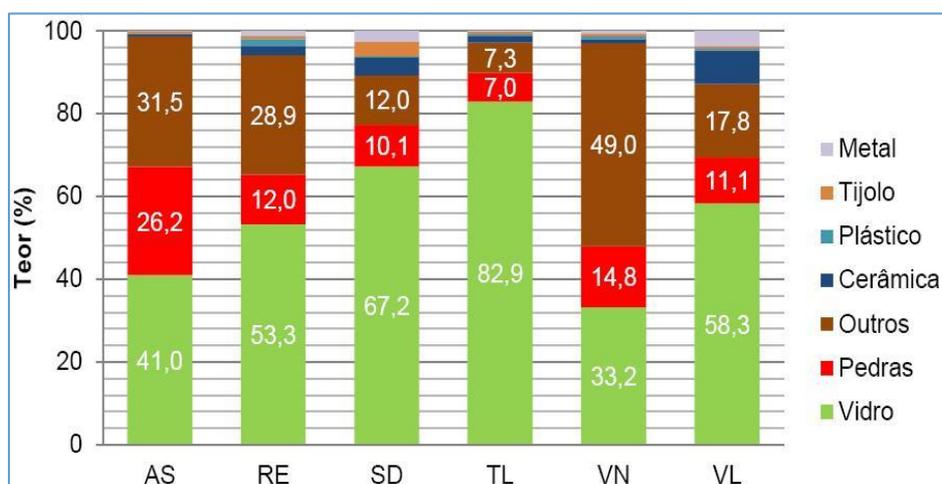


Figura 2. 26 - Composição Física do Rejeitado em várias unidades TMB (Fonte: Máximo, 2013)

▪ Indicadores e factores retidos da revisão efetuada a ter em consideração

Da revisão da literatura importa ainda assinalar indicadores e fatores retirados, bem como alguns aspetos importantes a ter em consideração, a saber:

- Emissões difusas :
 - Com maior pluviosidade a emissão difusa de metano pela camada de cobertura do aterro é reduzida, inferior à do período quente.

- As emissões difusas do metano situam-se em cerca de 30%
- O solo de cobertura aplicado nos aterros exerce uma importante função, na otimização dos processos microbianos de oxidação do biogás não recolhido. Deste modo, é possível converter quantidades consideráveis de metano em dióxido de carbono biogénico, cerca de 10% anualmente (Czepiel *et al*/1996).
- O solo de cobertura tem também funções de controlo de infiltrações de água e oxigénio, proteção do ambiente anaeróbio, e cobertura dos resíduos.
- GEE em permanência na atmosfera:
 - CH₄ = 12 a 17 anos ; CO₂ = 50 a 200 anos
- Alterações Climáticas:
 - Medidas de mitigação = reduzir emissões e aumentar o sequestro de carbono;
 - Medidas de adaptação = adaptar o país às mudanças previsíveis.
- Potencial de Aquecimento Global (PAG):
 - PAG de CO₂ = 1 (valor padrão); PAG de [CH₄ = 21 a 28 x CO₂]
- Combustão do Metano:
 - Dá origem a CO₂ e vapor de água e, 1 ton de CH₄ é convertida em 2,75 ton de CO₂.
 - O valor de PAG pré-combustão é de 2,75, (2,75 x PAG de CO₂).
 - Convertendo o CH₄ em CO₂ por meio de um processo de combustão, elimina-se 95% do problema do efeito de estufa, pois, o CO₂ produzido durante a combustão representa apenas 5% do potencial de aquecimento global do metano original.
- Casos experimentais:
 - Na ausência de resíduos alimentares a Produção de biogás foi inferior a 50% (Krause *et al* (2020)).
 - Sem resíduos alimentares depositados em aterro o potencial de metano reduz-se em 33% com Lo = 42 m³/Mg (O'Brian, 2016).
- Emissões difusas/fugitivas
 - As emissões difusas de metano resultam da ineficiência do sistema de captação de biogás no aterro sanitário, de ocorrência de fissuras na camada de cobertura e de fugas pelos taludes. Os procedimentos a adotar na exploração dos aterros devem ser: o aumento do número de drenos de captação do biogás com redução dos espaços entre eles, garantindo raios de influência para a cinética do gás de 10 m a 25 m que reduzam estas emissões difusas e melhorar a compactação da camada de cobertura.

METODOLOGIA

3.1 Objetivos específicos

A metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho que se apresenta, tem por base os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o estado de arte atual da recolha seletiva Tri-fluxo e de biorresíduos a nível nacional e, com base em considerandos assumidos em função da política económica e ambiental atual de diferentes documentos oficiais, nomeadamente, o RARU 2020, o Plano de Recuperação e Resiliência e, o novo RGGR, adotam-se os pressupostos que se identificam mais ajustados para projetar a evolução dos RU e os níveis de esforço para o cumprimento das metas que se exigem a nível nacional e comunitário.
- b) Com base nos pressupostos adotados projeta-se a recolha seletiva Tri-fluxo e de biorresíduos até 2035 a nível nacional e ao nível do sistema multimunicipal da AMARSUL.
- c) Para se identificar o efeito que a recolha seletiva de biorresíduos futura provoca na geração do biogás nos aterros de nova geração, desenvolveu-se o caso de estudo através de dois biorreatores piloto construídos, um simulando o aterro de nova geração pós-2035 com confinamento da fração resto da CVO do Seixal, e, o outro com confinamento de RU indiferenciado como um aterro atual. Com base nas medições do biogás gerado em ambos os biorreatores associado às diferentes fases de biodegradabilidade observadas, avaliam-se as condições expectáveis nos aterros pós-2035.
- d) Na mesma linha seguida de pesquisa adotada nos biorreatores, projetam-se duas situações para os aterros da AMARSUL, ou sejam; uma como se os aterros evoluíssem normalmente até 2035 e, outra, evoluindo no cumprimento da obrigatoriedade de recolha seletiva de biorresíduos e multimaterial. Determinam-se as emissões do biogás gerado e, analisam-se os reflexos diretos que se esperam nos aterros de nova geração pós-2035 com a redução das emissões de efeitos de gases de estufa (redução do biogás gerado) com evidentes benefícios nas alterações climáticas.
- e) Tendo presente que existirá perda de receitas da energia do biogás bonificada pela suspensão do regime especial de tarifa garantida, avalia-se por painéis fotovoltaicos a instalar em áreas potenciais do aterro a correspondente energia gerada.

É neste contexto que se apresenta de seguida o trabalho desenvolvido bem como os dados, a pesquisa, os resultados e a análise crítica destes.

3.2 Prospetiva futura. Pressupostos.

Na realização da análise relativa à prospetiva futura e aos pressupostos a adotar para a projeção pretendida teve-se presente os seguintes dados e considerandos:

- Primeiro foi definido o ano de referência da projeção de dados e, para tal, foi considerado 2019 como o ano mais recente com dados consolidados. Neste ano registou-se uma produção de 5 006 800 toneladas de resíduos urbanos, com uma capitação de 1,4 kg/(hab.dia).

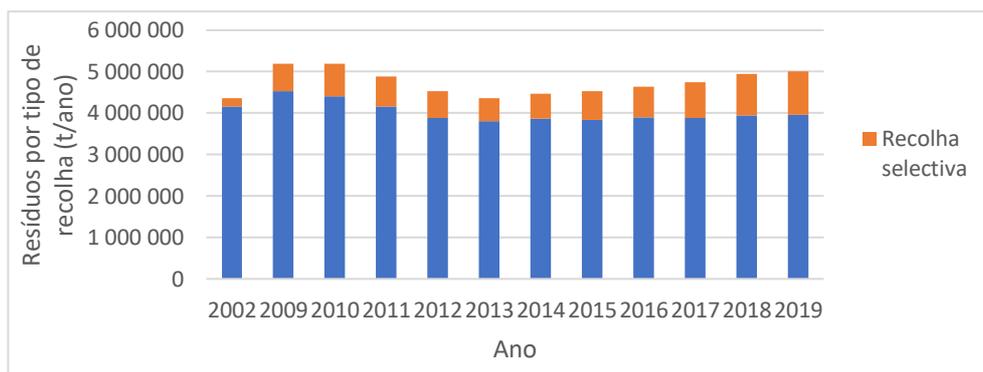


Figura 3. 1 - Total de resíduos recolhidos de forma seletiva e indiferenciada, em Portugal. (Fonte: PorDATA, 2020)

- A taxa de preparação para reutilização e reciclagem em 2019 foi de 41% (RARU 2020), sendo a meta a que Portugal está vinculado de 50% para 2020. O cumprimento da meta estabelecida exige um aumento de 9 p.p em 2020.
- As metas futuras estabelecidas para o período de 2020-2035 são: em 2025 a taxa de reciclagem de 55%, em 2030 de 60% e, em 2035 de 65%. Neste contexto será necessário aumentar durante este período de 15 anos 24 p.p para se cumprir a meta de 2035.
- Em relação à recolha seletiva de biorresíduos, foram recolhidos apenas 5 % em 2019 pelo que, para se conseguir atingir uma recolha seletiva de biorresíduos na ordem dos 39% que a caracterização física dos RU revela atualmente como a percentagem de biorresíduos nos RU, assume-se que o objetivo passa por cumprir em 2035, a recolha seletiva de biorresíduos próximo de 100% daquela percentagem.

Também, considerando que:

- No período 2015-2019 a recolha seletiva evoluiu de forma positiva e consistente, com um aumento de cerca de 1% por ano;
- A produção de RU está em regra associada ao rendimento e poder de compra das famílias bem como ao crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) nacional;
- O impacto anual previsto para o PIB no *Plano de Recuperação e Resiliência* (PRR) é, em média, de 0,5 pontos percentuais, ou seja, a economia nacional tenderá a crescer anualmente, em média, 0,5 p.p. até 2026.

Ora, os pressupostos que se adotam terão como base projetar um desenvolvimento evolutivo moderado da recolha seletiva até 2035, mas com a necessária ambição do cumprimento

das metas a que Portugal está vinculado. Assim, os pressupostos base que se assumem para o balanço e a prospetiva futura que se elabora, são os seguintes:

a) Produção de RU no total de 5 006 800 ton em 2019, ano inicial do estudo, com uma evolução anual crescente, mas diferenciada nos períodos 2019-2025, 2025 -2030 e 2030-2035. Para a produção total de resíduos urbanos considera-se a evolução representada na tabela seguinte, assumindo percentagens de crescimento anual que permitem uma abordagem conservadora até 2030 e, mais significativa até 2035.

Tabela 3. 1 - Evolução assumida para a produção total de resíduos até 2035.

Variável	2019-2025	2025-2030	2030-2035
Produção total de resíduos	3,5%	4,0 %	7,5 %

- b) Cumpre-se a obrigatoriedade de recolha seletiva de biorresíduos após 2023.
- c) Verifica-se uma recuperação da economia até 2030 e uma evolução da produção de RU até 2025, semelhante ao identificado nos últimos 5 anos;
- d) No período 2025-2030 e 2030-2035 a evolução da recolha seletiva aumenta em resultado das campanhas de sensibilização junto da população e, a consolidação de novos métodos para a deposição e recolha seletiva municipal de biorresíduos em zonas de densidade populacional elevada e de menor densidade ou, através de soluções comunitárias.
- e) Em 2027 verifica-se o *phase-out* das unidades de TMB existentes, objeto de alterações na linha de processo, para receberem apenas biorresíduos de recolha seletiva, suspendendo a receção de RU de recolha indiferenciada.

As fórmulas de cálculo consideradas foram a 2 e a 4, comportando a seguinte formatação :

- Fórmula 2

Numerador: *Somatório da recolha seletiva (papel e cartão, plástico, metal, vidro, madeira); Recicláveis do TM/ TMB; valorização RUB (teor de RUB na recolha indiferenciada, equivalente a 54% dos RU que entram em TMB, e recolha seletiva RUB); escórias metálicas de valorização energética; outros materiais recicláveis);*
Denominador: *Produção total de RU recicláveis (Equivalente a 73,4% dos RU).*

- Fórmula 4

Numerador: *Retomas da recolha seletiva (papel e cartão, plástico, metal, vidro, madeira); recicláveis do TM/ TMB; valorização RUB (teor de RUB na recolha indiferenciada, equivalente a 54% dos RU que entram em TMB, e recolha seletiva RUB); escórias metálicas de valorização energética; outros materiais recicláveis); outros materiais remetidos para uma operação de valorização.*
Denominador: *Produção total de RU.*

Tendo presente os pressupostos assumidos e as fórmulas de cálculo que validam o cumprimento das metas nos anos estabelecidos, as percentagens consideradas para se estimar a

evolução anual da recolha seletiva Tri-fluxo e recolha seletiva de biorresíduos (neste particular após 2023), apresentam-se na tabela seguinte.

Tabela 3. 2 - Estimativa da evolução da recolha seletiva de RU.

Variável	2019-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035
Recolha seletiva Tri-Fluxo	5,0%	9,0 %	12,0 %	14,0%
Recolha seletiva Biorresíduos	1,0%	12%	25%	40%

Sendo objetivos muito ambiciosos, para o seu cumprimento advoga-se a realização de campanhas regulares e periódicas para sensibilização e colaboração da população em geral e, escolar em particular, bem como, novas soluções técnicas para a recolha seletiva, a compostagem comunitária e remodelação das atuais TMB, previamente, ao phase-out em a 2027. A evolução da produção de biorresíduos foi determinada tendo em conta a caracterização física dos RU recolhidos em Portugal em 2019, onde a percentagem de biorresíduos determinada nos RU produzidos foi de 38,64%, como se pode ver na figura seguinte.

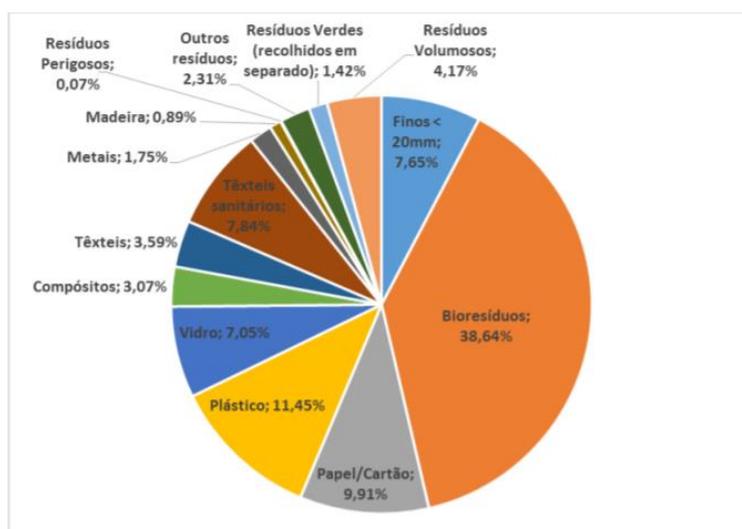


Figura 3. 2 - Caracterização física média dos RU em Portugal, em 2019. Fonte: APA.

De acordo com o exposto anteriormente, considera-se que o PIB irá acompanhar a evolução da economia a crescer anualmente 0,5% como se prevê no *Plano de Recuperação e Resiliência (PRR)*. Por esta razão prevê-se um aumento da produção de RU, considerando o ano 2019 até 2025 (inclusive), em cerca de 3,5%.

Ora, assumindo-se os pressupostos apresentados e a caracterização física dos RU em Portugal em 2019, pode observar-se na tabela seguinte a estimativa da evolução (em ton) da produção de RU e da esperada produção Tri-fluxo e da fração de biorresíduos.

Tabela 3. 3 - Estimativa da evolução de resíduos em Portugal Continental (ton/ano).

Ano	Produção total de resíduos	Produção de biorresíduos	Produção de Tri-fluxo
2019	5 006 800	1 934 628	1 510 051
2020	5 041 848	1 948 170	1 520 621
2025	5 182 038	2 002 339	1 562 903
2027	5 264 951	2 034 377	1 587 909
2030	5 391 309	2 083 202	1 626 019
2035	5 795 658	2 239 442	1 747 970

Tendo presente que a evolução da produção de resíduos e o aumento da recolha seletiva Tri-fluxo no período em estudo, é evidente a diminuição da recolha indiferenciada anual à medida que as metas intercalares nesta fração vão sendo cumpridas.

Tabela 3. 4 - Estimativa da Recolha Seletiva Tri-fluxo (ton)

Ano	Produção Tri-fluxo Total	Recolha Indiferenciada	Recolha Seletiva	Recolha Seletiva (%)	Evolução Recolha Seletiva (%)	Potencial final (%)
2019	1 510 051	890 930	619 121	41	-	59
2020	1 520 621	821 135	699 486	46	5	54
2025	1 562 903	703 306	859 596	55	9	45
2027	1 587 909	638 339	949 570	60	5	40
2030	1 626 019	536 586	1 089 433	67	7	33
2035	1 747 970	332 114	1 415 856	81	14	19

Para perceção da evolução das diferentes variáveis ao longo do período apresenta-se em gráfico os valores do quadro anterior na figura seguinte.

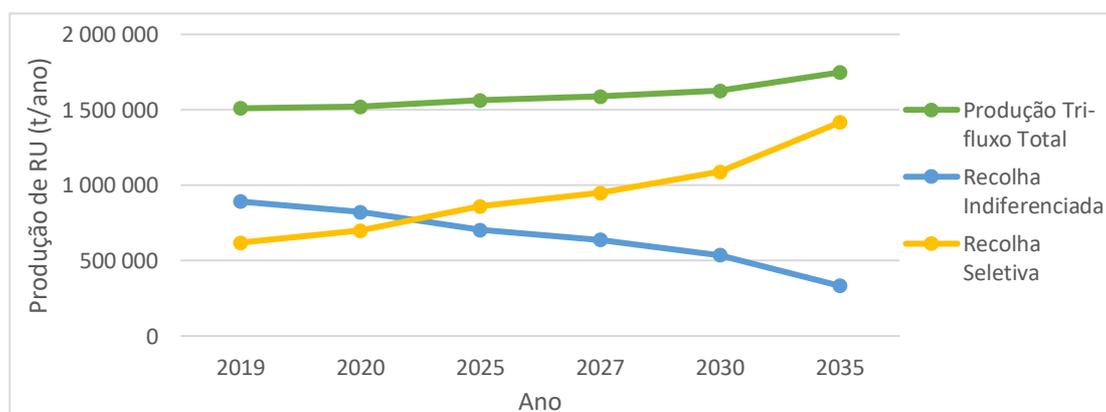


Figura 3. 3 - Evolução estimada da produção e da recolha seletiva Tri-fluxo.

Em termos da recolha de biorresíduos, obrigatória a partir de 31 de dezembro de 2023, apresenta-se na tabela seguinte a evolução que se estima no período em análise, considerando-se uma meta de 60% a cumprir em 2035, que será conseguida com o apoio em fortes campanhas de sensibilização e novos métodos de deposição a implementar para esta fração. Salienta-se ainda que a partir de 2027 só serão contabilizados na fórmula de cálculo 4 os biorresíduos que entram nas TBM provenientes de recolha seletiva.

Tabela 3. 5 - Estimativa da recolha de biorresíduos.

Ano	Produção Biorresíduos	Recolha Indiferenciada	Recolha Seletiva	Recolha Seletiva (%)	Evolução Recolha Seletiva (%)	Potencial existente (%)
2019	1 934 628	1 837 896	96 731	5	-	95
2020	1 948 170	1 831 280	116 890	6	1	94
2025	2 002 339	1 641 918	360 421	18	12	82
2027	2 034 377	1 464 751	569 626	28	10	72
2030	2 083 202	1 187 425	895 777	43	15	57
2035	2 239 442	380 705	1 858 737	83	40	17

No gráfico seguinte pode-se visualizar de evolução da recolha seletiva de biorresíduos.

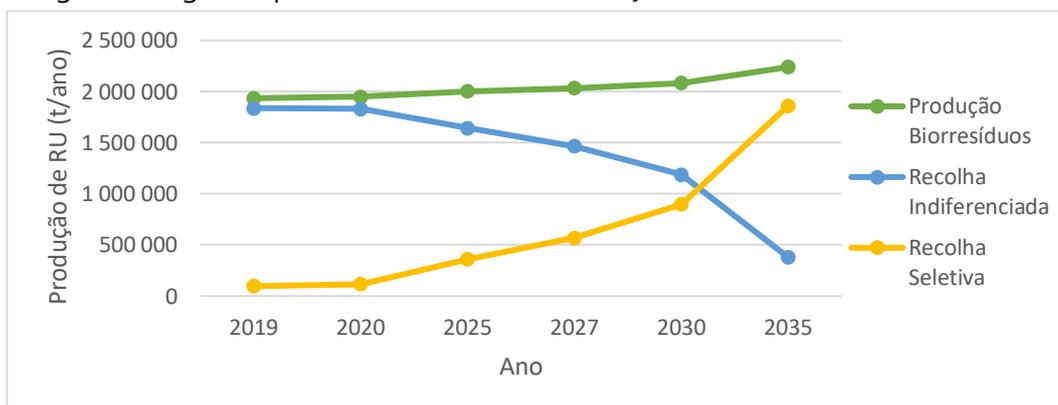


Figura 3. 4 - Estimativa da evolução da recolha seletiva de biorresíduos.

De seguida, estima-se a evolução da taxa de reciclagem a partir de dois métodos, em que a forma como é determinada a taxa de reciclagem para cada um dos métodos está descrita posteriormente.

- *Com o método 2 tem-se em conta no numerador a quantidade de resíduos domésticos e similares reciclados (vidro, papel, plástico, metais e outros), no denominador considera-se a quantidade de resíduos domésticos e similares recicláveis (vidro, papel, plástico, metais e outros).*

- Com o método 4 tem-se em conta no numerador os resíduos urbanos reciclados e no denominador consideram-se os resíduos urbanos totais.

É evidente uma redução da taxa de reciclagem no ano de 2027, deve-se ao facto das alterações que irão ocorrer nesse mesmo ano, relativamente à colocação de apenas resíduos recolhidos seletivamente para o TMB.

Tabela 3. 6 - Estimativa da evolução para a meta de preparação para reutilização e reciclagem.

Ano	Método de Cálculo	Taxa de Reciclagem	Numerador	Tri-fluxo	Biorresíduos	Tri-fluxo TM + Escórias	Denominador
2020	2	55%	2 020 404	814 445	1 124 094	81 865	3 680 549
	4	38%	1 905 445	699 486	1 124 094	81 865	5 041 848
2025	2	61%	2 303 400	958 059	1 263 476	81 865	3 782 888
	4	43%	2 204 937	859 596	1 263 476	81 865	5 182 038
2027	2	42%	1 601 060	949 570	569 626	81 865	3 843 414
	4	30%	1 601 060	949 570	569 626	81 865	5 264 951
2030	2	53%	2 067 074	1 089 433	895 777	81 865	3 935 656
	4	38%	2 067 074	1 089 433	895 777	81 865	5 391 309
2035	2	79%	3 356 458	1 415 856	1 858 737	81 865	4 230 830
	4	58%	3 356 458	1 415 856	1 858 737	81 865	5 795 658

Para uma leitura simplificada da evolução da taxa de reciclagem determinada pelos dois métodos, ao longo do período definido, está disponível a figura seguinte. De acordo com o método 2 foram obtidos valores mais favoráveis para o cumprimento das metas, o mesmo não se observando para os valores determinados a partir do método 4.

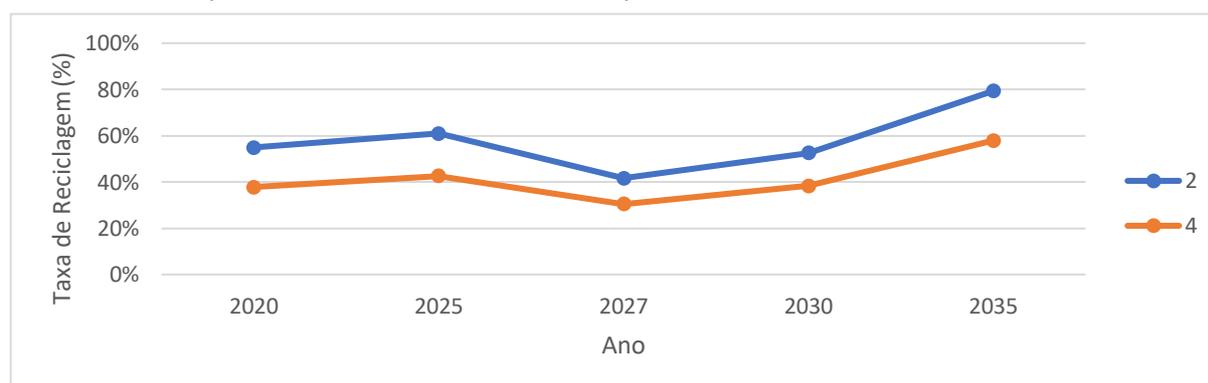


Figura 3. 5 - Estimativa da evolução da taxa de reciclagem no período 2020-2035.

3.3 Caso de Estudo

O caso de estudo que se apresenta foi desenvolvido durante o estágio realizado na empresa concessionária do sistema multimunicipal da AMARSUL S.A.

Este caso de estudo teve como principal objetivo avaliar qual seria o comportamento ao nível da biodegradabilidade dos resíduos depositados nos aterros futuros de nova geração no pós 2035, comparativamente com o que ocorre nos atuais aterros em exploração.

Para esta pesquisa os trabalhos desenvolvidos foram os seguintes:

- *Construção de dois biorreatores piloto experimentais num terreno disponibilizado pela AMARSUL, numa área reservada do aterro do Ecoparque do Seixal. Estes foram formatados com os sistemas de proteção ambiental idênticos aos exigidos pela Diretiva Aterro. A sua dimensão representa sensivelmente uma célula de um aterro.*
- *Após construção dos dois biorreatores simularam-se, com diferentes resíduos, diferentes condições de confinamento. O biorreator 1 foi preenchido com várias camadas da fração resto da TMB localizada no Ecoparque do Seixal, simulando as condições expectáveis dos aterros de nova geração pós-2035. O biorreator 2 foi preenchido com várias camadas de resíduos indiferenciados provenientes da atual recolha destes nos municípios que integram a AMARSUL.*
- *Ao longo do período deste trabalho realizaram-se sucessivas medições e monitorização de biogás e lixiviados produzidos, coletando-se e ponderando-se os resultados em ambos os biorreatores, permitindo-se identificar as características e o desvio de parâmetros evidenciados pela comparação ou correlação dos parâmetros determinados/ocorridos nos biorreatores.*

3.3.1 Sistema Multimunicipal da AMARSUL SA

❖ Modelo Técnico

A AMARSUL-Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA foi constituída através do Decreto-Lei nº 53/97, de 4 de março, o qual determina a criação do Sistema Multimunicipal (SMM) de Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Margem Sul do Tejo, atribuindo-lhe o exclusivo da exploração e gestão do Sistema Multimunicipal, em regime de concessão, por um prazo de 25 anos.

Pelo DL nº 127/2002 é alargada a concessão ao Município de Setúbal e pelo DL nº 104/2014 o período da Concessão é alargado até 2034. É, assim, a empresa responsável pelo tratamento e valorização dos Resíduos Urbanos (RU) produzidos na Península de Setúbal.

Integram o Sistema os Municípios de Alcochete, Almada, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela, Seixal, Sesimbra e Setúbal, servindo uma população de cerca de 780 mil habitantes numa área total de 1.625 Km².

A Sociedade tem como acionistas a EGF – Empresa Geral do Fomento, S.A., com 51% do Capital Social, pertencendo os restantes 49% aos Municípios que integram o Sistema.

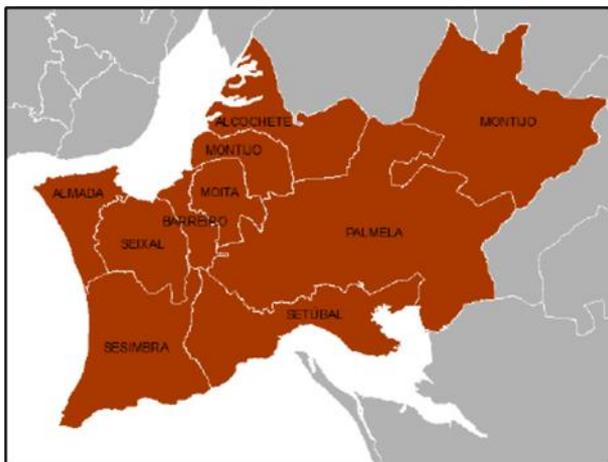


Figura 3. 6 - Municípios que integram a AMARSUL

Por concessão atribuída pelo estado, a sua atividade a nível da península de Setúbal desenvolve-se através de um sistema integrado de gestão dos resíduos urbanos, no qual se inclui a recolha seletiva, a triagem e a valorização dos resíduos de embalagens, o tratamento e valorização orgânica dos RU, a compostagem dos resíduos verdes e o aproveitamento energético do biogás produzido em aterro.

Em julho de 2015, a Amarsul passou a integrar o grupo Mota Engil por via da aquisição da Empresa Geral de Fomento (EGF), detentora de 51% do capital social da Amarsul.

No desempenho da sua atividade, a AMARSUL possui instalações atualmente em exploração distribuídas por três zonas, que se designam por Ecoparque de Setúbal, Ecoparque do Seixal e Ecoparque Palmela, onde se concentram os aterros sanitários (no Seixal e em Palmela) e as unidades de tratamento por compostagem (no Seixal e em Setúbal) para o tratamento, valorização dos resíduos urbanos da Península de Setúbal. O conjunto de infraestruturas e equipamentos em operação são os seguintes (Relatório & Contas 2019, AMARSUL):

❖ ECOPARQUE DO SEIXAL

- Uma unidade de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB), a Central de Valorização Orgânica (CVO) do Seixal por digestão anaeróbia, com sistema de aproveitamento energético de biogás. Inicia a atividade, de modo parcial, em dezembro de 2014;
- Uma Central de Triagem Automática (CTA), de materiais recolhidos seletivamente e de rolantes provenientes dos resíduos indiferenciados;
- Um Aterro sanitário com sistema de aproveitamento energético de biogás;

❖ ECOPARQUE DE SETÚBAL

- Central de Compostagem (CC) de resíduos provenientes da recolha indiferenciada;

❖ ECOPARQUE DE PALMELA

- Uma unidade de Tratamento Mecânico (TM), em Palmela;
- Aterro sanitário com sistema de aproveitamento energético de biogás;

Acresce ainda :

- Uma Estação de Transferência, em Sesimbra;
- Sete Ecocentros, uma rede para uso coletivo constituída por 4.766 ecopontos, 1.681 ilhas ecológicas, 843 vidrões isolados (618 em zonas de moradias), e 22.149 moradias servidas com sistema de recolha porta-a-porta, distribuídos pelos Concelhos que integram o Sistema;

A AMARSUL S.A serve cerca de 780 000 habitantes distribuídos pelos seus nove municípios, com a produção de cerca de 439 mil toneladas de RU/ano, com uma capitação de cerca de 559 kg/(hab.ano).

Tabela 3. 7 - Densidade populacional da área de exploração. (Fonte: PORDATA, 2019)

Município	População (hab)	Área (km ²)	Densidade Populacional (hab.km ²)
Alcochete	19 646	128	153
Almada	169 013	70	2 414
Barreiro	75 283	36	2 091
Moita	64 467	55	1 172
Montijo	57 251	349	164
Palmela	64 242	465	138
Seixal	167 294	96	1 743
Sesimbra	51 709	196	264
Setúbal	115 442	172	671

Em termos da atividade desenvolvida pela AMARSUL S.A. apresenta-se na figura seguinte a respetiva cadeia de valor das intervenções associadas.

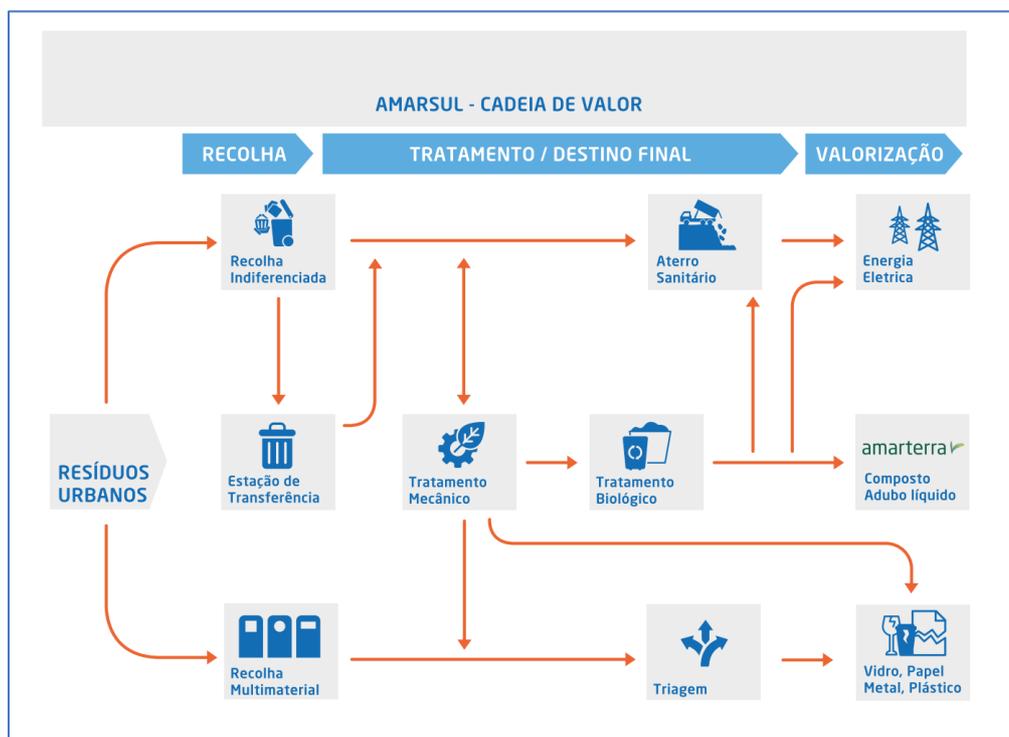


Figura 3. 7 - AMARSUL S.A. - Cadeia de valor (R&C de 2019)

No ano de 2019 entraram nas instalações da AMARSUL 479.471 toneladas de resíduos tendo-se verificado um aumento de 2% face ao total das entradas do ano anterior.

Todos os resíduos tiveram um aumento nas quantidades entradas, sendo que o aumento mais expressivo foi verificado nos materiais recicláveis, com um aumento de 18% face ao ano anterior.

Tabela 3. 8 - AMARSUL S.A. - Receção de resíduos (R&C de 2019).

SMM	RESÍDUOS SOBRE GESTÃO	RSU MUNICIPAL	RSU PARTICULAR	INERTES RCD	RECOLHA SELETIVA		
					MULTI MATERIAL	ORGÂNICOS	OUTROS
Amarsul	479.471	408.608	5.162	32.452	33.023	0	226

Verificou-se um acréscimo na receção de RSU Municipal de 0,8% e um acréscimo de 6,5%, face ao ano anterior, na receção de Particulares.

No que diz respeito aos resíduos de origem municipal, apesar de se ter verificado um acréscimo face ao ano anterior de 0,8%, o mesmo não foi verificado em todos os municípios, tendo o acréscimo sido mais acentuado em Alcochete e Montijo conforme se pode observar na figura seguinte.

Nos municípios de Almada, Moita, Sesimbra e Setúbal assistiu-se a um decréscimo das quantidades de resíduos rececionados.

Os particulares incluem quantidades entregues em Ecocentros.

Tabela 3. 9 - AMARSUL S.A. - Receção de resíduos por município (R&C de 2019).

ACIONISTAS	2017	2018	2019	% VARIAÇÃO
	Alcochete	8.463	9.684	10.316
Almada	94.014	95.326	92.809	-2,6%
Barreiro	30.624	31.431	31.893	1,5%
Moita	31.438	31.716	29.671	-6,4%
Montijo	22.650	23.688	26.445	11,6%
Palmela	37.960	40.745	43.206	6,0%
Seixal	70.992	71.676	75.445	5,3%
Sesimbra	30.738	32.336	31.962	-1,2%
Setúbal	70.884	68.640	66.861	-2,6%
Total Municípios	397.763	405.242	408.608	0,8%
Particulares	4.103	4.849	5.162	6,5%
TOTAL MUNICÍPIOS E PARTICULARES	401.866	410.091	413.770	0,9%

Os resíduos diretos entrados no sistema por unidade de tratamento foram os que indicam na tabela seguinte.

Tabela 3. 10 - AMARSUL S.A. - Resíduos diretos entrados no sistema AMARSUL (R&C de 2019)

	TOTAL 2017 (ton)	%	TOTAL 2018 (ton)	%	TOTAL 2019 (ton)	%
Aterro	222.137	48%	206.941	44%	194.467	41%
Compostagem	40.241	9%	45.021	10%	44.190	9%
TM Palmela	76.191	17%	80.394	17%	72.799	15%
Digestão Anaeróbia	62.786	14%	76.372	16%	102.316	21%
Triagem	25.551	6%	28.071	6%	32.116	7%
Ecocentros	523	0%	1.348	0%	1.117	0%
Centros Recepção REEE	6	0%	15	0%	16	0%
Depósitos Inertes	33.621	7%	31.874	7%	32.452	7%
TOTAL	461.055	100%	470.036	100%	479.471	100%

❖ Ecoparque de Setúbal

O Ecoparque de Setúbal possui uma área de cerca de 4,4 ha, onde se encontra instalada uma central de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) que possui uma capacidade de tratamento de RU indiferenciados de 60.000 t/ano, produzindo, em média, 7.000 t/ano de composto e 600 t/ano de metais para reciclagem.

Na figura seguinte encontra-se um esquema do processo da central de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB).

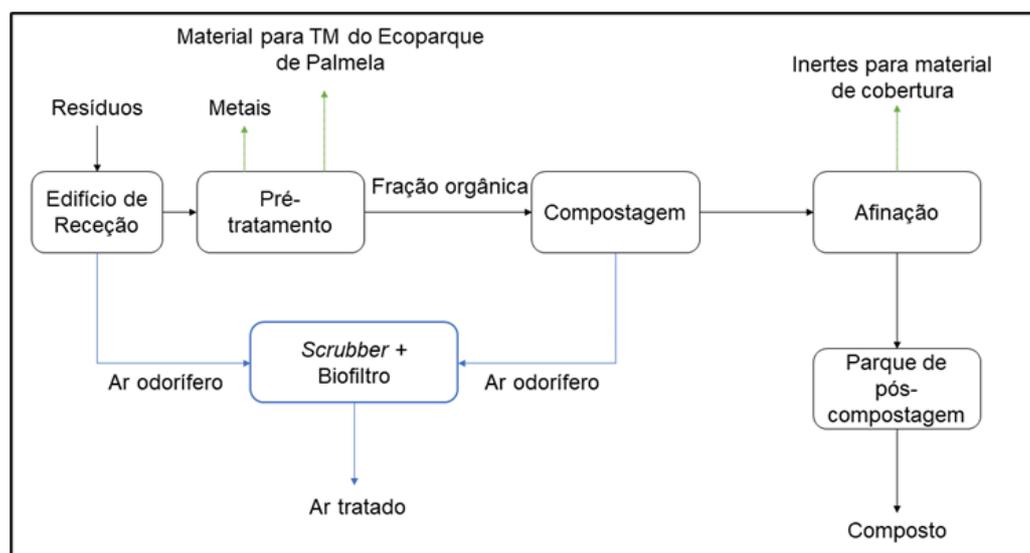


Figura 3. 8 - Diagrama da TMB de Setúbal.

Esta central de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) integra várias operações unitárias, tendo como principais etapas o pré-tratamento mecânico, compostagem (aeróbia por pilhas), produção de recicláveis e composto orgânico, entre outros.



- Legenda:
- 1- Zona de Receção de RU
 - 2- Pré-Tratamento Mecânico
 - 3- Compostagem
 - 4- Afinação
 - 5- Scrubber ácido
 - 6- Parque pós-compostagem
 - 7- Biofiltro (adsorção de odores)

Figura 3. 9 - Fotos da linha de processo da TMB de Setúbal.

Com base em informação fornecida pela AMARSUL SA descreve-se de seguida, de forma sucinta, as etapas e linhas de processo desta central.

1. Receção - Os veículos responsáveis pela recolha dos RU indiferenciados são controlados na portaria com pesagem na báscula, sendo orientados para o Edifício de Receção para efetuar a descarga.
2. A alimentação da linha de pré-tratamento é realizada no Edifício de Receção com recurso a uma máquina multifunções telescópica que introduz os resíduos num abre-sacos.
3. Pré-tratamento mecânico - Os resíduos após passagem no abre-sacos são conduzidos para o Edifício de Pré-tratamento onde é alvo de uma sequência de processos de separação mecânica incluindo: crivagem e separação eletromagnética de metais. Desta etapa do processo resultam: matéria orgânica para compostagem, aço e alumínio para reciclagem e ainda um refugo que é encaminhado para o aterro do Ecoparque de Palmela. Dentro do edifício existe extração do ar com odor que será posteriormente encaminhado para um *scrubber* e um biofiltro.
4. Compostagem - A fração orgânica resultante do Pré-Tratamento é empilhada no edifício de compostagem com recurso a uma máquina de deposição automática. A compostagem da fração biológica separada tem lugar num pavilhão totalmente fechado para evitar a libertação de odores.
5. A homogeneização e irrigação desta fração é assegurada através de um equipamento de revolvimento que se encontra sobre carris.
O leito de compostagem é percorrido por tubos perfurados que se encontram conectados a um sistema de ventilação por sucção (arejamento em modo negativo). O tempo de residência situa-se nas 8 a 11 semanas, sendo transferido para o Edifício da Afinação por uma máquina de retoma, o composto bruto.
A compostagem ocorre num ambiente controlado no que se refere à temperatura, humidade e arejamento.
Este processo tem como objetivo promover a higienização e a estabilização da matéria orgânica e otimizar as suas propriedades físico-químicas e microbiológicas para utilização como fertilizante agrícola.
6. Afinação - O processo de afinação remove materiais inertes como pedras, plásticos e alguns materiais não decompostos durante o processo de compostagem, com o objetivo de melhorar as características físicas do composto.
Este consiste num processo mecânico constituído por uma crivagem seguida de uma separação densimétrica.
Após a afinação este é transportado através de uma tela transportadora para o parque de composto.

Os materiais rejeitados deste processo são utilizados como material de cobertura no aterro do Ecoparque de Palmela.

7. Scrubber Ácido - Os efluentes gasosos gerados no edifício de receção e compostagem possuem um odor desagradável, sendo necessário a aplicação de um tratamento.

O ar proveniente do edifício de receção é encaminhado para ser humificado em geradores de nevoeiro instalados em paralelo.

8. O ar proveniente da sucção de ar do leite possui uma elevada carga poluente e para a remoção do amoníaco recorre-se a um scrubber ácido.

De seguida os fluxos provenientes de ambos os edifícios são encaminhados para um biofiltro.

9. O parque pós-compostagem - é uma área pavimentada e coberta, na qual o composto ficará durante 1 mês.

O pós-compostagem constitui a fase final do processo de produção de composto na qual o material é colocado em pilhas de secção triangular, que são irrigadas e revolvidas periodicamente.

No final o composto originado é o "AMARTERRA", que é um fertilizante aplicado na agricultura.

10. O biofiltro - possui no seu meio filtrante aparas de madeira, casca de pinheiro e composto.

Nesta fase, o ar que possui odor é adsorvido e convertido em dióxido de carbono e vapor de água pelo biofiltro.

Como subproduto é originado um efluente líquido carregado em sulfato de amónio. Este é comercializado como AMARVERDE® e utilizado como fertilizante líquido na agricultura.

Tabela 3. 11 - Fluxos na Estação de Compostagem (ton) (R&C 2019)

		2017	2018	2019	VARIAÇÃO 2019/2018 %
Fluxos Tratados	RSU Municipais	40.208	44.709	44.162	-1%
	RSU Particulares	33	312	28	-91%
	Mat. Orgânica proveniente da TM	4.780	5.384	4.193	-22%
	TOTAL	45.022	50.404	48.382	-4%
Fluxos Saída	Embalagens Produzidas	521	459	501	9%
	Composto Produzido	5.940	3.560	3.578	1%
	Refugos Depositados em Aterro	15.818	24.014	22.214	-7%
	Refugos Depositados no TM Palmela	12.399	1.603	1.159	-28%
	Perdas	10.343	20.769	20.931	1%
	TOTAL	45.022	50.404	48.382	-4%

a. Ecoparque do Seixal

No Ecoparque do Seixal encontra-se instalada a Central de Valorização Orgânica (CVO) com processo de compostagem por Digestão Anaeróbia (DA). Pela figura seguinte pode-se observar o diagrama de processo da CVO do Ecoparque do Seixal fornecido pela AMARSUL, 2021.

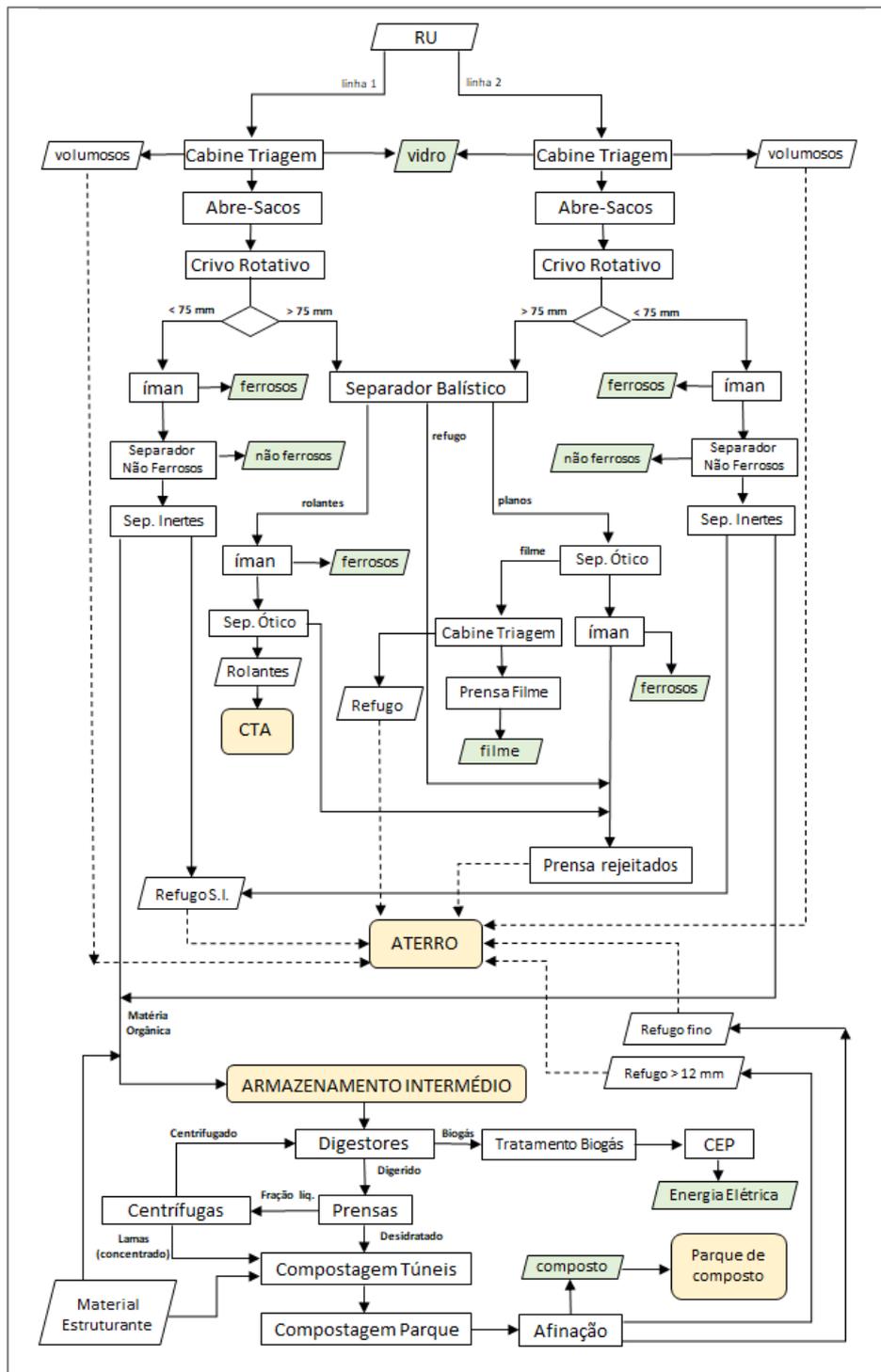


Figura 3. 10 - Diagrama de processo da CVO do Ecoparque do Seixal. Fonte: Amarsul S.A.

Esta central está projetada para tratar biologicamente 60 mil toneladas de RUB por ano, dos quais 40 mil toneladas por ano são obtidas a partir do processamento dos resíduos provenientes da recolha indiferenciada de RU e 20 mil toneladas por ano são provenientes do tratamento mecânico de RU do Ecoparque de Palmela.

Na CVO o processo de tratamento destes resíduos começa pela deposição dos mesmos numa fossa de descarga, seguindo-se o processo de tratamento mecânico e o de tratamento biológico.

Após a pesagem das viaturas na báscula as mesmas são direcionadas para o local de descarga dos RU, como se pode observar na figura que se apresenta.

Os RU após serem recolhidos da fossa são encaminhados para a cabine de triagem, onde são separados os volumosos, direcionando-os diretamente para aterro. O vidro aqui retirado segue para valorização e reciclagem.

Após esta passagem pela cabine de triagem, os resíduos passam pelo abre-sacos, onde estes são rasgados e controlados, por espaçamento volumétrico entre o conjunto de "facas" colocadas na superfície de dois cilindros que rodam em sentidos opostos, deixando passar entre eles apenas materiais que não danifiquem ou provoquem anomalias em equipamentos e aparelhos situados a jusante da linha de processo.

Depois do abre-sacos os resíduos seguem para o crivo rotativo, conforme se pode observar na figura que se apresenta em baixo.

No crivo os resíduos que apresentem dimensões superiores a 75 mm são direcionados para o separador balístico, onde são separadas duas frações, a fração de planos e de rolantes.

A fração inferior a 75 mm, antes de ser direcionada para o processo de armazenamento intermédio a montante dos digestores, passa pelo separador eletromagnético para retirada de resíduos ferrosos, segue-se o separador não ferroso e, por último, é direcionado para o separador de inertes.

Este separador de inertes separa o fluxo de matéria orgânica do refugo que irá ser desviado para aterro.



Figura 3. 11 - Fossas de descarga dos RU.
Foto do autor.

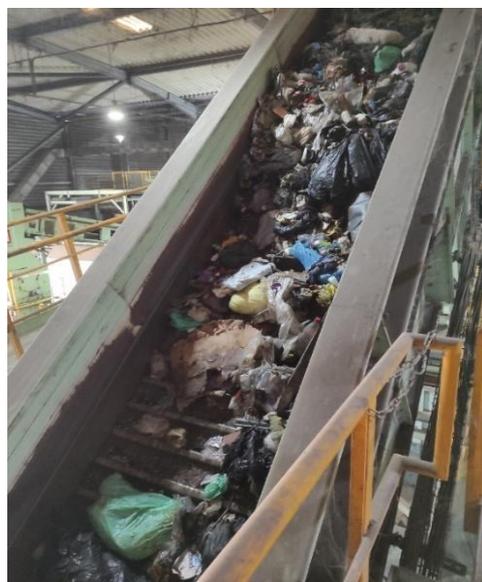


Figura 3. 12 - Tapete transportador a montante do abre-sacos.

A fração dos rolantes é direcionada para um separador magnético onde é removido o material ferroso. Por fim, os rolantes são direcionados para um separador ótico onde o material que é rejeitado, e não é direcionado para a CTA, segue para a prensa de rejeitados.

A fração dos planos é direcionada para a linha com separador ótico onde se separa o filme que de seguida é direcionado para a cabine de triagem, seguindo depois para a prensa de filme.

O separador ótico separa a fração de ferrosos para valorização e, o restante, direcionado para a prensa de rejeitados. Os refugos provenientes do separador balístico são direcionados para uma prensa e de seguida para o aterro.

Os resíduos biodegradáveis separados após o tratamento mecânico são tratados de acordo com as seguintes etapas:

- *Digestão anaeróbia em reatores horizontais de fluxo-pistão;*
- *Desidratação do material digerido;*
- *Pré-compostagem aeróbia do material digerido desidratado, em túneis fechados com arejamento forçado;*
- *Pós-compostagem aeróbia do material pré-compostado, em parque de maturação coberto e com revolvimento periódico;*
- *Afinação do composto orgânico para recuperação do material estruturante e remoção de outros resíduos remanescentes como inertes, vidro ou plásticos.*

No processo de digestão anaeróbia o biogás produzido é tratado e alimenta os grupos de motogeradores de valorização energética. A energia elétrica produzida é injetada na rede pública.



Figura 3. 13 - Crivo rotativo

Tabela 3. 12 - Fluxos na CVO Seixal (ton) (R&C 2019)

		2017	2018	2019	VARIACÃO 2019/2018 %
Fluxos Tratados	RSU Municipais	62.458	75.425	102.263	36%
	RSU Particulares	328	947	53	-94%
	Mat. Orgânica proveniente da TM	65	0	0	--
	TOTAL	62.851	76.372	102.316	34%
Fluxos Saída	Embalagens Produzidas	329	484	545	13%
	Composto Produzido	2.212	2.152	2.577	20%
	Refugos Depositados em Aterro	33.531	44.470	62.088	40%
	Perdas	26.780	29.267	37.104	27%
	TOTAL	62.851	76.372	102.316	34%

Nas figuras seguintes podem-se observar algumas fotos tiradas no local (pelo autor), assinalando-se que a matéria orgânica se apresenta bastante húmida no local onde é armazenada, justificando o revolvimento desta para não criar aglomerados e facilitar desta forma o processo de movimentação do material para os digestores.



Figura 3. 14 - Armazenamento Intermédio da Matéria Orgânica para alimentação do digestor anaeróbio.



Figura 3. 15 - Tubagens dos circuitos do digestor anaeróbio.



Figura 3. 16 - Queimador de Emergência do digestor anaeróbio.

Em 2019 foram tratadas 102 316 toneladas de resíduos no Tratamento Mecânico e Biológico do Seixal, o que representou um acréscimo de 34% face ao ano anterior. Importa salientar que o 3º digestor entrou em funcionamento em outubro de 2018.

3.3.2 Balanço e Prospetiva futura da recolha de RU

No ano de 2019 a recolha de resíduos urbanos na AMARSUL foi de 445 451 toneladas e, na meta de preparação para reutilização e reciclagem obteve o valor de 38%. (RARU, 2019, julho 2020). Todavia o valor total a considerar nos cálculos de produção de biorresíduos e Tri-fluxo será o de entrada dos RU municipais que é de 408 608 toneladas mais 33 023 toneladas, dando um total de 441 631 toneladas em 2019. Este valor resulta dos resíduos municipais diretos entrados na AMARSUL, acrescido da recolha seletiva tri-fluxo recolhidos pela entidade gestora a AMARSUL, conforme consta da tabela 3.8.

Assumindo como base o ponto de situação da AMARSUL em 2019 ao nível da recolha tri-fluxo e de biorresíduos, os pressupostos adotadas para a avaliação da prospetiva futura até 2035, foram os mesmos que se definiram no item 3.2.

Nas tabelas seguintes podem observar-se os resultados obtidos, bem como o respetivo gráfico da evolução destes.

Tabela 3. 13 - Estimativa da evolução da produção de RU na AMARSUL.

Ano	Produção total de resíduos municipais	Produção de biorresíduos	Produção total de Tri-fluxo
2019	441 631	141 234	104 667
2020	461 026	147 436	109 263
2025	477 162	152 596	113 087
2027	483 842	154 733	114 671
2030	496 248	158 700	117 611
2035	533 467	170 603	126 432

Tabela 3. 14 - Estimativa da evolução da recolha seletiva tri-fluxo na AMARSUL.

Ano	Potencial de Tri-fluxo (ton/ano)	Recolha Seletiva (ton/ano)	Recolha Seletiva (%)	Evolução/ano da Recolha Seletiva (%)
2019	104 667	33 023	32%	-
2020	109 263	40 451	37%	5%
2025	113 087	52 020	46%	9%
2027	114 897	58 597	51%	5%
2030	117 611	68 214	58%	7%
2035	126 432	82 181	65%	7%

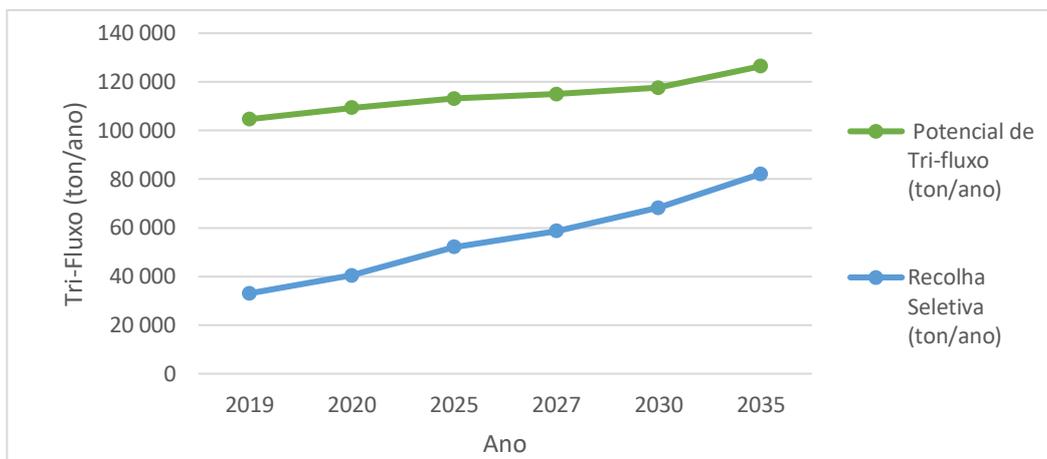


Figura 3. 17 - Gráfico da evolução estimada da recolha tri-fluxo, no contexto da Amarsul SA.

Tabela 3. 15 - Estimativa da evolução da Recolha Seletiva de Biorresíduos.

Ano	Potencial de Biorresíduos (ton/ano)	Recolha Seletiva (ton/ano)	Recolha Seletiva (%)	Evolução da Recolha Seletiva (%)
2019	141 234	(-)	(-)	(-)
2020	147 436	218	1,0%	(-)
2025	152 596	22 889	13%	12%
2027	155 038	15 504	23%	10%
2030	158 700	71 415	38%	15%
2035	170 603	145 012	78%	40%

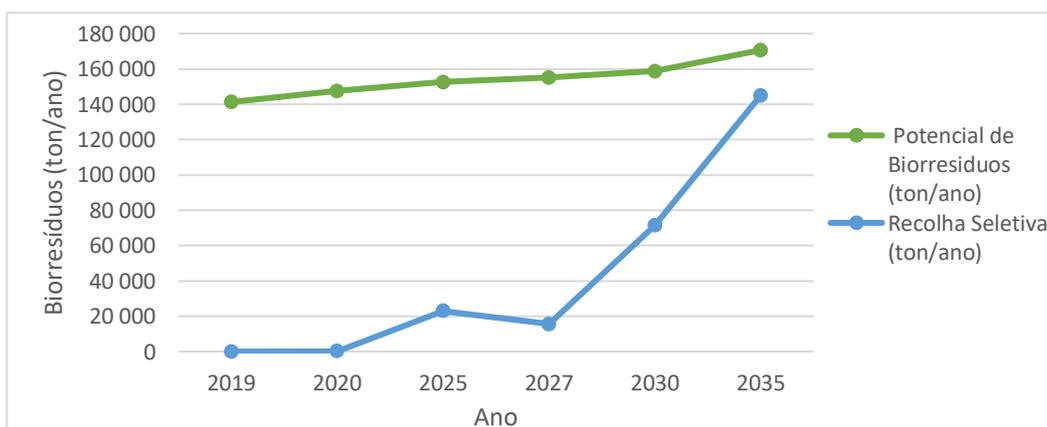


Figura 3. 18 - Evolução estimada da recolha de Biorresíduos na Amarsul S.A.

3.3.3 Produção de biogás

Para a captação do biogás e desgaseificação da massa de resíduos dos aterros recorre-se à introdução de drenos internos na massa de resíduos confinada que, aquando da possibilidade de viabilizar o aproveitamento energético do biogás produzido, são ligados a ramais que, através de estações de regularização e medição (ERM) encaminham o biogás para o coletor perimetral.

Este coletor ao longo do seu percurso passa pelo evacuador de concentrados antes da sua chegada ao centro electroprodutor (CEP) de energia.

Após a geração de energia, esta é injetada no sistema elétrico português (SEP) através do ponto de injeção determinado, que em regra é o posto de transformação (PT) situado na respetiva instalação.

Na figura seguinte pode observar-se o esquema do sistema de drenagem, captação e aproveitamento energético do biogás num aterro sanitário.

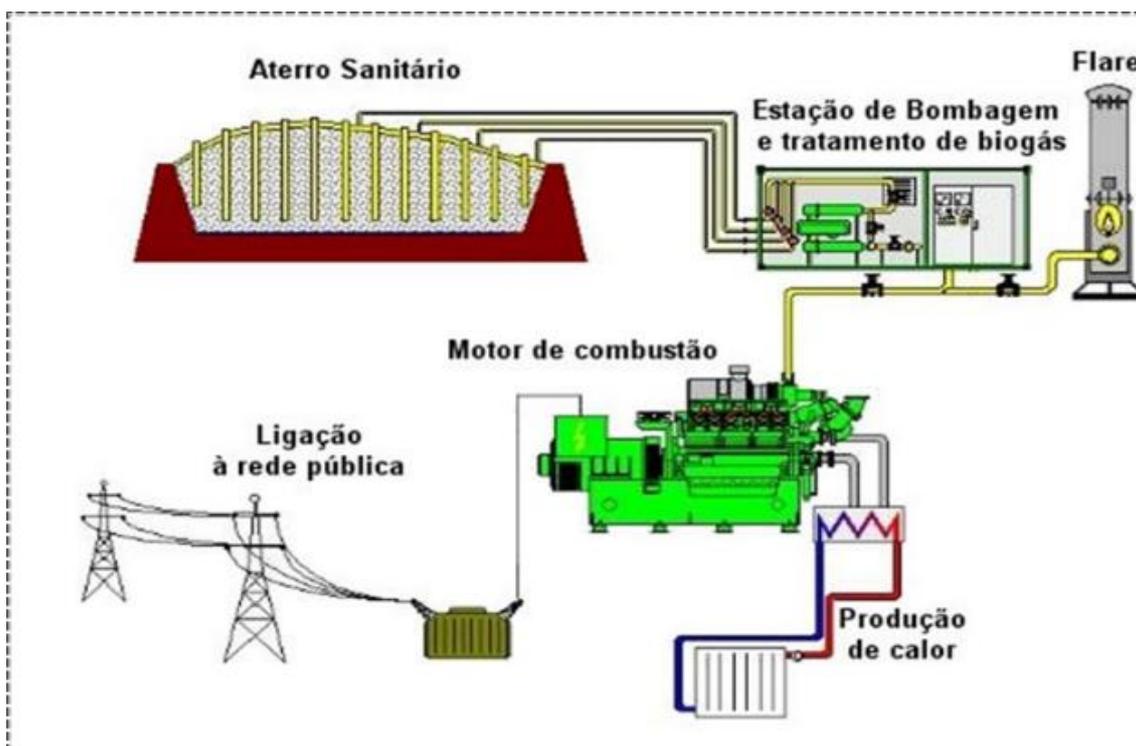


Figura 3. 19 - Sistema de captação e aproveitamento energético do biogás (fonte: AMARSUL)

A energia produzida em 2019, no total de 24.840 MWh, foi proveniente dos Centros Electroprodutores instalados nos aterros de Palmela e do Seixal, e ainda da produção resultante do tratamento mecânico e biológico do Seixal.

Em 2019, verificou-se um aumento de 40% no Biogás resultante do TMB do Seixal.

Na figura seguinte pode observar-se a evolução das médias anuais da energia com base no biogás gerado nas instalações assinaladas (R&C, 2019).

Tabela 3. 16 - Evolução das médias anuais da energia com base no biogás gerado (ton) (R&C 2019).

	Quant MWh				Valor €			
	2017	2018	2019	VAR. %	2017	2018	2019	VAR. %
Biogás - Palmela	11.785	10.499	9.627	-8%	1.260.432	1.129.025	1.033.937	-8%
Biogás - Seixal	10.001	6.365	2.010	-68%	1.218.074	764.622	154.633	-80%
Biogás - TMB Seixal	6.882	7.524	10.499	40%	774.449	858.207	1.214.881	42%
TOTAL	28.667	24.388	22.136	-9%	3.252.955	2.751.853	2.403.451	-13%

Tabela 3. 17 - Dados relacionados com o Aterro do Seixal.

PARÂMETRO	Unid.	2000	2001	2005	2007	2009	2014	2019	2020
Resíduos Urbanos depositados em aterro	ton/ano	223 453	219 558	230 298	353 906	182 892	169 762	140 726	149 473
Biogás GERADO	m³/ano	3 558 817	4 357 292	7 080 900	8 345 642	10 042 045	11 641 614	11 682 379	11 399 250
EXPORTADO	m³/ano	-	-	5 808 357	6 236 083	5 982 809	5 098 797	2 295 770	984 580
Energia fornecida à REN	MWh	-	-	11 189	11 957	10 218	9 079	2 774	2 073

Tabela 3. 18 - Dados relacionados com o Aterro de Palmela.

PARÂMETRO	Unid.	2000	2001	2005	2007	2009	2014	2019	2020
Resíduos Urbanos depositados em aterro	ton/ano	192 960	224 780	286 704	297 807	344 206	178 209	206 141	230 562
Biogás GERADO	m³/ano	-	-	-	8 807 028	10 556 406	12 712 472	9 035 720	9 493 914
EXPORTADO	m³/ano	-	-	-	-	-	6 478 797	4 464 116	4 217 207
Energia fornecida à REN	MWh	-	-	-	-	-	12 874	9 623	9 359

Os gráficos relacionados com as tabelas anteriores encontram-se disponíveis no subcapítulo A.2 nos Apêndices.

3.4 Biorreatores Pilotos

3.4.1 Execução do biorreatores

O presente estudo foi realizado no Ecoparque do Seixal, mais precisamente, na célula D do aterro sanitário do Seixal. Este aterro ocupa uma área de 32 ha, sendo aceites para confinamento resíduos de construção e demolição; resíduos urbanos e equiparados, incluindo as frações recolhidas seletivamente; resíduos de jardins e parques; outros resíduos urbanos equiparados. A origem são resíduos urbanos municipais e equiparados.

A data de funcionamento do aterro iniciou-se em 1995 através da C.M. do Seixal, tendo em 1997 passado para a AMARSUL. A Capacidade máxima de processamento de projeto é de 5 045 364 ton.

O tratamento destes *resíduos urbanos não perigosos* resulta pela decomposição físico-química e biológica da matéria biodegradável depositada e controlada ao longo da vida do aterro, em conformidade com as melhores práticas de gestão e operação.

Acresce que durante decomposição da matéria biodegradável gera-se biogás que atualmente é objeto de valorização através da produção de energia para, de seguida, ser injetada na REN nacional.

A zona onde se desenvolveu o caso de estudo identifica-se na foto da figura seguinte por nº 2. Os biorreatores piloto foram construídos neste local com as seguintes dimensões:

- O biorreator 1 com dez (10) metros de comprimento por sete (7) metros de largura, com uma profundidade de 3,5 metros de altura, e o biorreator 2 com seis (6) metros de comprimento, quatro (4,0) de largura e 3,5 metros de profundidade.
- A escavação efetuada contempla em todo o seu interior as componentes de confinamento técnico de um aterro usual, garantindo-se as condições de impermeabilização e drenagens conforme exigências do Dec. Lei 183/2009 e descritas em capítulo anterior.
- Complementar ao sistema de impermeabilização realizado em todo o interior do biorreator, foram implementados os seguintes órgãos de drenagem: tubagem vertical ranhurada a 360° em PEAD para captação e drenagem de biogás; tubagem de drenagem de lixiviados em PEAD, ranhurada a meia cana, para garantir a retirada dos lixiviados com uma inclinação superior a 2% para facilitar o escoamento dos lixiviados.
- Como a profundidade do biorreator é de 3,5m optou-se por colocar uma bomba para retirar os lixiviados do interior deste.

Na figura seguinte encontra-se referenciado com o nº 2 o local onde se realizou o caso de estudo, numa área disponível da célula D.



Figura 3. 20 - Representação da zona do aterro experimental. Fonte: Google Earth. Legenda: 1 - Portaria; 2 - Área do biorreator piloto ; 3 - Oficina; 4 - CTA.

3.4.2 Planeamento e Trabalhos de Campo

Para o desenvolvimento dos trabalhos desenvolvidos na investigação efetuada no *biorreator piloto*, começou por se definir o planeamento dos trabalhos a desenvolver e procedimentos a adotar durante o período pretendido para a dissertação.

Porém, o fato de ter ocorrido em 2020 um período alargado com elevadas condicionantes e restrições de mobilidade devido à pandemia do COVID-19, houve a necessidade de alterar a regularidade da deslocação à AMARSUL como inicialmente pretendido. Contudo considera-se que foi possível dar resposta aos objetivos traçados.

O planeamento dos trabalhos de campo consistiu na organização com os responsáveis da AMARSUL das atividades referidas na tabela seguinte.

Tabela 3. 19 - Planeamento das atividades para a construção e monitorização dos biorreatores

Atividades	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
Definição da área a ocupar pelos dois biorreatores e definição do distanciamento entre eles de modo a garantir completo isolamento físico entre estes.						
Mobilização do equipamento pesado para a realização das terraplenagens.						
Obtenção da geomembrana PEAD necessária para a implantação do sistema de impermeabilização e das tubagens para o sistema de drenagem de lixiviados e do biogás. Definição do plano de rega da massa de resíduos depositada nos biorreatores.						
Escavação do sistema de drenagem de fundo, do dreno de biogás e do enchimento e fecho superior dos biorreatores, dando-se também início ao plano de rega nos biorreatores.						
Execução do sistema de drenagem de fundo, do dreno de biogás e do enchimento e fecho superior dos biorreatores, dando-se também início ao plano de rega nos biorreatores.						
Planeamento dos ensaios laboratoriais dos lixiviados a realizar e frequência das medições do biogás em ambos os biorreatores.						
Realização dos ensaios laboratoriais do lixiviado gerado.						
Realização das Medições do biogás gerado nos biorreatores						
Análise e discussão de resultados						

A primeira fase de trabalhos de campo começou em meados do mês de agosto p.p. com a escavação do terreno disponibilizado com recurso a uma máquina escavadora hidráulica especial, com lança de 5,0 m de extensão.

De seguida foi colocada o sistema de impermeabilização com geomembrana PEAD de 2,0 mm de espessura soldada com duplo canal nas ligações dos sucessivos panos, isolando-se a massa de resíduos a depositar do solo envolvente. Na Figura seguinte podem observar-se os trabalhos descritos.



Figura 3. 21 - Escavação e início da colocação do sistema de impermeabilização do biorreator. (Foto do autor)

Após a colocação sistema de impermeabilização colocou-se a tubagem em PEAD de 210 mm de diâmetro, perfurado a meia cana, coberto em 0,50 m de espessura em toda a envolvente e formatando a camada drenante com brita # 20-40 em toda a extensão, garantindo um $K= 10^{-4}$ cm/s .



Figura 3. 22 - Sistema de drenagem de lixiviados e camada drenante no início da execução (Foto do autor)

Depois de implementada a tubagem de drenagem dos lixiviados os biorreatores ficaram aptos para receber os resíduos. Os resíduos foram compactados com o auxílio da pá da máquina escavadora à medida que se iam efetuando as descargas dos resíduos por camadas de

0,50 m. Em relação à implementação da tubagem de drenagem do biogás, de 160 de diâmetro e perfurada a 360°, este envolvida por um tubo guia com 0,50m de diâmetro até ao topo do biorreator.

Desta forma a tubagem do dreno de biogás colocada desde a base do biorreator foi sendo sustentada pelas camadas de resíduos envolventes e em altura bem como orientada na vertical pelo tubo guia, que foi sendo cheio com brita #20-40 até ao topo.



Figura 3. 23 - Dreno de biogás envolvido pelo tubo guia, dentro da massa de resíduos. (Foto do autor)

Na fase final foi retirado o tubo guia, garantindo-se que o dreno de biogás fica envolvido em brita desde a zona basal.

Por fim retirou-se o tubo guia deixando ainda um excesso de brita na envolvente do topo da tubagem, para regularização da superfície.

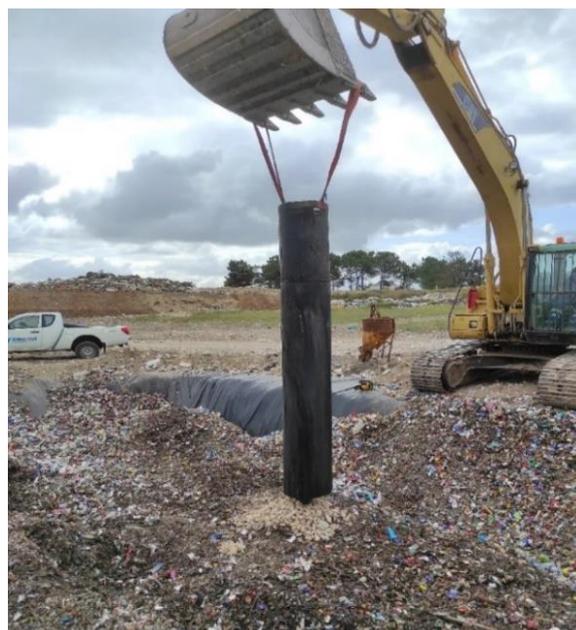


Figura 3. 24 - Retirada do tubo guia envolvente da tubagem de drenagem do biogás. (Foto do autor)

Posteriormente, quando o nível de resíduos compactados se aproximou do nível da superfície do solo depositaram-se as terras de cobertura e, de seguida, tapou-se a superfície do biorreator piloto com geomembrana.



Figura 3. 25 - Colocação da geomembrana seguida da deposição das terras de cobertura. (Foto do autor)

De seguida colocou-se um tampão na tubagem de drenagem do biogás para evitar que as emissões do biogás para a atmosfera. No tampão também foi implementado um poço de amostragem para serem efetuadas as medições semanais do biogás e acompanhar a evolução.

Conforme ficou definido no planeamento acordado, deu-se também início à rega da massa de resíduos com uma frequência quinzenal em cada um dos biorreatores, para garantir as condições necessárias à degradação da matéria orgânica e produção de biogás e, evitar a mumificação da matéria biodegradável.

3.4.3 Enchimento dos biorreatores

Biorreator piloto 1

O enchimento do biorreator piloto 1 foi efetuado com a designada *fração resto* da CVO do Seixal. Esta *fração resto* é proveniente do separador de inertes e refugos da CVO, sendo acumulados e armazenados num contentor para serem transportados regularmente para deposição no aterro sanitário do Seixal.

Na tabela seguinte assinalam-se as descargas realizadas neste biorreator piloto 1 tendo sido efetuadas de forma sucessiva, de acordo com a frequência de transporte para o aterro do Seixal.

A massa total da *fração resto* confinada e compactada com recurso à pá da máquina escavadora foi de 185 580 kg conforme se pode observar na tabela seguinte, onde consta o número de descargas efetuadas para se conseguir encher o volume do biorreator piloto.

Tabela 3. 20 - Resumo das descargas com fração resto depositada no Biorreator Piloto 1.

Descarga	Peso (kg)
1 ^a	12 000
2 ^a	11 560
3 ^a	13 900
4 ^a	13 040
5 ^a	12 800
6 ^a	14 600
7 ^a	17 140
8 ^a	16 440
9 ^a	18 640
10 ^a	16 000
11 ^a	14 520
12 ^a	13 280
13 ^a	11 660
Total	185 580

Com base no total em peso da massa de resíduos depositada e tendo presente a volumetria do biorreator piloto 1, determinou-se a densidade desta massa de resíduos confinada igual a 757 kg/m³.

Tabela 3. 21 - Densidade da fração resto depositada no Biorreator Piloto 1.

Massa de resíduos (kg)	Volume de Enchimento (m ³)	Densidade (kg/m ³)
185 580	245	757

– Caracterização física da fração resto/ refugos

A *fração resto* dos refugos depositada no biorreator 1, de acordo com dados obtidos com base na caracterização física deste material, verifica-se que a percentagem de matéria orgânica presente é residual.

Com efeito, a percentagem de matéria orgânica presente na fração resto consta do relatório de caracterização física realizada na AMARSUL em 2020 sobre as quantidades totais anuais dos refugos da CVO levados para deposição em aterro.

O relatório em questão baseou-se numa campanha de caracterização física elaborada durante o ano de 2020 e que seguiu a metodologia preconizada na Portaria nº 851/2009, a qual aprova as normas técnicas no que diz respeito à caracterização de resíduos urbanos (EGF, 2021).

A campanha de caracterização foi efetuada em dois períodos distintos – Outono/Inverno e Primavera/Verão – tendo sido utilizadas um total de 57 amostras provenientes dos mais variados fluxos de resíduos sólidos urbanos do sistema multimunicipal da AMARSUL S.A.

O plano de amostragem desta caracterização consistiu na recolha de seis amostras de 250 kg – três em cada período da campanha – dos vários processos e refugos da CVO tendo o seu peso na caracterização global sido ponderado de acordo com o processo que originou o refugo.

No quadro seguinte apresenta-se o extrato do quadro de valores fornecido pela AMARSUL, onde se pode observar o valor médio anual da fração orgânica ainda existente na massa da *fração resto/refugos* e, que foi depositada no biorreator piloto 1.

Tabela 3. 22 - Caracterização física da fração resto no ano 2020

Frações dos resíduos urbanos	(%)
Resíduos Recicláveis	30,28%
Biorresíduos	8,74%
Papel/cartão (incluindo ECAL)	5,82%
Plástico	13,96%
Metais Ferrosos	0,39%
Metais não ferrosos	0,18%
Vidro	0,52%
Madeira	0,50%
Resíduos de Equipamentos elétricos e eletrónicos	0,11%
Pilhas e acumuladores	0,06%
Outros Resíduos	69,72%

Pela análise da tabela relativa aos resultados da caracterização física da *Fração Resto* da CVO, verifica-se que esta fração saída no final do processo ainda é composta por cerca de 70% de resíduos não recicláveis e o restante (aproximadamente 30%) por resíduos ainda passíveis de valorização.

Com base nos resultados constantes desta tabela constata-se que na *Fração Resto* colocada no biorreator piloto 1, existe a presença de cerca de 16 220 kg de biorresíduos, 10 800 kg de papel/cartão e, 26 000 kg de plástico.

Biorreator piloto 2

O enchimento do biorreator piloto 2 foi realizado com a massa de resíduos constituída por RU indiferenciados tendo sido realizadas no total oito descargas.

Este biorreator piloto foi construído com menores dimensões em relação ao biorreator piloto 1 com a *fração resto*, devido à limitação da área de intervenção disponibilizada.

A quantidade da massa de RU depositada no biorreator piloto 2 pode observar-se na tabela seguinte.

Tabela 3. 23 - Enchimento do biorreator piloto 2 com descarga de RU indiferenciados.

Camada	Peso (kg)
1 ^a	8 300
2 ^a	5 760
3 ^a	10 160
4 ^a	12 420
5 ^a	6 930
6 ^a	7 930
7 ^a	9 340
8 ^a	3 950
Total	64 790

A caracterização física da massa de resíduos do biorreator piloto 2 que se apresenta na tabela seguinte, foi fornecida determinada com base no volume de enchimento realizado.

Tabela 3. 24 - Densidade da massa dos RU indiferenciados depositados no biorreator piloto 2

Peso total de RU (kg)	Volume do enchimento (m ³)	Densidade (kg/m ³)
64 790	84	771

Humidade

A determinação da humidade presente nos refugos foi determinada nos laboratórios da Amarsul S.A. Para tal, retirou-se uma amostra do aterro experimental e procedeu-se à determinação deste parâmetro. A humidade determinada traduz a porção de massa de água que é evaporada após o processo de secagem. Nesse processo a amostra para análise é colocada numa estufa a 105°C. Após se retirar a amostra determina-se a humidade calculando-se a diferença entre o peso inicial e o peso final após o processo de secagem.

Saliente-se que após o processo de secagem procedeu-se à determinação dos sólidos voláteis (SV) presentes na amostra. Os SV definem-se pela matéria orgânica que é removida no processo de combustão na mufla. Para tal, com base no resultado do peso final, ou peso seco da amostra, o mesmo é colocado numa mufla a 550°C durante duas horas.

Após este tempo calcula-se a diferença do peso seco inicial e o peso seco final, retirando-se assim o teor dos SV. Por fim, as cinzas são a quantidade de substância que permanece e corresponde à componente mineral da amostra. Na tabela seguinte estão apresentados os valores obtidos para os parâmetros anteriormente descritos e, na figura a realização dos ensaios.

Tabela 3. 25 - Determinação da humidade e matéria seca.

Amostra húmida (g)	Amostra seca (g)	Humidade (%)	Matéria seca (%)
4 204	3 011	28	72



Figura 3. 26 - Colocação da amostra na Mufla pelo autor. (Foto de Paulo Almeida).

3.4.4 Precipitação na zona dos biorreatores

A rega dos biorreatores é um procedimento importante para que a decomposição dos resíduos arranque e a produção do biogás possa ser iniciada. Tendo presente as dimensões dos biorreatores piloto bem como os dados climatológicos para a zona de Vale de Milhaços, determinou-se o volume de água da rega a efetuar após a colocação das terras de cobertura e, antes de se colocar a geomembrana superior. Ora, tendo presente os dados climatológicos da zona onde se insere o caso de estudo que se apresenta na figura seguinte, verifica-se que houve uma precipitação média de 59 mm para os meses de janeiro a maio. Nesta conformidade e sabendo-se que o biorreator piloto 1 possui área superficial de 70 m² (10x7) e uma altura de 3,5 metros, o volume de rega inicial que se assumiu foi de cerca de 4,2 m³ de água a distribuir de forma uniforme a massa de refugos depositada e compactada.

Seguindo o mesmo raciocínio para o biorreator piloto 2 resulta numa área superficial de 24 m², e uma altura de 3,5 metros, volume de rega inicial que se assumiu foi de cerca de 1,4 m³ de água a distribuir de forma uniforme sobre a massa de RU indiferenciados depositada e compactada. Após a rega inicial definiu-se também a frequência e o volume de rega a aplicar nos meses posteriores, de maio até novembro, inclusive. De acordo com os dados retirados do quadro climatológico da zona, verificou-se que, em média, a chuva nestes meses foi de 38 mm, para o biorreator 1, assumiu-se um volume de rega de 665 L e para o biorreator 2 resultou num volume de rega de 228 L, de duas em duas semanas.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	11.8	12	13.5	14.9	17.2	19.9	21.2	21.9	20.8	18.5	14.7	12.6
Temperatura mínima (°C)	9.5	9.4	10.8	12.3	14.3	16.7	18	18.6	17.8	16	12.5	10.4
Temperatura máxima (°C)	14.3	14.9	16.6	18.1	20.7	23.7	25.4	26.3	24.7	21.5	17.1	15
Chuva (mm)	73	55	58	56	45	12	3	5	30	84	87	83
Umidade(%)	80%	76%	75%	74%	72%	71%	69%	69%	72%	77%	77%	79%
Dias chuvosos (d)	7	6	6	7	5	2	1	1	3	7	8	7

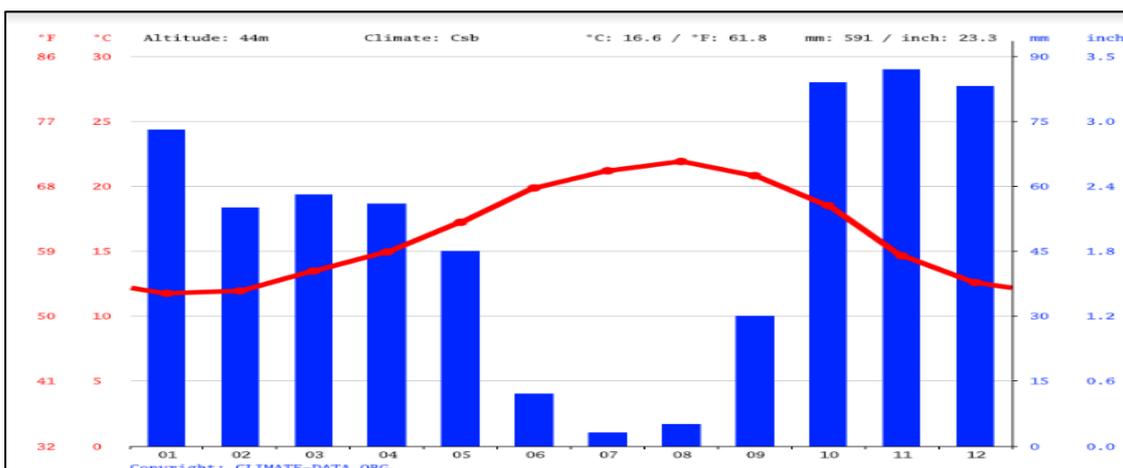


Figura 3. 27 - Dados climatológicos para a zona de Vale de Milhaços.

3.4.5 Medições de campo nos biorreatores

As medições nos biorreatores piloto foram realizadas uma vez por semana depois de terem sido fechados, tendo posteriormente sido alteradas para uma frequência de duas vezes por semana, ou seja, no início da semana e outra no final. Decidiu-se esta alteração da frequência de medições para se ter um melhor acompanhamento da evolução do biogás.

Nas medições removia-se o tampão amovível do topo do dreno e inseria-se de imediato a vara do aparelho de medição no interior deste, procurando assim inserir-se o mais para o interior possível. Importa referir que na vara do aparelho de medição se encontra um tampão modelado à medida do dreno, a fim de impedir a saída de biogás do seu interior para o exterior.

As durações das medições foram realizadas considerando os seguintes intervalos de tempo: zero minutos, 1 minuto, 2 minutos e 5 minutos, evitando-se a saturação da concentração de metano na placa de fluxo.

No final da medição, o aparelho regista as concentrações, em percentagem, de Metano, Dióxido de Carbono, e Oxigénio e ainda de Ácido Sulfídrico em ppm.



Figura 3. 28 - O autor a realizar uma medição do biogás.

As concentrações de metano foram determinadas utilizando-se um analisador de gás portátil, GA5000 da Geotech, um aparelho de medição de gás para a análise de misturas de gases que ocorrem em processos biológicos. Este aparelho possibilita a leitura de mais de cinco parâmetros: Metano (CH_4 em %Volume), Dióxido de carbono (CO_2 em %Volume), Oxigénio (O_2 em %Volume), Sulfeto de hidrogênio (H_2S em ppm); Monóxido de carbono (CO em ppm); Balanço de nitrogênio (Bal. %Volume).

A leitura do metano e dióxido de carbono é realizada por meio de uma célula infravermelha de comprimento de onda duplo com canal de referência que exclui adulterações dos valores de medição devido a influências transversais de outros gases. No ecrã todos os valores são exibidos de forma bem legível, podendo ser lidos rapidamente. O aparelho apresentado foi o utilizado para realizar as medições do biogás para os dois biorreatores piloto.

A utilização deste aparelho serviu para se avaliar a evolução da composição do biogás e avaliar a fase de decomposição da massa de resíduos, com base registo da percentagem existente de CH_4 , CO_2 e O_2 no biogás.



Figura 3. 29 - Aparelho (GA 5000) utilizado para realizar medições do biogás. (Foto do autor)

TRATAMENTO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Medições de biogás nos biorreatores

As medições do biogás efetuadas nos dois biorreatores piloto foram sendo realizadas em paralelo nos mesmos dias previamente planejados, conforme se pode observar na figura seguinte. Para melhor avaliação do que se passa nestes cinco meses, no que à degradação das massa de resíduos depositada diz respeito, ajustaram-se os dados em dois períodos.

Tabela 4. 1 - Medições efetuadas dois biorreatores piloto, de julho a setembro de 2021.

Data	Biorreator Piloto 1 (Fração Resto)			Biorreator Piloto 2 (RU ind.)		
	O ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
07/jul.	0,0	12,5	37,5	1,1	34,6	6,0
15/jul.	0,0	18,7	35,8	0,0	9,0	37,2
23/jul.	0,0	18,9	40,0	4,1	7,2	26,6
30/jul.	0,0	25,5	32,4	0,0	12,0	34,0
02/ago	0,0	29,2	36,8	0,8	10,8	31,6
09/ago	0,0	26,4	33,4	0,0	14,2	33,8
12/ago	0,0	27,5	35,1	0,3	16,6	35,9
16/ago	0,6	24,7	33,1	0,4	25,5	41,7
20/ago	0,3	25,6	33,0	0,2	21,3	36,5
23/ago	0,1	27,0	34,0	0,3	22,3	37,2
03/set.	0,5	27,2	33,2	3,6	18,9	28,2
07/set.	0,5	26,3	32,8	3,4	22,4	29,7
10/set.	0,3	27,6	33,0	5,1	17,3	24,7
13/set.	0,8	25,7	33,0	3,8	33,2	33,9
20/set.	0,0	18,0	28,2	0,0	46,0	39,8
27/set.	0,0	24,1	31,3	1,4	29,1	32,5
Média	0,2%	24%	34%	2,0%	21%	32%

O primeiro período corresponde aos meses iniciais, neste caso julho, agosto e setembro, que em regra é o período relativo ao início do processo de decomposição dos resíduos biodegradáveis depositados. Nas medições realizadas nos meses de julho, agosto e setembro verifica-se que os resultados obtidos se mantêm semelhantes, com uma reduzida presença do O₂ e com valores já significativos de CH₄ e CO₂ em ambos os reatores.

Já relativamente ao biorreator piloto 2, as medições revelam valores de CH₄ e CO₂ em crescendo e, presença nula do O₂. Encontram-se valores de CH₄ na ordem de 30% a 45% e de CO₂ de 30 % a 40%. Estes valores estão em linha com os valores que ocorrem numa aterro tradicional com RU indiferenciados.

Apresentam-se em seguida os resultados das medições efetuadas no primeiro período de julho a setembro, relativamente ao biorreator piloto 1.

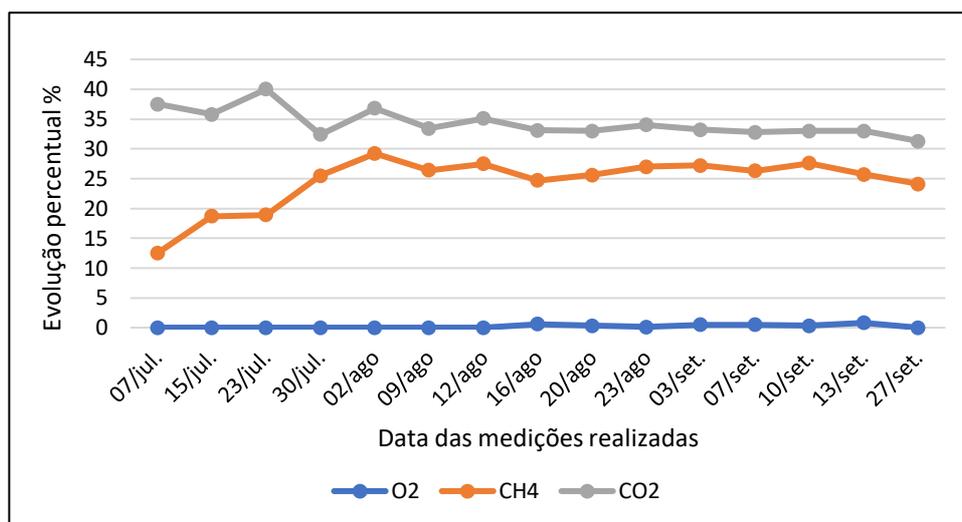


Figura 4. 2 - Gráfico da evolução das medições do biogás nos biorreatores piloto.

Apresentam-se em seguida os resultados das medições efetuadas no segundo período entre outubro e novembro, realizadas na continuidade dos meses do período anterior.

Tabela 4. 2 - Medições efetuadas nos biorreatores piloto em outubro e novembro de 2021.

Data	Biorreator Piloto 1 (Fração Resto)			Biorreator Piloto 2 (RU ind.)		
	O ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
07/out.	0,0	22,8	27,8	0,0	38,0	36,7
11/out.	0,0	23,8	30,9	0,0	50,1	39,0
15/out.	0,0	24,5	31,4	0,0	53,2	39,9
03/nov.	0,0	28,5	33,6	0,0	55,6	38,8
05/nov.	0,0	22,5	30,1	0,0	56,0	40,1
08/nov.	0,0	29,4	31,2	0,0	58,3	39,5
15/nov.	0,0	27,1	28,6	0,0	27,6	32,4
19/nov.	0,0	22,6	27,2	0,0	55,5	39,1
22/nov.	0,0	25,9	29,5	0,0	45,7	36,1
Média	0.0%	25%	30%	0,0%	49%	38%

Observando os resultados das medições observadas neste período de dois meses na continuidade do período anterior, pode-se salientar que os biorreatores assumem já um

comportamento diferente no que se refere à evolução dos valores que se obtiveram. Relativamente ao biorreator piloto 1, onde se confinou a fração resto que ainda contém matéria orgânica residual, nas medições realizadas nos meses de outubro e novembro verifica-se que os resultados obtidos estão estabilizados, estando em linha com os valores do período anterior das medições, ou seja, com presença nula de O₂ e valores semelhantes da ordem de 25% de CH₄ e 30% de CO₂. Já relativamente ao biorreator piloto 2, as medições revelam valores de CH₄ e CO₂ em crescendo e, a presença nula do O₂. Encontram-se valores de CH₄ na ordem de 45% a 55% e de CO₂ de 32 % a 40%.

No gráfico que se apresenta na figura seguinte pode observar-se esta situação, apesar de terem ocorrido alguns valores episódicos de quebra da série evolutiva.

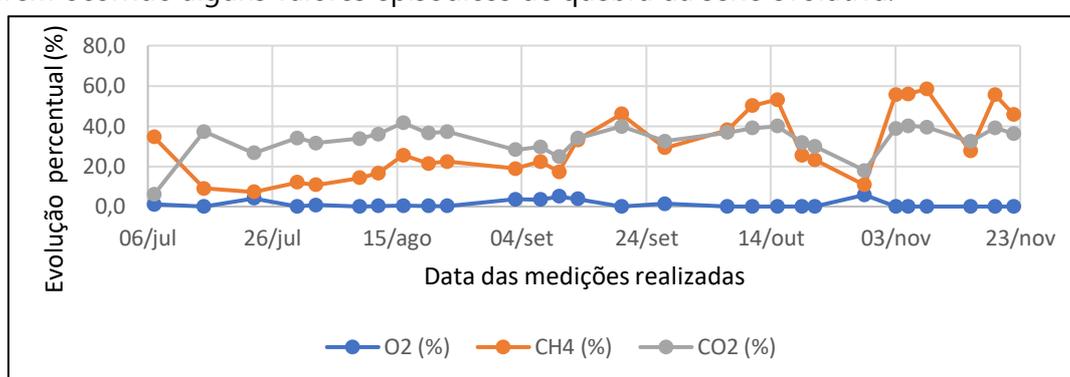


Figura 4. 3 - Valores obtidos nas medições efetuadas no biorreator piloto 2 com Resíduos Indiferenciados.

4.2 Biogás captado nos aterros e na CVO

De acordo com os Relatórios & Contas da AMARSUL de 2018, 2019 e 2020, apresentam-se na tabela seguinte os dados disponíveis da produção de resíduos urbanos entrados diretamente nas instalações da AMARSUL, os resíduos urbanos municipais, os resíduos diretos depositados nos aterros bem como, os resíduos entrados na Central de Valorização Orgânica (CVO) do Seixal (por digestão anaeróbia) para o período de 2016 a 2020.

Tabela 4. 3 - Resíduos diretos entrados nas instalações da Amarsul SA. (ton/ano).

Ano	Total de Resíduos	Resíduos urbanos MUNICIPAIS (ton/ano)	Resíduos diretos depositados nos aterros	Resíduos entrados na CVO - (digestão anaeróbia)	Entradas nas TMB	Entradas na CTA
2016	443 822	384 092	237 854	37 108	79 888	93 203
2017	461 055	397 762	222 137	62 786	106 043	106 043
2018	470 036	405 242	206 941	76 372	122 209	108 108
2019	479 471	408 608	194 467	102 316	143 841	105 484
2020	493 207	420 575	290 992	76 809	128 234	83 845

Apesar do esforço referido pela AMARSUL em reduzir os resíduos depositados em aterro, tendo sido o ano 2020 atípico por causa dos constrangimentos provocados pela pandemia

COVID-19, assiste-se a um aumento significativo dessa deposição e a uma diminuição dos resíduos entrados em TM e TMB (CVO). Esta alteração de valores face a 2019, é justificada pela paragem de março a junho dos TM e TMB (CVO), imposta pelas orientações conjuntas da APA, ERSAR e DGS. As percentagem que se juntam nos dados parciais refletem a sua relação com a total da produção de resíduos urbanos entrados no sistema AMARSUL.

Relativamente às medições reais do biogás gerado nos aterros e na CVO da AMARSUL, selecionaram-se para a análise os dados dos últimos, ou sejam, 2016 a 2021. Esta opção resulta do facto de que só a partir de 2016 constam os valores percentuais de CH₄ no biogás captado nas instalações que dispõem de CEP, nomeadamente, nos aterros do Seixal e Palmela e, na Central de Valorização Orgânica (CVO). Saliente-se que a CVO só arrancou em pleno funcionamento em junho de 2016. Apresentam-se na tabela seguinte os dados registados bem como as concentrações médias de CH₄.

Tabela 4. 4 - Medições anuais de CH₄ efetuadas nas instalações da Amarsul SA.

Ano	Aterro Seixal		Aterro Palmela		CVO Seixal	
	CH ₄ Nm ³	% CH ₄	CH ₄ Nm ³	% CH ₄	CH ₄ Nm ³	% CH ₄
2016	5 261 235	54,31%	7 399 058	55,85%	704 620	60,00%
2017	4 555 415	53,00%	4 867 188	51,17%	3 097 445	58,00%
2018	3 073 530	46,00%	4 284 827	49,00%	3 115 675	60,00%
2019	2 295 770	45,17%	4 464 116	46,00%	4 711 140	60,00%
2020	984 580	42,00%	4 217 207	49,00%	3 233 346	60,00%
2021	--	--	2 067 950	43,50%	3 039 324	60,00%
Média CH ₄		48%		50%		60%

Da tabela verifica-se uma diminuição da percentagem de metano nos aterros, com uma maior redução em 2020. No ano de 2021 os dados existentes reportam ao mês de agosto. No que respeita à CVO, a produção de CH₄ do biogás mantém valores constantes com uma elevada percentagem, o que é normal pois a CVO apenas recebe matéria orgânica dos RU indiferenciados após triagem na linha de processo do tratamento mecânico.

A energia produzida nos aterros e na CVO, bem como as receitas geradas com a injeção na REN, são as constam na tabela seguinte, conforme constam do R&C da AMARSUL, 2019.

Tabela 4. 5 - Produção de energia e receitas em regime de bonificação da tarifa garantida.

Ano	Biogás - AS Seixal		Biogás - AS Palmela		CVO Seixal	
	MWh	Valor €	MWh	Valor €	MWh	Valor €
2016	10 555	1 274 585	16 513	1 788 594	1 518	167 389
2017	10 001	1 218 074	11 785	1 260 432	6 882	774 449
2018	6 365	764 622	10 499	1 129 025	7 524	858 207
2019	2 010	154 633	9 627	1 033 937	10 499	1 214 881
2020	2 072	60 024	9 363	1 003 653	7 540	870 579
Total	31 003	3 471 938	57 787	6 215 641	33 963	3 885 505

Salienta-se que desde o arranque em funcionamento pleno da CVO do Seixal, em 2016, a energia produzida foi sempre em crescendo, com exceção em 2020. Esta situação deve-se fundamentalmente às condicionantes impostas durante a pandemia do COVID-19 e, também, por uma paragem em março a junho daquela ano. Além da paragem, em agosto parou também por causa de um bloqueio no veio do digestor 3 (provavelmente ainda decorrente da sedimentação de inertes pesados durante a paragem COVID) que fez com que aquele digestor ficasse inoperacional, só tendo recomeçado a funcionar apenas em dezembro de 2020.

Por outro lado, a redução no valor da faturação da energia elétrica proveniente do aterro do Seixal traduz, para além da redução de quantidade, a perda de bonificação da tarifa da energia desde março de 2019.

4.3 Simulação pelo modelo LandGEM.

Para os aterros da AMARSUL (Seixal e Palmela) realizaram-se simulações de produção de biogás com suporte no software do modelo LandGEM. Foram simulados dois cenários de deposição de resíduos, simulando-se para cada aterro a produção de biogás com diferentes quantidades de biorresíduos depositados e ainda um cenário que procura simular a deposição em aterro posteriormente a 2035, onde apenas são depositados cerca de 8% de biorresíduos provenientes dos refugos das unidades de TMB (Caracterização de biorresíduos na fração resto da CVO em 2020).

Para se obterem resultados tão fidedignos quanto possível, a realização da simulação com base no LandGEM é fundamental a seleção de determinados parâmetros e fatores características das condições assumidas. É necessária a introdução dos anos de abertura e de encerramento do aterro, bem como os quantitativos de resíduos depositados em cada ano de operação.

Os restantes inputs a preencher no software são os seguintes:

- *Taxa de produção de metano, k (ano^{-1});*
- *Potencial de produção de metano, L_0 (m^3/Mg);*
- *Concentração NMOC;*
- *Conteúdo de Metano (% em volume).*

Também é possível selecionarem-se os gases que se querem analisar. Neste caso foram selecionados o Biogás Total, o Metano, o Dióxido de Carbono e o NMOC (*Nonmethane Organic Compounds*). Os valores do potencial de produção de metano (L_0) foram calculados para as simulações realizadas pela expressão apresentada anteriormente (pág. 33) e introduzido manualmente no Software. Em seguida demonstra-se o cálculo deste fator.

O L_0 resulta do produto de quatro variáveis: MCF, DOC, DOC_f e F. O MCF, como referido anteriormente, pode variar entre 0,4 e 1, utilizando-se o valor de 1 por se tratar de dois aterros controlados e equipado com os devidos sistemas de proteção ambiental e de compactação

dos RU. O DOC é calculado através da expressão apresentada anteriormente e varia consoante a caracterização física dos RU depositados. Como tal, utilizou-se a caracterização física dos RU realizada em 2020 pela AMARSUL e, estimou-se a sua evolução até 2035. No caso das simulações para a situação em aterro posteriormente a 2035 foi considerada a caracterização física da *fração resto* da unidade CVO do Seixal assinalada anteriormente. Na tabela seguinte apresentam-se as percentagens da composição de cada uma das frações consideradas para a determinação do fator DOC do modelo LandGEM.

Tabela 4. 6 - Caracterização Física das frações dos RU consideradas para o cálculo do fator DOC.

Categoria	2020	2025	2030	2035
Biorresíduos	31,98%	28,78%	23,99%	8,74%
Verdes	1,84%	1,66%	1,38%	0,00%
Papel/Cartão	6,95%	7,23%	7,65%	5,82%
Têxteis	3,01%	3,13%	-	-
Madeira	0,27%	0,28%	0,30%	0,50%

O DOC_f representa a fração do carbono orgânico que se decompõe sob condições anaeróbias, utilizando-se o valor de 50% em todas as simulações realizadas. O fator F que representa a fração de metano presente no biogás utilizado foi de 45% para o período de 2020 - 2025, de 35% para o período 2025- 2030 e anos posteriores.

Justifica-se a utilização deste valor de F para a situação posterior a 2035 pois só será permitida a deposição da *fração resto* (com biorresíduos residuais agregados a materiais) nos novos aterros. Logo as concentrações de CH_4 registadas nas medições do biorreator piloto 1 deverão ser da mesma ordem de grandeza. Os valores obtidos de L_0 para as diferentes simulações a realizar apresentam-se na tabela seguinte.

Tabela 4. 7 - Parâmetros considerados para os cálculos dos L_0 .

	2020	2025	2030	2035	Unidade
MCF	0,8	0,8	0,8	0,8	-
DOC	0,092	0,088	0,083	0,038	ton C/ton RSU
DOC_f	60%	60%	60%	30%	%
F	45	45	35	35	%
L_0	0,029	0,025	0,021	0,004	ton CH_4 /ton RSU
	41,1	35,6	29,8	5,9	$m^3 CH_4$ /ton RSU

O L_0 utilizado para as simulações com a deposição em aterro sem desvio dos biorresíduos foi de 41,1 $m^3 CH_4$ /ton RU, valor idêntico aos inputs considerados pela AMARSUL nas simulações realizadas na estimativa do biogás produzido (Silva, 2014). Os valores de k

considerados foram os mesmos para todas as simulações, utilizando-se um k de $0,05 \text{ ano}^{-1}$ para ambos os aterros da AMARSUL (Silva, 2014).

4.4 Entrada de RU nas instalações da AMARSUL

4.4.1 Deposição de RU nos aterros (1998-2015)

Na tabela seguinte apresenta-se a produção e deposição de RU desde 1998 (ano de arranque) até 2015 nos Ecoparques da Amarsul. Ao longo dos anos a quantidade de resíduos depositados em aterros determinaram-se considerando a evolução da percentagem de RU depositados diretamente em aterro, de acordo com os Relatórios do Estado do Ambiente para os respetivos anos.

Tabela 4. 8 - Resíduos diretos entrados nas instalações da Amarsul SA entre 1998 e 2015. (ton/ano)

Ano	Produção de Resíduos	Resíduos urbanos diretos para os aterros
1998	277 575	208 181
1999	291 849	175 109
2000	296 647	154 256
2001	306 262	168 444
2002	306 611	229 958
2003	309 490	216 643
2004	308 006	200 204
2005	315 250	198 608
2006	331 385	215 400
2007	339 735	207 238
2008	351 841	228 697
2009	324 442	207 643
2010	296 504	183 832
2011	318 186	190 912
2012	346 589	190 624
2013	338 288	145 464
2014	352 540	148 067
2015	361 250	122 825

4.4.2 Prospetiva dos RU na AMARSUL

As projeções que se apresentam de seguida para a produção de resíduos entrados na AMARSUL, os resíduos urbanos municipais, os resíduos diretos depositados nos aterros e, as entradas na CVO até 2035, tomam como base os valores reais dos anos [2016 a 2020] a partir

dos quais se calcula a estimativa da produção de resíduos urbanos com base nos pressupostos definidos no subcapítulo 3.2.

Tabela 4. 9 - Resíduos diretos entrados nas instalações da Amarsul SA. (ton/ano).

Ano	Produção total de Resíduos	Resíduos Urbanos Municipais	Resíduos diretos depositados nos aterros	Entradas na CVO	
2016	-	373 969	323 640	108 451	31 268
2017		408 109	352 084	130 595	55 576
2018		419 698	361 843	138 500	68 193
2019		441 631	376 361	145 738	94 241
2020	3,50%	461 026	393 133	188 099	71 797
2021		464 253	394 616	192 704	35 515
2022		467 503	397 378	183 050	35 764
2023		470 775	400 159	173 251	36 014
2024		474 071	402 961	163 306	37 689
2025	4,00%	477 162	405 588	153 214	38 424
2026		480 979	408 833	143 114	40 346
2027		484 827	412 103	132 843	42 363
2028		488 706	415 400	122 398	44 481
2029		492 615	418 723	111 778	46 705
2030	7,50%	496 248	421 810	100 979	49 010
2031		503 692	428 137	90 626	52 833
2032		511 247	434 560	79 940	56 954
2033		518 916	441 078	68 913	61 396
2034		526 700	447 694	57 537	66 185
2035		533 467	453 447	45 804	71 197

4.5 Cenários prospetivos. Produção de biogás e energia

Neste capítulo procura-se avaliar a produção do biogás gerado e as suas características em termos do CH₄ e CO₂ com base em situações simuladas através de dois cenários, ou seja; no primeiro considera-se a recolha seletiva de biorresíduos obrigatória a partir de 2023 e, no segundo a continuidade da situação atual na AMARSUL sem recolha seletiva de biorresíduos.

Pretende-se desta forma determinar também a variação entre a energia real (MWh) gerada entre 2016-2020 nos centros electroprodutores (CEP) de valorização de biogás, acrescida da continuidade da mesma situação da deposição de biorresíduos em aterro tal como atualmente no período 2021-2035 *vs* para o mesmo período, a determinação do potencial de energia que se estima através do modelo internacional mais reconhecido para esta medição, o método LandGEM, (United States Environmental Protection Agency (US EPA)), mas com os valores de L_0 e de k determinados em conformidade com as características dos resíduos

indiferenciados à medida que vai decrescendo a presença de biorresíduos, objeto de recolha seletiva obrigatória a partir de 2023.

4.5.1.1 CENÁRIO 1 - Com recolha seletiva de biorresíduos.

Neste cenário efetua-se a simulação para os dois aterros em estudo, assumindo-se a redução de deposição dos biorresíduos em resultado da obrigatoriedade da recolha seletiva de biorresíduos a partir de 2023, em conformidade com os valores do balanço global apresentado anteriormente na tabela 3.5.

Este cenário 1 aborda a situação em quatro períodos com diferentes simulações :

- No período 2019-2023 assumiram-se os inputs utilizados nas simulações com deposição de biorresíduos em aterro;
- Para os períodos 2023-2027, 2027-2031 assumiram-se os inputs utilizados nas simulações com aumento crescente da recolha seletiva dos biorresíduos;
- Para o período 2031-2035, considerou-se apenas a deposição de cerca de 8% de *biorresíduos residuais* depositados no aterro em 2035.

A distinção destes períodos procura obter resultados mais próximos do real, dado que no primeiro período da simulação a recolha seletiva de biorresíduos será pouco relevante, uma vez que o desvio de biorresíduos de aterro será nulo.

Para este efeito na realização do Cenário 1 consideraram-se os seguintes fatores calculados:

- No período de 2023-2027, utilizaram-se :
 - $L_0 = 35,6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RSU}$, $k=0,05 \text{ ano}^{-1}$.
- No período de 2027-2031, utilizaram-se :
 - $L_0 = 29,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RSU}$, $k=0,05 \text{ ano}^{-1}$.
- No período de 2031-2035, utilizaram-se :
 - $L_0 = 5,9 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RSU}$, $k=0,05 \text{ ano}^{-1}$.
- A evolução da recolha seletiva de biorresíduos é a apresentada na tabela 3.5.
- Horizonte temporal: 2035.

4.5.1.2 CENÁRIO 2 - Sem recolha seletiva de resíduos

Neste cenário efetua-se a simulação considerando-se que não existe recolha seletiva de biorresíduos e que estes continuariam, tal como à data, a serem depositados com os RU indiferenciados em aterro. Para este efeito utilizaram-se os valores estimados de L_0 e de k do início da exploração daquelas infraestruturas:

- $L_0 = 41,1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton RU}$ e $k=0,05 \text{ ano}^{-1}$,
- Horizonte temporal: 2035

Nas situações simuladas nestes cenários, o encerramento de ambos os aterros têm como horizonte temporal 2035, pelo que no cenário 1 o biogás gerado irá decrescer a partir de 2024 pela redução de decomposição de biorresíduos até 2035. No cenário 2, como a deposição de

biorresíduos em aterro irá continuar, a produção de energia mantém-se até 2035. Por este facto continuariam a existir proveitos relativas à subsidiação da energia pelo biogás gerado e, o seu impacte ambiental associado às emissões difusas, iria continuar. No ano de 2023 registou-se a diferença do biogás gerado comparando os dois cenários, pois até ao ano de 2022 obteve-se sempre os mesmos valores de produção de biogás, este acontecimento explica-se pelo facto de nesse ano se iniciar a recolha seletiva de biorresíduos e para estimar esse acontecimento a partir do ano de 2023 considerou-se o desvio de biorresíduos dos aterros. A tabela completa referente à tabela seguinte encontra-se disponível nos Apêndice na tabela A.3.

Tabela 4. 10 - Biogás gerado no Cenário 1 e Cenário 2

ANO	C.1 - COM RS DE BIORRESÍDUOS				C.2 - SEM RS DE BIORRESÍDUOS				VARIACÃO Biogás gerado (m ³ /ano)	
	RU em ATERRO	Biogás Gerado (m ³ /ano)	CH ₄ (m ³ /ano)	CO ₂ (m ³ /ano)	RU em ATERRO	Biogás Gerado (m ³ /ano)	CH ₄ (m ³ /ano)	CO ₂ (m ³ /ano)		
1998-2015	3 392 106	9,81E+07	4,71E+07	5,10E+07	3 392 106	9,81E+07	4,71E+07	5,10E+07	0,00E+00	
2016	108 451	12,66E+06	4,52E+06	4,90E+06	108 451	12,66E+06	4,52E+06	4,90E+06		
2017	130 595	9,42 E+06	4,52E+06	4,90E+06	130 595	9,42 E+06	4,52E+06	4,90E+06		
2018	138 500	7,35 E+06	4,56E+06	4,90E+06	138 500	7,35 E+06	4,56E+06	4,90E+06		
2019	145 738	6,76 E+06	4,62E+06	4,90E+06	145 738	6,76 E+06	4,62E+06	4,90E+06		
2020	188 099	5,21 E+06	4,68E+06	4,89E+06	188 317	5,21 E+06	4,68E+06	4,89E+06		
2021	162 489	9,66E+06	4,83E+06	4,89E+06	163 038	9,66E+06	4,83E+06	4,89E+06		
2022	158 951	9,85E+06	4,92E+06	4,87E+06	160 050	9,85E+06	4,92E+06	4,87E+06		
2023	155 356	1,00E+07	3,65E+06	6,13E+06	157 004	1,00E+07	5,01E+06	5,01E+06		
2024	156 443	1,52E+06	5,34E+05	6,14E+06	158 641	1,02E+07	5,08E+06	5,08E+06		8,68E+06
2025	143 149	2,33E+06	7,80E+05	5,86E+06	166 038	1,03E+07	5,15E+06	5,15E+06		7,97E+06
2026	139 484	2,23E+06	9,91E+05	7,77E+06	147 236	1,05E+07	5,23E+06	5,23E+06		8,27E+06
2027	121 207	2,23E+06	2,03E+05	1,59E+06	136 711	1,05E+07	5,27E+06	5,27E+06	8,27E+06	
2028	117 289	2,23E+06	3,70E+05	2,90E+06	152 997	1,06E+07	5,29E+06	5,29E+06	8,37E+06	
2029	113 302	2,33E+06	5,72E+05	4,29E+06	149 009	1,07E+07	5,34E+06	5,34E+06	8,37E+06	
2030	109 175	2,23E+06	6,62E+05	5,20E+06	180 590	1,08E+07	5,38E+06	5,38E+06	8,57E+06	
2031	100 738	2,33E+06	3,45E+04	2,59E+05	172 725	1,10E+07	5,48E+06	5,48E+06	8,67E+06	
2032	97 137	2,33E+06	6,45E+04	4,86E+05	169 123	1,11E+07	5,56E+06	5,56E+06	8,77E+06	
2033	83 027	2,43E+06	1,01E+05	7,24E+05	155 013	1,12E+07	5,63E+06	5,63E+06	8,77E+06	
2034	79 005	2,43E+06	1,24E+05	8,96E+05	150 991	1,13E+07	5,66E+06	5,66E+06	8,87E+06	
2035	53 347	3,48E+05	1,22E+05	6,12E+06	198 359	1,14E+07	5,69E+06	5,69E+06	1,11E+07	
Total	5 893 588	1,94E+08	-	-	6 521 232	2,99E+08	-	-	1,05E+08	

Considerou-se importante nesta avaliação englobar todos os valores disponíveis e calculados do biogás gerado desde o início de exploração dos aterros. Assim realizou-se o somatório dos valores referentes ao período 1998-2015, acrescido dos valores anuais até 2035. Na tabela seguinte apresenta-se a diferença do biogás gerado que se verifica entre os dois cenários.

Tabela 4. 11 - Variação do Biogás gerado entre Cenário 1 e Cenário 2.

Ano	Biogás Gerado (m ³ /ano)		Delta, Δ
	C.1 - COM RS DE BIORRESÍDUOS	C.2 - SEM RS DE BIORRESÍDUOS	
2025	2,33E+06	1,03E+07	7,97E+06
2027	2,23E+06	1,05E+07	8,27E+06
2030	2,23E+06	1,08E+07	8,57E+06
2035	3,48E+05	1,14E+07	1,11E+07

Tendo em conta a tabela anterior determinou-se a variação correspondente à diferença da produção de energia, em MWh, dos dois cenários de acordo com o biogás captado. No cenário 1, com recolha seletiva de biorresíduos, o biogás gerado diminuiu significativamente a partir do ano de 2024 em relação ao cenário 2, o que é natural porque o aumento da recolha seletiva dos biorresíduos provoca a redução da sua deposição em aterro e, desta forma, a redução do biogás produzido.

Em termos da energia gerada, os valores obtidos pelos cálculos efetuados tendo em consideração o rendimento do motogerador de 42,5% são os que se assinalam na tabela seguinte. Assinala-se que os valores que respeitam aos anos entre 2016-2020 foram obtidos no R&C da AMARSUL, 2020.

Tabela 4. 12 - Diferença de Energia gerada (MWh).

Ano	C.1 - COM Recolha Seletiva de BIORRESÍDUOS	C.2 - SEM Recolha Seletiva de BIORRESÍDUOS	Variação Δ (MWh)
	Energia Gerada (MWh)		
2016	2,71E+04	2,71E+04	0,00E+00
2017	2,18E+04	2,18E+04	
2018	1,69E+04	1,69E+04	
2019	1,16E+04	1,16E+04	
2020	1,14E+04	1,14E+04	
2021	1,26E+04	1,26E+04	
2022	1,29E+04	1,29E+04	1,04E+04
2023	1,31E+04	1,31E+04	
2024	1,33E+04	1,33E+04	
2025	3,04E+03	1,34E+04	
2026	2,91E+03	1,37E+04	
2027	2,91E+03	1,37E+04	
2028	2,91E+03	1,38E+04	
2029	3,04E+03	1,40E+04	
2030	2,91E+03	1,41E+04	
2031	3,04E+03	1,44E+04	
2032	3,04E+03	1,45E+04	
2033	3,17E+03	1,46E+04	
2034	3,17E+03	1,47E+04	
2035	0,00E+00	1,49E+04	
Total	1,71E+05	2,96E+05	1,25E+05

Fazendo agora uma comparação entre a variação Δ agora determinada e, a variação Δ verificada nos biorreatores piloto, encontra-se uma correspondência entre as duas situações.

O desvio delta relacionado com os biorreatores piloto 1 e 2 é semelhante ao delta observado, em termos qualitativos, entre o cenário 1 e o cenário 2. Com efeito o cenário 1 corresponde à simulação da produção de biogás num aterro onde existe desvio de biorresíduos que é semelhante às condições criadas no biorreator piloto1 onde apenas se depositou a *fração resto* da CVO do Seixal e, o cenário 2, onde se simulou condições com deposição de resíduos indiferenciados, em tudo semelhante às condições criadas no biorreator piloto 2.

Relativamente à valorização energética do biogás gerado na CVO, pode-se observar a na figura seguinte energia que será produzida com o incremento das quantidades dos biorresíduos que serão desviados do aterro pela sua recolha seletiva nos diferentes períodos assinalados.

A determinação destes valores teve por base o valor da energia de 293 kWh por tonelada de matéria orgânica alimentada aos digestores que a AMARSUL determinou, bem como a estimativa realizada no capítulo 3 referente às quantidades de biorresíduos desviados do aterro e que serão encaminhadas para a CVO.

Tabela 4. 13 - Energia produzida, em média, pela CVO (MWh)

Energia Produzida em média pela CVO (MWh)	Até 2026	2027	2030	2035
	10 548	4 543	20 925	42 489

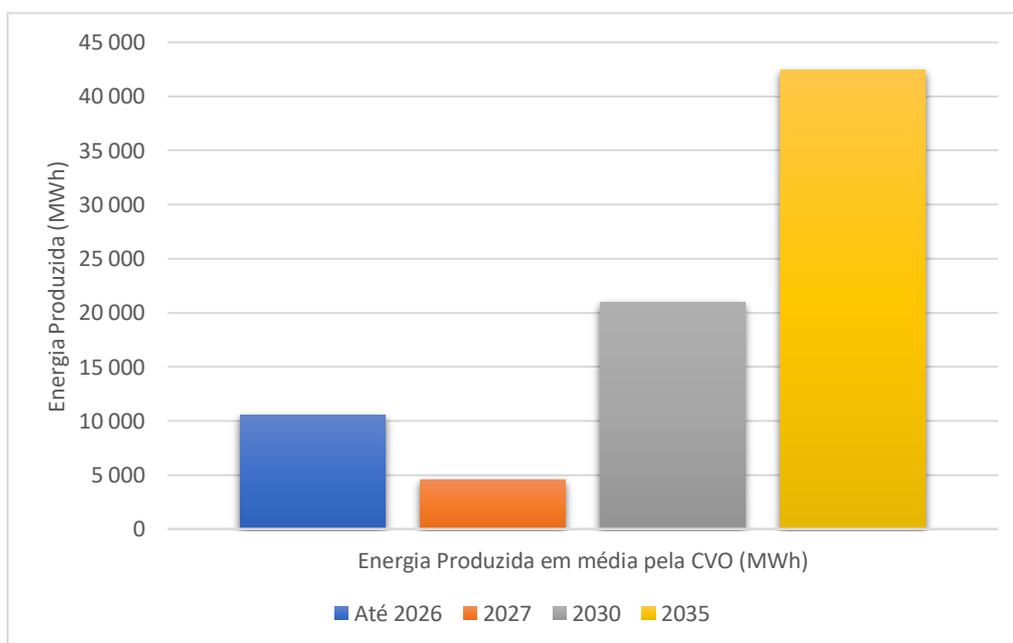


Figura 4. 4 - Evolução da produção de energia pela CVO com a RS de biorresíduos.

4.6 Emissões associadas e evitadas

Para a determinação das emissões evitadas e associadas, importa determinar em primeiro lugar o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás para se poder calcular a energia potencial produzida. Com efeito o PCI representa a energia que uma determinada quantidade de biogás consegue libertar por uma reação química de oxidação. Para o seu cálculo consideraram-se os seguintes parâmetros:

- Percentagem de Metano assumida no Biogás:
 - 35% em condições de redução da deposição de biorresíduos em aterro conforme cenário 1, semelhante ao permitido em aterros futuros de nova geração a construir em conformidade com as condições da meta exigida em 2035;
 - 50% em condições de RU indiferenciados depositados em aterro considerados no cenário 2;
 - PCI Metano = 50 MJ/kg, conforme dados em STANDARD; TECHNOLOGY, 2017.
- Para o cálculo da energia potencial produzida consideraram-se os seguintes pressupostos:
 - Percentagem média de biogás valorizada nos aterros da AMARSUL: 80 % .
 - Eficiência do motogerador: 42,9 %;
 - Horas de operação/ano (%): 90 %;
 - Eficiência do transformador (%): 90 %.

Com base nestas premissas, começou por se calcular a quantidade anual de biogás captado (m^3 /ano). Para tal multiplicou-se o valor da produção total de biogás estimado pelo LandGEM pela percentagem de captação de biogás. Considerou-se uma captação de 80% do total de biogás produzido. O biogás captado calcula-se pela expressão seguinte:

$$\text{Biogás Captado} \left(\frac{m^3}{\text{ano}} \right) = \text{Total de Biogás Produzido} \left(\frac{m^3}{\text{ano}} \right) * 0,8$$

Seguidamente, calculou-se o potencial de energia produzida através do biogás captado (kWh/ano), multiplicando-se o volume anual de biogás captado pelo PCI do biogás. A expressão deste cálculo apresenta-se em seguida:

$$\text{Energia Potencial do Biogás Captado (kWh/ano)} = \text{Biogás Captado} \left(\frac{m^3}{\text{ano}} \right) * \text{PCI}$$

Por fim, calculou-se o potencial de energia produzida (kWh/ano), multiplicando-se a energia potencial do biogás captado pelas eficiências do motogerador e do transformador e ainda pela percentagem de horas de operação anuais. O potencial de energia produzida calcula-se pela expressão seguinte:

$$\begin{aligned} \text{Potencial de Energia Produzida (kWh/ano)} \\ = \text{Energia Potencial do Biogás Captado} * 0,429 * 0,9 * 0,9 \end{aligned}$$

▪ Emissões associadas e evitadas

Para efeitos de cálculo, consideraram-se dois tipos de emissões;

- As emissões associadas são as que ocorrem na livre emissão de metano para atmosfera, considerando-se como perdas no caso do aproveitamento energético.
- As emissões evitadas que se devem à injeção de energia elétrica na rede, sendo as emissões evitadas as que não são emitidas, derivado do aproveitamento energético (Silva, 2014).

Para se calcular as emissões em referência, considera-se o Potencial de Aquecimento Global (PAG) do metano de 23 (Silva, 2014).

As emissões associadas calculam-se pela expressão seguinte:

$$\text{Emissões Associadas} \left(\frac{tCO_2}{ano} \right) = \text{Produção total de metano} \left(\frac{t}{ano} \right) * \% CH_4 \text{ libertado} * \text{Potencial de aquecimento global } CH_4$$

A produção total de metano considerada na expressão anterior resulta da simulação do LandGEM. As emissões evitadas, no caso de se dar a queima do biogás ao invés do aproveitamento energético do mesmo, calcula-se pela expressão seguinte:

$$\begin{aligned} \text{Emissões Evitadas devido à queima} \left(\frac{tCO_2}{ano} \right) \\ = \text{Produção total de metano} \left(\frac{t}{ano} \right) * \% CH_4 \text{ queimado} \\ * \text{Potencial de aquecimento global (23)} \end{aligned}$$

No caso de se valorizar energeticamente o biogás e se proceder à injeção da energia produzida na rede, as emissões evitadas calculam-se pela expressão seguinte:

$$\begin{aligned} \text{Emissões evitadas devido à injeção na rede} \left(\frac{tCO_2}{ano} \right) \\ = \frac{\text{Potencial de energia produzida (kwh/ano)}}{1000} \\ \times \frac{\text{Fator de emissão médio da EDP (gCO}_2\text{/kWh)}}{1000} \end{aligned}$$

O fator de emissão médio da EDP considerado foi retirado do sítio da EDP Indústria em maio de 2021 e é de 197,01 g CO₂/kWh.

Em seguida comparam-se os valores reais de captação dos aterros da AMARSUL com os valores teóricos totais obtidos pelo modelo LandGEM, para se avaliar o percentual de desvio da captação que terá existido.

A. Aterro Sanitário de Palmela

Os valores reais de biogás captado bem como os valores teóricos de biogás total produzido no Aterro Sanitário de Palmela (ASP) para o período de 2014 a 2020 apresentam-se na tabela seguinte. Para a avaliação pretendida foram coletados nos Relatórios Anuais do Estado Ambiental da AMARSUL deste aterro, os dados relativos ao período de 2014-2020.

A razão pela qual nos situamos apenas neste período deve-se ao facto de a AMARSUL apenas dispor de valores nestes anos relativamente aos volumes reais de biogás captado e valorizado no centro electroprodutor de energia (CEP). Estes valores foram comparados tendo sido determinada a Variação Δ que se apresenta na tabela.

Tabela 4. 14 - Percentagem de Valorização de Biogás no ASP.

Ano	Potencial de Biogás pelo modelo LandGEM	Biogás real captado	Variação Δ	
	m ³		m ³	%
2014	1,27E+07	6,48E+06	6,23E+06	49%
2019	9,04E+06	4,46E+06	4,58E+06	51%
2020	9,49E+06	4,22E+06	5,27E+06	56%

Da comparação efetuada, verifica-se que variação Δ encontrada entre o valor teórico e o real, tem um mínimo de 49% e máximo de 56% em termos do potencial de biogás que teria sido produzido. A média da variação obtida é de 52%.

B. Aterro Sanitário do Seixal

Seguindo a mesma metodologia e coletados os dados relativos aos anos em referência apresentam-se os valores reais de biogás captado no ASS, bem como os valores teóricos de biogás total produzido, para os anos apresentados.

Tabela 4. 15 - Percentagem de Valorização de Biogás no ASS.

Ano	Potencial de Biogás pelo modelo LandGEM	Biogás real captado	Variação Δ	
	m ³		m ³	%
2005	7,08E+06	5,81E+06	1,27E+06	18%
2007	8,35E+06	6,24E+06	2,11E+06	25%
2009	1,00E+07	5,98E+06	4,06E+06	40%
2014	1,16E+07	5,10E+06	6,54E+06	56%
2019	1,17E+07	2,30E+06	9,39E+06	80%
2020	1,14E+07	9,85E+05	1,04E+07	91%

Da comparação efetuada, verifica-se que variação Δ encontrada entre o valor teórico e o real, tem um mínimo de 18% e um máximo de 91% em termos do potencial de biogás que teria sido produzido. Retirando os valores extremos, a média da variação obtida é de 50%. Retira-se da tabela que a média da variação em ambos os aterros que recebem resíduos urbanos indiferenciados para confinamento técnico, situa-se na ordem dos 50%.

4.6.1 Emissões associadas e evitadas. CENÁRIO 1

Tendo presente os indicadores assumidos no subcapítulo 4.5, considera-se nos cenários em estudo que a energia injetada na rede nacional elétrica (REN) representa 90% da energia potencial gerada com base no biogás captado, independentemente do fim da subsídio em 2022. A introdução na REN da energia produzida pode continuar só que não será sujeita a valor acrescido por MW. A vantagem é que a produção corresponderá a um determinado percentual do consumo da instalação, com fatura neutra nesse percentual.

Tendo este pressuposto e as fórmulas de cálculo assinaladas, apresentam-se na tabela seguinte os quantitativos de biogás captado, da energia potencial do biogás captado acrescido do potencial da energia produzida nos anos com metas do horizonte temporal em estudo. Na tabela apresentada apenas se salientam os anos mais significativos relativos ao período 1998-2035. O valor de todos os anos analisados consta no capítulo dos Apêndices, na tabela A.4.

Tabela 4. 16 - Biogás Captado, Energia potencial do biogás captado e de energia produzida para o cenário 1

Ano	Biogás Captado	Energia Potencial	Energia injetada na REN
	m ³	kWh/ano	kWh/ano
2000	1 249 691	0	0
2005	3 939 368	6 426 182	5 783 564
2010	6 285 523	10 253 402	9 228 061
2015	7 486 565	12 212 628	10 991 365
2020	4 168 000	11 435 000	10 291 500
2023	8 000 000	13 050 180	11 745 162
2025	1 864 000	3 040 692	2 736 623
2027	1 784 000	2 910 190	2 619 171
2030	1 784 000	2 910 190	2 619 171
2035	278 400	0	0
TOTAL	155 189 245	282 304 473	254 074 025

Verifica-se na tabela apresentada que o total de biogás captado no período 2000-2035 é de 155 189 245 m³. A este volume de biogás captado corresponde uma energia potencial de 282 304 473 kWh que, tendo em conta o rendimento do equipamento de produção elétrica, o total de energia injetada na REN no período em análise vem de 254 074 025 kWh.

O total determinado refere-se ao período 1998-2035, apresentando-se a tabela com a totalidade dos anos analisados no capítulo dos Apêndices, na Tabela A. O biogás emitido e a sua conversão para toneladas de CO₂ equivalente apresenta-se na tabela A.8.

As emissões associadas à deposição dos RU em aterro, bem como as emissões evitadas devido à injeção da energia produzida na rede apresentam-se na tabela seguinte.

Para os dois cenários considerou-se para o CH₄ um PAG de 23 em relação ao CO₂.

Tabela 4. 17 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 1.

Ano	Emissões Associadas	Emissões Evitadas pela injeção na REN
	ton CO ₂ /ano	ton CO ₂ /ano
2000	3 061	0
2005	9 649	1 139
2010	15 396	1 818
2015	18 338	2 165
2020	8 168	2 028
2023	11 431	2 314
2025	2 663	539
2027	2 549	516
2030	2 549	516
2035	398	0
TOTAL	655 426	50 055

As emissões totais associadas à deposição de biorresíduos em aterro são de 655 426 toneladas de CO₂. As emissões totais evitadas devido à injeção na rede da energia elétrica produzida são de 50 055 toneladas de CO₂.

4.6.2 Emissões associadas e evitadas. CENÁRIO 2

Considerando os pressupostos e as fórmulas de cálculo assumidas, tal como exposto para o cenário1, apresentam-se na tabela seguinte os quantitativos de biogás captado, da energia potencial do biogás captado e o potencial da energia produzida nos anos ali referidos. A tabela completa apresenta-se no capítulo dos apêndices na Tabela A.4.

Tabela 4. 18 - Biogás Captado, Energia potencial do biogás captado e potencial de energia produzida para o cenário B da Amarsul.

Ano	Biogás Captado	Energia Potencial	Energia injetada na REN
	m ³	kWh/ano	kWh/ano
2000	1 249 691	0	0
2005	3 939 368	6 426 182	5 783 564
2010	6 285 523	10 253 402	9 228 061
2015	7 486 565	12 212 628	10 991 365
2020	4 168 000	11 435 000	10 291 500
2023	8 000 000	13 050 180	11 745 162

2025	8 240 000	13 441 685	12 097 517
2027	8 400 000	13 702 689	12 332 420
2030	8 640 000	14 094 194	12 684 775
2035	9 120 000	14 877 205	13 389 485
TOTAL	238 894 845	421 288 890	379 160 001

Pela tabela anterior, verifica-se que o volume total de biogás captado no período em estudo é de 238 894 845 m³. A este volume de biogás captado corresponde uma energia potencial de 421 288 890 kWh e, considerando os rendimentos dos equipamentos de produção elétrica, o potencial de energia produzida no período em análise vem de 379 160 001 kWh. As emissões associadas à deposição dos RU em aterro, bem como as emissões evitadas devido à injeção da energia produzida na rede apresentam-se na tabela seguinte.

O biogás emitido e a sua conversão para toneladas de CO₂ equivalente apresenta-se na tabela A.6.

O total determinado para a seguinte tabela é referente ao período 1998-2035, e a tabela completa com os dados anuais do horizonte temporal em estudo apresenta-se no capítulo dos Apêndices na tabela A.9.

Tabela 4. 19 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 2 na Amarsul.

Ano	Emissões Associadas	Emissões Evitadas devido à injeção na rede
	ton CO ₂ /ano	ton CO ₂ /ano
2000	3 061	0
2005	9 649	1 139
2010	15 396	1 818
2015	18 338	2 165
2020	8 168	2 028
2023	15 677	2 314
2025	16 147	2 383
2027	16 461	2 430
2030	16 931	2 499
2035	17 872	2 638
TOTAL	1 013 178	74 698

As emissões totais associadas à deposição em aterro são de 1 013 178 toneladas de CO₂, enquanto as emissões totais evitadas devido à injeção da energia produzida na rede são de 74 698 toneladas de CO₂.

5.1 Biorreatores Pilotos

Implementaram-se dois tipos de biorreatores com o objetivo de analisar as diferenças de produção de biogás e produção de lixiviados.

O biorreator piloto 1 tem confinada uma massa de resíduos com características físicas semelhantes aos resíduos que terão de ser depositados nos aterros futuros de nova geração no pós-2035, sendo os resíduos depositados no biorreator piloto 2 os provenientes de recolha indiferenciada realizada pelos municípios.

Na tabela seguinte pode-se observar a percentagem de biorresíduos existentes em cada um dos biorreatores, de acordo com os dados obtidos na caracterização física realizada pela AMARSUL.

Tabela 5. 1 - Percentagem de biorresíduos existente nos biorreatores 1 e 2.

Biorreator 1	Biorreator 2
8,7%	32,0%

Salienta-se que aquando do enchimento biorreator piloto 1, para além da percentagem de biorresíduos existente ser menor do que a existente no biorreator piloto 2, o estado de biodegradabilidade da massa de resíduos no biorreator piloto 1 encontrava-se também num estado mais avançado.

Com efeito, a massa de resíduos colocada no biorreator piloto 1 resultou após passagem ao longo de toda a linha de tratamento mecânico da CVO, após o qual foi armazenado até enchimento do respetivo contentor à carga, tendo demorado alguns dias até ser transportado para deposição da fração resto no biorreator piloto 1.

No biorreator piloto 2 os RU depositados foram recolhidos e colocados diretamente neste sem qualquer tipo de tratamento prévio.

- **Análise crítica dos resultados. Produção de metano**

O primeiro período que se analisa corresponde aos meses iniciais, neste caso julho, agosto e setembro, que em regra marca o início do processo de decomposição dos resíduos biodegradáveis depositados.

Neste período ao observarem-se os resultados quer do biorreator piloto 1 quer do biorreator piloto 2, pode-se concluir o seguinte:

- *Os resultados das medições realizadas nos meses de julho, agosto e setembro, revelam valores semelhantes com uma reduzida presença do O₂ e com valores já significativos de CH₄ e CO₂ em ambos os reatores.*

Esta situação não é normal pois o expectável seria ocorrer uma evolução mais lenta de ocorrência do CH₄ e CO₂ e uma maior percentagem de O₂ pelo facto de nesta fase inicial ocorrer um ajustamento por ação de microrganismos na presença de oxigénio, sendo as terras de cobertura a principal fonte destes microrganismos, correspondendo à fase de Degradação Aeróbia.

- *O facto de não se verificar nesta fase inicial os resultados normais no biorreator piloto 1 e biorreator piloto 2, revela que, quer a fração resto quer os RU indiferenciados já se encontrariam com degradação prévia quando se depositaram nos biorreatores.*
- *As medições no biorreator piloto 1 com valores entre 0,2% a 0,8% de O₂ e, em média, com 26% de CH₄ e, 36% de CO₂ traduz já uma fase de transição após a fase aeróbia, em que a massa de resíduos iniciou uma fase de anaerobiose com reações de fermentação, começando uma segunda etapa de degradação, ou seja, a Fase de Hidrólise e Fermentação. As bactérias fermentativas hidrolisam a matéria orgânica sólida, registando-se um forte desenvolvimento de ácidos orgânicos, álcoois e dióxido de carbono.*

Já relativamente ao biorreator piloto 2 , as medições revelam valores de CH₄ e CO₂ em crescendo e, em média, com 2.0% de O₂. Encontram-se valores de CH₄ na ordem de 30% a 45% e, de CO₂ de 30 % a cerca de 40%.

- *Estes valores estão em linha com os valores que ocorrem num aterro atual com RU indiferenciados confinados.*

Observando agora os resultados das medições observadas no segundo período de dois meses na continuidade do período anterior, pode-se salientar que os biorreatores assumem já um comportamento diferente no que se refere à evolução dos valores que se obtiveram, ou seja:

- *O biorreator piloto 1, onde se confinou a fração resto que ainda contém matéria orgânica residual, nos meses de outubro e novembro verifica-se que os resultados obtidos estão estabilizados, estando em linha com os valores do período anterior das medições, ou seja, com presença nula de O₂ e valores semelhantes da ordem de 25% de CH₄ e 30% de CO₂.*

A situação observada revela a degradação continuada da matéria orgânica residual que existe na fração resto depositada no biorreator piloto 1.

- *De facto, perante os valores obtidos nas medições, estará a ocorrer a fase de Acidogénese (Segunda mês de Transição), ainda como componente da degradação aeróbia, correspondente à fase ácida da decomposição dos resíduos urbanos. A partir da metabolização dos ácidos orgânicos formados na etapa anterior, os microrganismos acetogénicos dão origem a ácidos acéticos e derivados, bem como a dióxido de carbono e hidrogénio, ainda que as concentrações de ambos os gases comecem a diminuir nesta fase ao mesmo tempo que se inicia a produção de metano.*

No biorreator piloto 2, as medições revelam valores de CH₄ e CO₂ em crescendo e, a presença nula do O₂. Encontram-se valores de CH₄ na ordem de 45% e 55% e, de CO₂, de 32 % e 40%.

- *Estes valores estão em conformidade com os valores que ocorrem numa aterro tradicional com RU indiferenciados, correspondendo à fase de Acetogénese ou, segundo vários autores Metanogénese instável, que antecede a fase de Metanogénese, onde predominam microrganismos anaeróbios, denominados de metanogénicos.*

Apesar do curto espaço de tempo para observação deste caso de estudo, verifica-se que no biorreator piloto 2 os RU indiferenciados depositados evoluíram rapidamente para condições de anaerobiose que se ajustam à relação que se processa entre o CH₄ e o CO₂ gerados, pois retirando medições episódicos, quando o CH₄ sobe o CO₂ acompanha.

Na figura seguinte pode visualizar-se a evolução da produção de metano nos dois biorreatores no período de acompanhamento, com evidência de valores episódicos de quebra da série evolutiva.

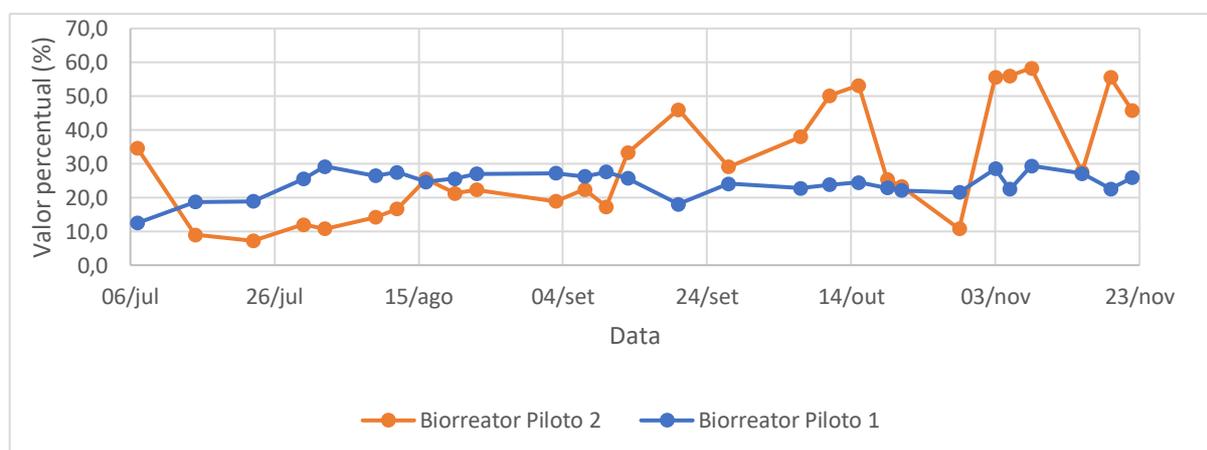


Figura 5. 1 - Produção de metano nos biorreatores piloto

Da análise efetuada retira-se o seguinte:

- *Devido à maior diferença do percentual de biorresíduos no biorreator piloto 2, observou-se uma maior evolução da produção de metano.*
- *Numa perspetiva de futuro e de aproveitamento energético, a produção de biogás nos aterros será bastante reduzida devido à influência da recolha seletiva de biorresíduos em comparação com o que é produzido em aterros em exploração atualmente.*
- *Pela tabela das medições efetuadas nos biorreatores e apresentadas anteriormente nas tabelas 4.1 e 4.2 retêm-se que, ao longo dos cinco meses de monitorização dos biorreatores, a percentagem de metano existente no biorreator piloto 1 atingiu um máximo de 29,4 % e no biorreator piloto 2 foi atingido um máximo de 58,3%.*

De seguida efetua-se uma abordagem às análises de lixiviados realizadas no biorreator piloto1, identificando-se o índice de biodegradabilidade da massa de resíduos confinada através da razão CBO/CQO. Não se conseguiu efetuar um maior número de análises pelo facto do sistema de bombagem inicialmente colocado nos biorreatores se ter avariado, situação que tem sempre o risco de ocorrer e que, neste curto período, não foi possível recuperar.

5.2 Produção de Lixiviados

Assinalam-se na tabela seguinte as datas de recolha bem como os resultados obtidos para os diferentes parâmetros principais. Importa assinalar que apenas foram efetuadas estas recolhas porque houve posteriormente dificuldades com o equipamento de bombagem que não foi possível recuperar até final do nosso período de intervenção.

Tabela 5. 2 - Análises efetuadas à produção de lixiviados do biorreator piloto 1 da Amarsul.

Data da colheita	pH	Azoto amoniacal	CBO	CQO	Cloreto	Condutividade	Azoto Total
	Escala de Sorensen	mg NH ₄ / L	mg O ₂ / L	mg O ₂ / L	mg CL ⁻ / L	μS/cm	mg N/L
28/jul	7,3	7 600	2 200	54 000	6 300	34 300	8 600
18/ago	8,1	4 400	4 200	36 000	6 600	33 200	6 800
01/set	8,0	150	2 900	43 000	5 900	33 700	7 600
29/set	5,0	6 000	2 500	38 000	6 200	34 900	13 000

Dos valores obtidos constata-se que o CQO tem o registo o máximo em julho de 54 000 mg O₂/L com uma CBO₅ de 2 200 mg O₂/L., observando-se uma redução significativa da CBO₅ após a amostra de agosto, com situação idêntica após setembro para o CQO. Esta evolução leva a equacionar a continuidade deste decréscimo com base no índice de biodegradabilidade.

- Índice de Biodegradabilidade (IB)

A avaliação da biodegradabilidade pode ser determinada de forma expedita através da razão CBO/CQO. Dependendo do valor obtido através da razão CBO/CQO será possível avaliar o índice de biodegradabilidade tendo em conta os três seguintes intervalos:

- Para um índice de biodegradabilidade elevado a razão CBO/CQO deverá ser superior a 0,5 onde a fração biodegradável é elevada.
- Para um índice de biodegradabilidade intermédio a razão CBO/CQO deverá encontrar-se entre 0,3 e 0,5 onde a fração inerte ou não biodegradável é elevada.
- Para um índice de biodegradabilidade baixo a razão CBO/CQO deverá ser menor que 0,3 onde a fração não biodegradável é muito elevada.

Na tabela seguinte procede-se à avaliação da biodegradabilidade.

Tabela 5. 3 - Avaliação do Índice de Biodegradabilidade do Biorreator Piloto 1.

Data da colheita	Índice de Biodegradabilidade
28/jul	0,04
18/ago	0,12
01/set	0,07
29/set	0,07

A situação no biorreator 1 situa-se em média em 0,07, apresentando assim condições de biodegradabilidade baixa, o que naturalmente se aceita pela reduzida presença de matéria biodegradável associada à *fração resto* confinada neste biorreator piloto.

5.3 Cenários simulados

Tendo presente a recolha seletiva obrigatória após 2023, analisam-se de seguida os resultados dos cenários elaborados, onde se simularam situações de geração de biogás perante diferentes situações de confinamento de RU, com e sem recolha seletiva de biorresíduos.

No cenário 2 analisou-se o comportamento da produção de biogás em aterro no caso de não serem tomadas medidas de recolha seletiva para promover o desvio dos biorresíduos do aterro e, assim, este fluxo de resíduos continuasse a ser depositado nos aterros. Realizou-se a simulação no período compreendido desde o início da exploração dos aterros da AMAR-SUL até 2019 e, no período de 2019 a 2035, ano em que apenas se podem depositar 10 % de RU e sem a presença de resíduos valorizáveis.

- Na simulação efetuada para o primeiro período, retirou-se que desde o início da exploração dos aterros até 2019 foram produzidos $1,34E+08$ m³ de biogás;
- Se não forem tomadas medidas relativamente à implementação da recolha seletiva dos biorresíduos, de acordo com o software utilizado, no período 2019-2035, produzem-se $2,99E+08$ m³ de biogás no conjunto dos dois aterros.

Em termos das emissões de gases de efeito de estufa assinala-se que a recolha seletiva dos biorresíduos é essencial, pois no caso de não se efetuar e se continue a processar a deposição de resíduos indiferenciados em aterro estima-se que até 2035 ;

- As emissões evitadas serão de 74 698 toneladas de CO₂ com impactos ambientais positivos com benefícios para as alterações climáticas, mas,
- As emissões associadas serão de 1 013 178 toneladas de CO₂ com impacto ambientais negativos pelos efeitos acrescidos nas alterações climáticas.

No caso do cenário 1, com a implementação progressiva da recolha seletiva de biorresíduos e a melhoria da eficiência de captação do biogás nos aterros da AMARSUL, para o mesmo período estima-se uma redução considerável das emissões associadas, estimando-se uma emissão bastante inferior para o valor de 655 426 ton CO₂.

Por outro lado, com a redução da deposição dos biorresíduos em aterro face à imposição do limite de 10% de deposição de RU em aterro a partir de 2030, a produção de biogás com qualidade reduz-se drasticamente, podendo ocorrer a impossibilidade da valorização energética nos motogeradores, podendo apenas recorrer-se à sua queima em *Gás Flare*.

Neste contexto, até 2035;

- Sem a recolha seletiva de biorresíduos e o seu desvio de aterro, estima-se que a energia total produzida seria de 421 289 MWh
- Com a implementação da recolha seletiva, estima-se que a produção total de energia será de 282 304 MWh.

Haverá assim uma redução direta dos proveitos para os SGRU pela impossibilidade de continuar a faturação da energia à REN caso ainda fosse possível esta subsidiação. Todavia com o cumprimento das metas que são exigidas até 2035, em que os novos aterros apresentarão características idênticas às do biorreator piloto 1 estudado, o recurso à valorização energética do biogás será mais dificultada uma vez que este será gerado em quantidades consideravelmente inferiores e a sua qualidade será inferior.

De facto, pelas concentrações medidas no piloto realizado, verificou-se que as concentrações de metano foram consideravelmente inferiores àquelas registadas atualmente nos aterros (50-60%). Os caudais baixos de biogás gerado e as percentagens baixas de metano implicam dificuldades na sua valorização, pois o biogás com baixas concentrações de metano (em média com limite inferior de 30%), os motogeradores poderão ter falhas de arranque e risco de deterioração de várias componentes pelo facto de o metano ter baixo PCI e eventuais variações bruscas nas suas características.

Neste sentido, os aterros de nova geração pós-2035 terão de privilegiar a combustão do biogás em Gás flare (queimador), a fim de evitar que o metano seja libertado diretamente para a atmosfera, garantindo a redução de 95% de emissões GEE pelo metano em termos do potencial de aquecimento global, com evidentes benefícios para as alterações climáticas.

5.4 Análise económica da valorização energética do biogás

Com o fim da subsidiação da venda da energia elétrica produzida a partir da valorização energética do biogás à REN, os SGRU passarão a vender o MWh de energia ao preço a que os distribuidores de energia o vendem ao consumidor. Como referência apresenta-se na tabela seguinte os valores de produção e proveitos do biogás gerado pelos aterros da AMARSUL nos últimos 3 anos.

Tabela 5. 4 - Energia injetada e receitas obtidas (últimos 3 anos) na AMARSUL (R&C, 2019)

	Quant MWh				Valor €			
	2017	2018	2019	VAR. %	2017	2018	2019	VAR. %
Biogás - Palmela	11.785	10.499	9.627	-8%	1.260.432	1.129.025	1.033.937	-8%
Biogás - Seixal	10.001	6.365	2.010	-68%	1.218.074	764.622	154.633	-80%
Biogás - TMB Seixal	6.882	7.524	10.499	40%	774.449	858.207	1.214.881	42%
TOTAL	28.667	24.388	22.136	-9%	3.252.955	2.751.853	2.403.451	-13%

Considerando agora as condições de confinamento e produção de biogás associadas às condições de cada um dos cenários prospetivos que se apresentaram, cenário1 e cenário 2, calcularam-se as receitas que seriam obtidas com base na energia do biogás produzida em cada uma das situações. Com base nestes valores calculados, determinaram-se as receitas que seriam obtidas com a produção de energia produzida em aterros. Para este efeito considerou-se o valor médio de 100€/MWh.

Tabela 5. 5 - Produção de Energia de acordo com os Cenários prospectivos analisados, C1 e C2.

Ano	Potencial de Energia injetada na REN. Cenário 1 (MWh)	Potencial de Energia injetada na REN. Cenário 2 (MWh)
2020	1,03E+04	1,03E+04
2021	1,13E+04	1,13E+04
2022	1,16E+04	1,16E+04
2023	1,17E+04	1,17E+04
2024	0,00E+00	1,20E+04
2025	2,74E+03	1,21E+04
2026	2,62E+03	1,23E+04
2027	2,62E+03	1,23E+04
2028	2,62E+03	1,24E+04
2029	2,74E+03	1,26E+04
2030	2,62E+03	1,27E+04
2031	2,74E+03	1,29E+04
2032	2,74E+03	1,30E+04
2033	2,85E+03	1,32E+04
2034	2,85E+03	1,33E+04
2035	0,00E+00	1,34E+04

Na tabela seguinte apresentam-se os valores das receitas calculadas nos cenários 1 e 2, bem como as respetivas perdas até 2035.

No caso do cenário 1, considerou-se o preço de venda do KWh à data. Para o caso do cenário 2, cenário em que tudo se mantém como atualmente, considerou-se que a subsídio da venda da energia produzida permaneceria como atualmente, sendo o MWh faturado pela AMARSUL ao preço médio de 100€.

Tabela 5. 6 - Comparação dos proveitos obtidos e do desvio até 2035, pela entrega na REN da energia produzida

Ano	Cenário 1 Proveitos	Cenário 2 Proveitos	Desvio de proveitos
2020	1 029 150 €	1 029 150 €	0 €
2021	1 134 583 €	1 134 583 €	0 €
2022	1 156 898 €	1 156 898 €	0 €
2023	1 174 516 €	1 174 516 €	0 €
2024	0 €	1 198 007 €	1 198 007 €
2025	273 662 €	1 209 752 €	936 089 €
2026	261 917 €	1 233 242 €	971 325 €
2027	261 917 €	1 233 242 €	971 325 €
2028	261 917 €	1 244 987 €	983 070 €
2029	273 662 €	1 256 732 €	983 070 €
2030	261 917 €	1 268 477 €	1 006 560 €
2031	273 662 €	1 291 968 €	1 018 306 €

2032	273 662 €	1 303 713 €	1 030 051 €
2033	285 407 €	1 315 458 €	1 030 051 €
2034	285 407 €	1 327 203 €	1 041 796 €
2035	0 €	1 338 948 €	1 338 948 €
Total	7 208 280 €	19 716 877 €	12 508 598 €

No caso do cenário 1 a receita acumulada é de 7 208 280 de euros e, no cenário 2, uma receita acumulada no horizonte em estudo de 19 716 877 de euros. O desvio que verifica entre o cenário 1 e o cenário 2, ou seja, entre a situação com recolha seletiva de biorresíduos e, a eventual continuidade dos aterros tradicionais sem recolha seletiva de biorresíduos, traduzem uma perda de proveitos de 12 508 598 de euros.

Com esta quebra nas receitas, será previsível que a tarifa a praticar pelos SGRU sobre os resíduos entregues pelos municípios para tratamento nas instalações irá ser aumentada. No gráfico seguinte observa-se o desvio existente.

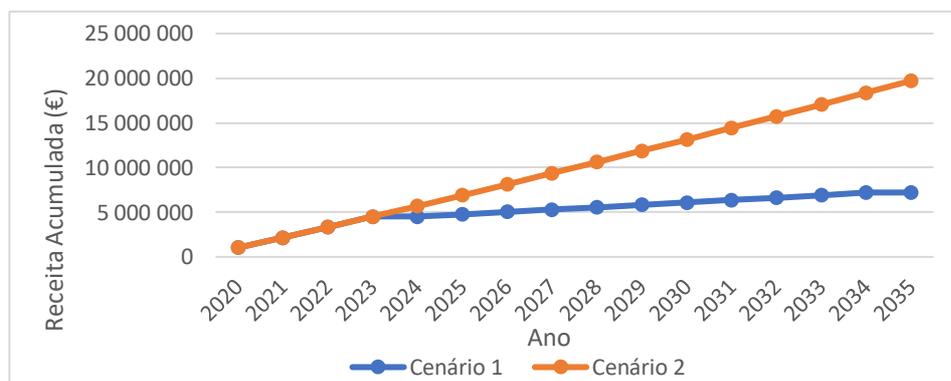


Figura 5. 2 - Receitas Acumuladas na venda da Energia Elétrica

5.5 Painéis Fotovoltaicos

Esta abordagem surge no sentido de se analisar a possibilidade de serem implementados painéis fotovoltaicos nos Ecoparque do Seixal e de Palmela, de forma a determinar se será possível compensar a redução da energia proveniente da valorização energética do biogás.

Para este efeito considerou-se a possibilidade de se fazer uso de painéis fotovoltaicos com 200 watt-pico (wp), cujas características foram obtidas no sítio *Portal Solar* onde se encontram disponíveis para aquisição. A unidade wp reflete a potência energética associada às células dos painéis. Esta é determinada em laboratório garantindo as condições ideais específicas, tal como se pode observar na tabela seguinte.

Tabela 5. 7 - Produção de Energia com o painel, nas condições mínimas e máximas.

Watt-Pico (wp)	200
Produção de energia (kWh/mês)	24 - 40
Produção de energia (Wh/dia)	800 - 1 300

A produção de energia a partir do painel fotovoltaico foi determinada tendo em conta a área dos telhados ocupada pelo edifício administrativo, pela oficina, pela CTA, pela portaria e por uma área da CVO a identificar. O painel considerado para este estudo possui as seguintes dimensões: 1,0 m x 1,2 m.

Após a determinação da área e, tendo em conta as limitações descritas anteriormente, através do *Google Earth* determinou-se a quantidade de painéis fotovoltaicos que seriam possíveis colocar na área associada às zonas identificadas atrás. Da avaliação efetuada considera-se que será possível implementar cerca de 12 460 painéis fotovoltaicos.

Tabela 5. 8 - Produção de Energia, em MWh, a partir dos painéis fotovoltaicos.

Mínimo	Máximo
3,64E+03	5,91E+03

Para se conseguir compensar a produção de energia perdida a partir desta tecnologia, a AMARSUL terá de disponibilizar uma área total de 1,5 hectares. Para o estudo pretendido com os dados retirados do sítio *Portal Solar*, realizou-se uma análise associada ao investimento, custos de manutenção e receitas.

O objetivo que se pretende atingir, tal como referido anteriormente, é compensar a redução da produção de energia em cerca de 33% por efeito do desvio de biorresíduos de aterro, e este estudo, através da colocação de painéis que permita neutralizar a perda de receita. No capítulo do Apêndice, na tabela A.17, pode-se observar a análise realizada.

5.6 Análise de custos

Com o objetivo de avaliar viabilidade da instalação de painéis na área considerada anteriormente foram avaliados os investimento iniciais bem como os custos de manutenção após a implementação do projeto dos painéis fotovoltaicos.

Assim foi determinado, em primeiro lugar, a estimativa do custo total da compra dos painéis (que se pode observar na tabela seguinte) e, de seguida, o custo de manutenção anual associado a cada painel.

Após terem sido obtidos todos os custos a considerar admitiu-se um contrato de venda da energia produzida a 100 €/MWh. No capítulo do Apêndice estão apresentados com detalhe os valores anuais associados à receita acumulada e o resultado da Análise Financeira.

Tabela 5. 9 - Preço unitário e custo total dos painéis. (Fonte: Portal Solar)

Preço unitário	Custo total dos painéis
189,42 €	2 360 266 €

O custo da manutenção por ano do Painel Fotovoltaico considerado apresenta-se na tabela seguinte.

Para a determinação teve-se em conta que, de acordo com o Portal Solar, o custo de manutenção por ano de 7 painéis está entre 65 e 85 €, tendo sido considerado um custo de manutenção médio de 75 €, que resulta num valor de 133 505€ por ano.

Tabela 5. 10 - Custo de manutenção por ano a 65 e 85€.

Custo de manutenção a 65€	Custo de manutenção a 85€
115 705 €	151 306 €

Ao fim dos 15 anos de projeto pode-se observar na tabela seguinte o resultado obtido.

Tabela 5. 11 - Resultado obtido após os 15 anos de projeto.

Mínimo	Máximo
1 094 850 €	4 505 909 €

Após esta análise procedeu-se à comparação da produção de energia com os painéis e a perda da produção de energia com base nos RU anuais de biorresíduos até 2035.

De seguida, comparou-se a produção de energia produzida pelo CENÁRIO C1, pois é este o cenário a considerar tendo em conta o cumprimento das metas do PERSU 2020+, com o projeto de implementação dos painéis fotovoltaicos.

Ora, utilizando os valores da tabela anterior do Cenário1, o projeto dos painéis considerando que a sua colocação ocorreu no ano de 2020 e, tendo em conta as condições mínimas e máximas dos painéis, a receita perdida no ano de 2035, resultante da contribuição dos painéis, consta na tabela seguinte.

Tabela 5. 12 -Resultado da Receita perdida com a contribuição dos Painéis, nas condições consideradas.

Condições Mínimas	Condições Máximas
- 11 413 748 €	- 8 002 689 €

6.1 Síntese conclusiva

O novo paradigma da gestão de resíduos que a recente legislação comunitária e nacional introduziram no sector dos resíduos vai obrigar aos SGRU a assumirem novos desafios e medidas para contribuírem para o cumprimento das novas metas a que Portugal está vinculado.

A implementação mais próxima a ser cumprida é a obrigatoriedade da recolha seletiva de biorresíduos a partir do final do ano de 2023. As exigentes metas de preparação para reutilização e reciclagem, a restrição de entrada de resíduos indiferenciados nas unidades de TMB a partir de 2027 passando a receber exclusivamente os biorresíduos recolhidos seletivamente bem como o limite de deposição de resíduos apenas para 10 % de resíduos urbanos sem condições de valorização a partir de 2030 implicam desafios muito ambiciosos.

De acordo com a estimativa realizada na evolução da taxa de reciclagem a nível nacional, foi possível concluir que de acordo com o método 2 as metas definidas pelo PERSU 2020+, eventualmente, serão difíceis de atingir no ano 2030, enquanto a determinação da taxa de reciclagem através do método 4 revelou que, eventualmente, também serão difíceis de atingir as metas em todos os anos.

Com base no estudo de caso sobre os dois biorreatores pode-se concluir que a implementação da recolha seletiva de biorresíduos no período 2019-2035, a nível dos aterros sanitários e também das emissões atmosféricas, determinados com base em cenários comparativos anteriormente descritos, após 2035, os resíduos a depositar nos novos aterros de apoio às centrais de valorização orgânica serão fundamentalmente *refugos e fração resto* daquelas unidades tal como simulado no biorreator piloto 1 deste estudo. Em termos da granulometria dos resíduos a depositar estes serão inferiores às dos resíduos que se depositam hoje em aterro, pelo que a sua degradação será mais rápida e estável que a verificada nos atuais aterros. Também com a implementação dos dois biorreatores na célula D da Amarsul S.A, foi possível concluir que, em termos de produção de biogás no período de 2020-2035 a mesma tem tendência para diminuir, a percentagem de CH₄ existente no biogás será menor e, consequentemente, a capacidade de aproveitamento deste biogás para a produção de energia será menor. A implementação da recolha seletiva de biorresíduos terá assim um forte efeito positivo nos aterros sanitários futuros, levando a uma redução acentuada na produção de biogás e também a redução das emissões de GEE que estão diretamente associadas ao biogás conforme se vê no cenário C1. Pelos resultados obtidos, estima-se que a implementação da recolha seletiva

de biorresíduos levará a uma redução da produção de biogás e na libertação de emissões de GEE de cerca de 30 a 40%.

Por outro lado, concluiu-se também que as emissões associadas à exploração dos aterros para a produção de biogás também irá diminuir, sendo esta um fator positivo na vertente laboral da Amarsul S.A, pois o seu impacto ambiental relacionado com a libertação de GEE para a atmosfera será menor. Sendo que, o biorreator 1 foi construído com o intuito de simular o comportamento de um aterro no ano de 2035, e o biorreator 2 serviu para simular o comportamento dos aterros atuais.

Também a redução acentuada da qualidade do biogás gerado que se observa através dos valores medidos no piloto, com concentrações baixas de CH₄, a sua valorização nos motogeradores fica comprometida. De facto, com a suspensão a partir de 2022 do regime especial de bonificação garantida da energia injetada na REN (com base em biogás captado), compromete-se a obtenção de receitas anuais pelos SGRU que, de uma forma direta estas receitas faziam reduzir a tarifa a praticar pelos SGRU aos municípios.

Nos aterros futuros de nova geração o metano do biogás, caso não realize combustão num centro electroprodutor, o metano gerado terá de ser queimado em Gás flare (queimador) para evitar que o metano seja libertado diretamente para a atmosfera, com o benefício da redução de 95% do efeito GEE do metano em termos do potencial de aquecimento global, conforme salientado no tema de alterações climáticas.

Com a estimativa realizada para o balanço futuro da produção de RU na área de intervenção da Amarsul S.A, é possível concluir que a CVO do Ecoparque do Seixal terá de ser ampliada eventualmente entre 2030 e 2035 onde terá um papel fundamental na valorização e tratamento de RU. Com efeito a CVO com uma capacidade instalada de cerca de 102.000 ton de tratamento dos biorresíduos recolhidos seletivamente, permite contribuir de forma significativa para a redução das emissões difusas dos GEE resultantes da produção de biogás nos aterros e, compensar parcialmente a diminuição da energia produzida até 2035. Com os dados fornecidos pela Amarsul S.A relativos à energia produzida pelo Aterro do Seixal, Aterro de Palmela e pela CVO, após uma comparação entre os mesmos, foi possível concluir que a CVO produziu quase a mesma quantidade de energia gerada no último ano, sendo ainda relevante referir que a produção de energia na CVO apresenta benefícios para o ambiente pois as emissões difusas de GEE serão menores.

Em suma, da pesquisa efetuada e dos resultados obtidos, pode-se concluir que a implementação da recolha seletiva de biorresíduos terá um impacto significativo nas condições nos aterros de nova geração relativamente à produção de biogás e às emissões de GEE. O resultado de simulações realizadas no *LandGEM* demonstraram uma redução superior a 35% na produção de biogás, cerca de 33% na redução das emissões evitadas e, cerca de 33% nos proveitos provenientes da injeção da energia produzida se não fosse retirada as condições de subsidiação do regime especial atualmente existente.

Todavia, pelo facto de se aumentar o volume de biorresíduos recolhidos seletivamente a partir de 2027 e cuja descarga será efetuada diretamente na CVO do Seixal, perante este afluxo acrescido estima-se que a sua capacidade de tratamento se esgote em 2033-2035. Torna-se assim necessária a sua ampliação pelo que tendo em conta os resultados obtidos na tabela 4.12, a Amarsul S.A poderá compensar a redução da produção de energia através do biogás dos aterros com base na ampliação da CVO. que poderá, no final do ano de 2035, produzir cerca de 40 000 MWh.

Numa perspetiva de contrariar o constrangimento associado à perda de receita esperada até 2035, abordou-se uma medida para se poder compensar essa perda de receita recorrendo à energia produzida por painéis fotovoltaicos.

Em contexto da Amarsul S.A, a proposta seria o avançar com um projeto de painéis fotovoltaicos. Após se ter analisada a dimensão do projeto a implementar na área identificada nas instalações da do Ecoparque do Seixal, avaliou-se o investimento, custos diretos e custos de manutenção. O resultado obtido para este projeto enquadra dois tipos de painéis fotovoltaicos a utilizar, concluindo-se que :

- Para o projeto com painéis de 200 wp, considerando a capacidade de produção mínima, ao fim de 15 anos obtém-se uma receita acumulada de 1 094 850 €, tendo em conta os desvios totais dos proveitos, resultou numa redução para -11 413 748 €
- Para o projeto com painéis de 200 wp, considerando a capacidade de produção máxima, ao fim de 15 anos obtém-se uma receita acumulada de 4 505 909 €, tendo em conta os desvios totais dos proveitos, resultou numa redução para -8 002 689 €

Caso não existissem assentamentos diferenciais durante a estabilização da massa de RU depositada, a zona mais adequada para um projeto desta tipologia seria a plataforma superior do aterro encerrada. No futuro é onde este tipo de projeto poderá ser desenvolvido ocupando com painéis fotovoltaicos a área ocupada pelos aterros, viabilizando assim a ocupação de uma área de grande dimensão utilizada para o confinamento de resíduos.

6.2 Limitações e desenvolvimentos futuros

O período limitado disponível para a realização deste estudo, as dificuldades com a disponibilidade de equipamento de bombagem e as regras dos planos de contingência da AMARSUL em contexto dos constrangimentos provocados pela covid-19 foram as principais limitações encontradas.

Em futuros desenvolvimentos, dada a relevância deste tema, será importante manter a comparação "in situ" de dois biorreatores, mas durante um período mais alargada e com disponibilidade de equipamentos ajustados.

BIBLIOGRAFIA

- Agência Portuguesa de Ambiente (APA), <https://apambiente.pt/>, consultado de março a setembro de 2021.
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Relatório do Estado do Ambiente (REA), 2019.
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Relatório Anual Resíduos Urbanos (RARU), 2019.
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Relatório Anual Resíduos Urbanos (RARU), 2020.
- AMARSUL, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A. <https://www.amarsul.pt/>, consultado de março a setembro de 2021.
- AMARSUL, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., Relatório e Contas (2016)
- AMARSUL, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., Relatório e Contas (2019)
- AMARSUL, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., Regulamento de Serviço de Gestão de Resíduos Urbanos (2018)
- Amini & Reinhart, 2011; Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential - Waste Manag -. Sep-Oct 2011;31(9-10):2020-6. doi: 10.1016/j.wasman.2011.05.010. Epub 2011 Jun 23
- Bogner et al., 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) -February 2008Waste Management & Research -26(1):11-32

- Borba, S. (2006), Análise De Modelos De Geração De Gases Em Aterros Sanitários: Estudo De Caso. Dissertação Submetida Ao Corpo Docente Da Coordenação Dos Programas De Pós-Graduação De Engenharia Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro Como Parte Dos Requisitos Necessários Para A Obtenção Do Grau De Mestre Em Ciências Em Engenharia Civil.
- Börjesson et al., 2007 Environmental systems analysis of biogas systems—Part II: The environmental impact of replacing various reference systems - May 2007-Biomass and Bioenergy 31(5):326-344
- Cabeças, A. (2014). Aterro Sanitário - Resíduos Sólidos Urbanos (Sebenta Académica). Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia
- Carrilho, N. (2012), Valorização de Bio-Resíduos Alimentares por Digestão Anaeróbia Descentralizada – Caso de Estudo: Campus da FCT/UNL. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energia e Bioenergia.
- Chanton et al., 2011). Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils. Waste Manage. 31 (5), 914–925.
- Chernicharo, C.A.L. (1997). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Reatores anaeróbios. 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1997. v. 5
- Christophersen et al., 2001). Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: Factors governing gas migration -January 2002 Waste Management & Research 19(6):579-94
- Costa, D. (2021), Recolha Seletiva de Biorresíduos – Balanço atual e prospectiva futura em aterro, nas emissões de gases de efeito de estufa e alterações climáticas. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária.
- Crespo, E. (2013), Digestão Anaeróbia de resíduos agroalimentares: Reutilização das frações líquidas e sólidas (state-of-art). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), Balanço Energético Nacional, 2021.

- Dores, R. (2020), Sistemas de proteção ambiental de um aterro sanitário para resíduos não perigosos. Projeto de Estações de Tratamento de Resíduos Sólidos.
- Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), www.ersar.pt/pt, consultado de abril a junho de 2021.
- Environment Global Facilities (EGF), <https://www.egf.pt/>, consultado de abril a julho
- Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>, consultado de abril a setembro de 2021.
- Fernandes, J. (2009), Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente E Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Fischer, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D. and Deck B. 1999. Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations. *Science* 283: 1712-1714.
- Forster et al., 2007, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing - October 2007 Piers Forster -University of Leeds
- Huber-Humer et al., 2011 - Special issue on landfill gas emission and mitigation; March 2011 *Waste Management* 31(5):821-2
- Instituto Nacional de Estatística (INE), Estatística dos Resíduos (2014).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), <https://www.ipcc.ch/>, consultado de junho a agosto
- Krause et al, (2020). Impact of Food Waste Diversion on Landfill Gas and Leachate from Simulated Landfills.
- Levis & Barlaz, 2011; - What is the most environmentally beneficial way to treat commercial food waste? *Environmental Science, Medicine, Environmental science & technology*, 2011
- Levy, J.Q., Cabeças, A., "Resíduos Sólidos Urbanos - princípios e processos", edição AEPISA, ISBN 9899505900, Lisboa, abril 2006.
- Martinho, M.G.M.; Gonçalves, M.G.P.; Silveira, A.I.E. (2011). *Gestão Integrada de Resíduos*. Universidade Aberta.
- Máximo, A. (2013). Potencial de Recuperação do vidro contido no rejeitado pesado do TMB. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa.

- Mendes, C. (2014), Métodos inovadores para a bio-secagem do CDR produzido na linha de processo da unidade de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) – Caso de estudo na VALNOR SA. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Miller et al., 2013; Critical Research Needs for Successful Food Systems. <https://foodsystemsjournal.org>; University of Wisconsin
- MWM, Energy Efficiency. Environment. <https://www.mwm.net/>, consultado em abril de 2021.
- O'Brian, 2016 - The Landfill Impacts of Food Waste Diversion Programs.
- Organização das Nações Unidas (ONU), Alterações Climáticas, 2021
- P. M. Czepiel, B. Mosher, R. C. Harriss, J. H. Shorter, J. B. McManus, C. E. Kolb, E. Allwine, B. K. Lamb (1996) Landfill methane emissions measured by enclosure and atmospheric tracer methods, Volume 101, Issue D11.
- Piedade M. e Aguiar P. (2010), Opções de Gestão de Resíduos Urbanos. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos.
- PorDATA, Base de Dados Portugal Contemporâneo, 2021.
- Portal Solar, <https://www.portalsolar.com.br/>, consultado no mês de outubro.
- Querido, D. (2015), Estudo da alteração das características das águas de lavagem dos plásticos recuperados no Tratamento Mecânico – Caso de estudo da VALNOR. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária.
- Reis, L. (2016), Valorização Energética de Resíduos – Caso de Estudo: Pneus Usados e Resíduos Têxteis Industriais. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial. Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior.
- Rynk, R. (1992). On-farm composting handbook. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension.
- Silva, F. (2014). Avaliação do Potencial da Produção de Energia Elétrica Através de Resíduos Urbanos em Portugal Continental Horizonte Temporal 2014-2020. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, pela Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, J. (2016), Papel do Tratamento Mecânico e Biológico na Gestão de Resíduos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Tchobanoglous, G.; Thessen, H.; Vigil, S. A. Composição e características, Geração, movimentação e controlo dos gases Vertedoro. Gestão Abrangente de Resíduos Sólidos, v. 1, 1994.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), <https://www.epa.gov/>, consultado de maio a agosto de 2021.
- Yodi et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1456 012001.

APÊNDICE

A.1 Tabelas

Tabela A. 1 - Características do biogás produzido no biorreator implementado na Algar S.A.

Data	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
10/mar	17,9	19,4	7,3
17/mar	1,5	4,1	17,7
24/mar	10	11,7	16,9
01/abr	28,2	28,5	0,5
09/abr	28,7	28,3	0,3
15/abr	27,6	27,8	0,2
30/abr	22,4	23,1	3,3
04/jun	28,5	26,9	-
08/jun	39,7	21,9	0,5
15/jun	39,5	27,8	-
18/jun	36,2	26,8	0,2
22/jun	30,8	22,3	0,3

Tabela A. 2 - Caracterização física, média, a nível nacional, considerado para o subcapítulo 3.2 e 5.1.

Biorresíduos	38,64%
Têxteis	3,59%
Compósitos	3,07%
Perigosos	0,07%
Plástico	11,45%
Vidro	7,05%
Metais	1,75%
Outros Resíduos	2,31%
Papel/cartão	9,91%
Volumosos	4,17%
Resíduos verdes	1,42%
Finos (<20 mm)	7,65%
Têxteis sanitários	7,84%
Madeira	0,89%

Tabela A. 3 - Biogás gerado determinados no Cenário 1 e Cenário 2.

Ano	Cenário 1				Cenário 2			
	RU em Aterro	Biogás gerado (m ³ /ano)	CH ₄ (m ³ /ano)	CO ₂ (m ³ /ano)	RU em Aterro	Biogás gerado (m ³ /ano)	CH ₄ (m ³ /ano)	CO ₂ (m ³ /ano)
1998	208 181	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	208 181	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1999	175 109	8,72E+05	4,18E+05	4,53E+05	175 109	8,72E+05	4,18E+05	4,53E+05
2000	154 256	1,56E+06	7,50E+05	8,12E+05	154 256	1,56E+06	7,50E+05	8,12E+05
2001	168 444	2,13E+06	1,02E+06	1,11E+06	168 444	2,13E+06	1,02E+06	1,11E+06
2002	229 958	2,73E+06	1,31E+06	1,42E+06	229 958	2,73E+06	1,31E+06	1,42E+06
2003	216 643	3,56E+06	1,71E+06	1,85E+06	216 643	3,56E+06	1,71E+06	1,85E+06
2004	200 204	4,30E+06	2,06E+06	2,23E+06	200 204	4,30E+06	2,06E+06	2,23E+06
2005	198 608	4,92E+06	2,36E+06	2,56E+06	198 608	4,92E+06	2,36E+06	2,56E+06
2006	215 400	5,52E+06	2,65E+06	2,87E+06	215 400	5,52E+06	2,65E+06	2,87E+06
2007	207 238	6,15E+06	2,95E+06	3,20E+06	207 238	6,15E+06	2,95E+06	3,20E+06
2008	228 697	6,72E+06	3,22E+06	3,49E+06	228 697	6,72E+06	3,22E+06	3,49E+06
2009	207 643	7,35E+06	3,53E+06	3,82E+06	207 643	7,35E+06	3,53E+06	3,82E+06
2010	183 832	7,86E+06	3,77E+06	4,09E+06	183 832	7,86E+06	3,77E+06	4,09E+06
2011	190 912	8,24E+06	3,96E+06	4,29E+06	190 912	8,24E+06	3,96E+06	4,29E+06
2012	190 624	8,64E+06	4,15E+06	4,49E+06	190 624	8,64E+06	4,15E+06	4,49E+06
2013	145 464	9,02E+06	4,33E+06	4,69E+06	145 464	9,02E+06	4,33E+06	4,69E+06
2014	148 067	9,19E+06	4,41E+06	4,78E+06	148 067	9,19E+06	4,41E+06	4,78E+06
2015	122 825	9,36E+06	4,49E+06	4,87E+06	122 825	9,36E+06	4,49E+06	4,87E+06
2016	108 451	1,27E+07	4,52E+06	4,90E+06	108 451	1,27E+07	4,52E+06	4,52E+06
2017	130 595	9,42E+06	4,52E+06	4,90E+06	130 595	9,42E+06	4,52E+06	4,52E+06
2018	138 500	7,35E+06	4,56E+06	4,90E+06	138 500	7,35E+06	4,56E+06	4,56E+06
2019	145 738	6,76E+06	4,62E+06	4,90E+06	145 738	6,76E+06	4,62E+06	4,62E+06
2020	188 099	5,21E+06	4,68E+06	4,89E+06	188 317	5,21E+06	4,68E+06	4,68E+06
2021	162 489	9,66E+06	4,83E+06	4,89E+06	163 038	9,66E+06	4,83E+06	4,83E+06
2022	158 951	9,85E+06	4,92E+06	4,87E+06	160 050	9,85E+06	4,93E+06	4,93E+06
2023	155 356	1,00E+07	3,65E+06	6,13E+06	157 004	1,00E+07	5,01E+06	5,01E+06
2024	156 443	1,52E+06	5,34E+05	6,14E+06	158 641	1,02E+07	5,08E+06	5,08E+06
2025	143 149	2,33E+06	7,80E+05	5,86E+06	166 038	1,03E+07	5,15E+06	5,15E+06
2026	139 484	2,23E+06	9,91E+05	7,77E+06	147 236	1,05E+07	5,23E+06	5,23E+06
2027	121 207	2,23E+06	2,03E+05	1,59E+06	136 711	1,05E+07	5,27E+06	5,27E+06
2028	117 289	2,23E+06	3,70E+05	2,90E+06	152 997	1,06E+07	5,29E+06	5,29E+06
2029	113 302	2,33E+06	5,72E+05	4,29E+06	149 009	1,07E+07	5,34E+06	5,34E+06
2030	109 175	2,23E+06	6,62E+05	5,20E+06	180 590	1,08E+07	5,38E+06	5,38E+06
2031	100 738	2,33E+06	3,45E+04	2,59E+05	172 725	1,10E+07	5,48E+06	5,48E+06
2032	97 137	2,33E+06	6,45E+04	4,86E+05	169 123	1,11E+07	5,56E+06	5,56E+06
2033	83 027	2,43E+06	1,01E+05	7,24E+05	155 013	1,12E+07	5,63E+06	5,63E+06
2034	79 005	2,43E+06	1,24E+05	8,96E+05	150 991	1,13E+07	5,66E+06	5,66E+06
2035	53 347	3,48E+05	1,22E+05	6,12E+06	198 359	1,14E+07	5,69E+06	5,69E+06
Total	5 893 588	1,94E+08	-	-	6 521 232	2,99E+08	-	-

Tabela A. 4 - Comparação da Energia Potencial produzida e injetada na REN entre o Cenário 1 e 2.

Ano	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
	Biogás Gerado (m ³ /ano)		Biogás Captado (m ³ /hora)		Energia Potencial Biogás Captado (kWh/ano)		Potencial Energia injetada na REN (kWh/ano)	
1998	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0
1999	8,72E+05	8,72E+05	7,96E+01	7,96E+01	0	0	0	0
2000	1,56E+06	1,56E+06	1,43E+02	1,43E+02	0	0	0	0
2001	2,13E+06	2,13E+06	1,95E+02	1,95E+02	2 781 923	2 781 923	2 503 731	2 503 731
2002	2,73E+06	2,73E+06	2,50E+02	2,50E+02	3 566 519	3 566 519	3 209 867	3 209 867
2003	3,56E+06	3,56E+06	3,25E+02	3,25E+02	4 648 923	4 648 923	4 184 031	4 184 031
2004	4,30E+06	4,30E+06	3,92E+02	3,92E+02	5 605 793	5 605 793	5 045 213	5 045 213
2005	4,92E+06	4,92E+06	4,50E+02	4,50E+02	6 426 182	6 426 182	5 783 564	5 783 564
2006	5,52E+06	5,52E+06	5,04E+02	5,04E+02	7 197 839	7 197 839	6 478 055	6 478 055
2007	6,15E+06	6,15E+06	5,61E+02	5,61E+02	8 023 606	8 023 606	7 221 246	7 221 246
2008	6,72E+06	6,72E+06	6,13E+02	6,13E+02	8 764 509	8 764 509	7 888 058	7 888 058
2009	7,35E+06	7,35E+06	6,71E+02	6,71E+02	9 586 512	9 586 512	8 627 861	8 627 861
2010	7,86E+06	7,86E+06	7,18E+02	7,18E+02	10 253 402	10 253 402	9 228 061	9 228 061
2011	8,24E+06	8,24E+06	7,53E+02	7,53E+02	10 757 681	10 757 681	9 681 913	9 681 913
2012	8,64E+06	8,64E+06	7,89E+02	7,89E+02	11 276 043	11 276 043	10 148 439	10 148 439
2013	9,02E+06	9,02E+06	8,23E+02	8,23E+02	11 767 552	11 767 552	10 590 797	10 590 797
2014	9,19E+06	9,19E+06	8,39E+02	8,39E+02	11 988 364	11 988 364	10 789 528	10 789 528
2015	9,36E+06	9,36E+06	8,55E+02	8,55E+02	12 212 628	12 212 628	10 991 365	10 991 365
2016	1,27E+07	1,27E+07	1,16E+03	1,16E+03	27 068 000	27 068 000	24 361 200	24 361 200
2017	9,42E+06	9,42E+06	8,60E+02	8,60E+02	21 786 000	21 786 000	19 607 400	19 607 400
2018	7,35E+06	7,35E+06	6,71E+02	6,71E+02	16 864 000	16 864 000	15 177 600	15 177 600
2019	6,76E+06	6,76E+06	6,17E+02	6,17E+02	11 637 000	11 637 000	10 473 300	10 473 300
2020	5,21E+06	5,21E+06	4,76E+02	4,76E+02	11 435 000	11 435 000	10 291 500	10 291 500
2021	9,66E+06	9,66E+06	8,82E+02	8,82E+02	12 606 474	12 606 474	11 345 826	11 345 826
2022	9,85E+06	9,85E+06	9,00E+02	9,00E+02	12 854 427	12 854 427	11 568 985	11 568 985
2023	1,00E+07	1,00E+07	9,13E+02	9,13E+02	13 050 180	13 050 180	11 745 162	11 745 162
2024	1,52E+06	1,02E+07	1,39E+02	9,32E+02	0	13 311 184	0	11 980 065
2025	2,33E+06	1,03E+07	2,13E+02	9,41E+02	3 040 692	13 441 685	2 736 623	12 097 517
2026	2,23E+06	1,05E+07	2,04E+02	9,59E+02	2 910 190	13 702 689	2 619 171	12 332 420
2027	2,23E+06	1,05E+07	2,04E+02	9,59E+02	2 910 190	13 702 689	2 619 171	12 332 420
2028	2,23E+06	1,06E+07	2,04E+02	9,68E+02	2 910 190	13 833 191	2 619 171	12 449 872
2029	2,33E+06	1,07E+07	2,13E+02	9,77E+02	3 040 692	13 963 693	2 736 623	12 567 323
2030	2,23E+06	1,08E+07	2,04E+02	9,86E+02	2 910 190	14 094 194	2 619 171	12 684 775
2031	2,33E+06	1,10E+07	2,13E+02	1,00E+03	3 040 692	14 355 198	2 736 623	12 919 678
2032	2,33E+06	1,11E+07	2,13E+02	1,01E+03	3 040 692	14 485 700	2 736 623	13 037 130
2033	2,43E+06	1,12E+07	2,22E+02	1,02E+03	3 171 194	14 616 202	2 854 074	13 154 581
2034	2,43E+06	1,13E+07	2,22E+02	1,03E+03	3 171 194	14 746 703	2 854 074	13 272 033
2035	3,48E+05	1,14E+07	3,18E+01	1,04E+03	0	14 877 205	0	13 389 485
Total	1,94E+08	2,99E+08	17 716	27 271	282 304 473	421 288 890	254 074 025	379 160 001

Tabela A. 5 - Biogás captado e emitido para o Cenário 1, em m³/ano.

Ano	Biogás gerado	Biogás captado	Biogás emitido	CH ₄ emitido	CO ₂ emitido	CH ₄ captado	CO ₂ captado
1998	0	0	0	0	0	0	0
1999	871 536	697 229	174 307	104 584	69 723	418 337	278 892
2000	1 562 114	1 249 691	312 423	187 454	124 969	749 815	499 876
2001	2 131 712	1 705 370	426 342	255 805	170 537	1 023 222	682 148
2002	2 732 927	2 186 341	546 585	327 951	218 634	1 311 805	874 537
2003	3 562 344	2 849 875	712 469	427 481	284 988	1 709 925	1 139 950
2004	4 295 567	3 436 454	859 113	515 468	343 645	2 061 872	1 374 582
2005	4 924 209	3 939 368	984 842	590 905	393 937	2 363 621	1 575 747
2006	5 515 509	4 412 407	1 103 102	661 861	441 241	2 647 444	1 764 963
2007	6 148 272	4 918 618	1 229 654	737 793	491 862	2 951 171	1 967 447
2008	6 716 006	5 372 805	1 343 201	805 921	537 281	3 223 683	2 149 122
2009	7 345 885	5 876 708	1 469 177	881 506	587 671	3 526 025	2 350 683
2010	7 856 904	6 285 523	1 571 381	942 829	628 552	3 771 314	2 514 209
2011	8 243 320	6 594 656	1 648 664	989 198	659 466	3 956 794	2 637 862
2012	8 640 527	6 912 421	1 728 105	1 036 863	691 242	4 147 453	2 764 969
2013	9 017 157	7 213 726	1 803 431	1 082 059	721 373	4 328 235	2 885 490
2014	9 186 359	7 349 087	1 837 272	1 102 363	734 909	4 409 452	2 939 635
2015	9 358 206	7 486 565	1 871 641	1 122 985	748 656	4 491 939	2 994 626
2016	12 660 000	10 128 000	2 532 000	1 215 360	486 144	4 861 440	4 051 200
2017	9 420 000	7 536 000	1 884 000	904 320	753 600	3 617 280	3 014 400
2018	7 350 000	5 880 000	1 470 000	705 600	588 000	2 822 400	2 352 000
2019	6 760 000	5 408 000	1 352 000	648 960	540 800	2 595 840	2 163 200
2020	5 210 000	4 168 000	1 042 000	500 160	416 800	2 000 640	1 667 200
2021	9 660 000	7 728 000	1 932 000	927 360	772 800	3 709 440	3 091 200
2022	9 850 000	7 880 000	1 970 000	945 600	788 000	3 782 400	3 152 000
2023	10 000 000	8 000 000	2 000 000	700 000	600 000	2 800 000	2 400 000
2024	1 520 000	1 216 000	304 000	106 400	91 200	425 600	364 800
2025	2 330 000	1 864 000	466 000	163 100	139 800	652 400	559 200
2026	2 230 000	1 784 000	446 000	156 100	133 800	624 400	535 200
2027	2 230 000	1 784 000	446 000	156 100	133 800	624 400	535 200
2028	2 230 000	1 784 000	446 000	156 100	133 800	624 400	535 200
2029	2 330 000	1 864 000	466 000	163 100	139 800	652 400	559 200
2030	2 230 000	1 784 000	446 000	156 100	133 800	624 400	535 200
2031	2 330 000	1 864 000	466 000	163 100	139 800	652 400	559 200
2032	2 330 000	1 864 000	466 000	163 100	139 800	652 400	559 200
2033	2 430 000	1 944 000	486 000	170 100	145 800	680 400	583 200
2034	2 430 000	1 944 000	486 000	170 100	145 800	680 400	583 200
2035	348 000	278 400	69 600	24 360	20 880	97 440	83 520
Total	193 986 557	155 189 245	38 797 311	20 068 147	14 292 909	80 272 587	59 278 258

Tabela A. 6 - Biogás captado e emitido considerado para o Cenário 2, em m³/ano.

Ano	Biogás gerado	Biogás captado	Biogás emitido	CH ₄ emitido	CO ₂ emitido	CH ₄ captado	CO ₂ captado
1998	0	0	0	0	0	0	0
1999	871 536	697 229	174 307	104 584	69 723	418 337	278 892
2000	1 562 114	1 249 691	312 423	187 454	124 969	749 815	499 876
2001	2 131 712	1 705 370	426 342	255 805	170 537	1 023 222	682 148
2002	2 732 927	2 186 341	546 585	327 951	218 634	1 311 805	874 537
2003	3 562 344	2 849 875	712 469	427 481	284 988	1 709 925	1 139 950
2004	4 295 567	3 436 454	859 113	515 468	343 645	2 061 872	1 374 582
2005	4 924 209	3 939 368	984 842	590 905	393 937	2 363 621	1 575 747
2006	5 515 509	4 412 407	1 103 102	661 861	441 241	2 647 444	1 764 963
2007	6 148 272	4 918 618	1 229 654	737 793	491 862	2 951 171	1 967 447
2008	6 716 006	5 372 805	1 343 201	805 921	537 281	3 223 683	2 149 122
2009	7 345 885	5 876 708	1 469 177	881 506	587 671	3 526 025	2 350 683
2010	7 856 904	6 285 523	1 571 381	942 829	628 552	3 771 314	2 514 209
2011	8 243 320	6 594 656	1 648 664	989 198	659 466	3 956 794	2 637 862
2012	8 640 527	6 912 421	1 728 105	1 036 863	691 242	4 147 453	2 764 969
2013	9 017 157	7 213 726	1 803 431	1 082 059	721 373	4 328 235	2 885 490
2014	9 186 359	7 349 087	1 837 272	1 102 363	734 909	4 409 452	2 939 635
2015	9 358 206	7 486 565	1 871 641	1 122 985	748 656	4 491 939	2 994 626
2016	12 660 000	10 128 000	2 532 000	1 215 360	886 200	4 861 440	3 544 800
2017	9 420 000	7 536 000	1 884 000	904 320	659 400	3 617 280	2 637 600
2018	7 350 000	5 880 000	1 470 000	705 600	514 500	2 822 400	2 058 000
2019	6 760 000	5 408 000	1 352 000	648 960	473 200	2 595 840	1 892 800
2020	5 210 000	4 168 000	1 042 000	500 160	364 700	2 000 640	1 458 800
2021	9 660 000	7 728 000	1 932 000	927 360	676 200	3 709 440	2 704 800
2022	9 850 000	7 880 000	1 970 000	945 600	689 500	3 782 400	2 758 000
2023	10 000 000	8 000 000	2 000 000	960 000	700 000	3 840 000	2 800 000
2024	10 200 000	8 160 000	2 040 000	979 200	714 000	3 916 800	2 856 000
2025	10 300 000	8 240 000	2 060 000	988 800	721 000	3 955 200	2 884 000
2026	10 500 000	8 400 000	2 100 000	1 008 000	735 000	4 032 000	2 940 000
2027	10 500 000	8 400 000	2 100 000	1 008 000	735 000	4 032 000	2 940 000
2028	10 600 000	8 480 000	2 120 000	1 017 600	742 000	4 070 400	2 968 000
2029	10 700 000	8 560 000	2 140 000	1 027 200	749 000	4 108 800	2 996 000
2030	10 800 000	8 640 000	2 160 000	1 036 800	756 000	4 147 200	3 024 000
2031	11 000 000	8 800 000	2 200 000	1 056 000	770 000	4 224 000	3 080 000
2032	11 100 000	8 880 000	2 220 000	1 065 600	777 000	4 262 400	3 108 000
2033	11 200 000	8 960 000	2 240 000	1 075 200	784 000	4 300 800	3 136 000
2034	11 300 000	9 040 000	2 260 000	1 084 800	791 000	4 339 200	3 164 000
2035	11 400 000	9 120 000	2 280 000	1 094 400	798 000	4 377 600	3 192 000
Total	298 618 557	238 894 845	59 723 711	31 021 987	21 884 385	124 087 947	87 537 538

Tabela A. 7 - Densidade considerada a utilizar para os Cenários 1 e 2.

Densidade	CH ₄	CO ₂
kg/m ³	0,717	1,98

Tabela A. 8 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 1.

Ano	Emissões Associadas (ton/ano)	Emissões Evitadas pela injeção na REN (ton/ano)
1998	0	0
1999	1 708	0
2000	3 061	0
2001	4 177	493
2002	5 355	632
2003	6 981	824
2004	8 418	994
2005	9 649	1 139
2006	10 808	1 276
2007	12 048	1 423
2008	13 161	1 554
2009	14 395	1 700
2010	15 396	1 818
2011	16 154	1 907
2012	16 932	1 999
2013	17 670	2 086
2014	18 002	2 126
2015	18 338	2 165
2016	19 847	4 799
2017	14 768	3 863
2018	11 522	2 990
2019	10 598	2 063
2020	8 168	2 028
2021	15 144	2 235
2022	15 442	2 279
2023	11 431	2 314
2024	1 738	0
2025	2 663	539
2026	2 549	516
2027	2 549	516
2028	2 549	516
2029	2 663	539
2030	2 549	516
2031	2 663	539
2032	2 663	539
2033	2 778	562
2034	2 778	562
2035	398	0
Total	655 426	50 055

Tabela A. 9 - Emissões Associadas e Evitadas para o Cenário 2.

Ano	Emissões Associadas (ton/ano)	Emissões Evitadas pela injeção na REN (ton/ano)
1998	0	0
1999	1 708	0
2000	3 061	0
2001	4 177	493
2002	5 355	632
2003	6 981	824
2004	8 418	994
2005	9 649	1 139
2006	10 808	1 276
2007	12 048	1 423
2008	13 161	1 554
2009	14 395	1 700
2010	15 396	1 818
2011	16 154	1 907
2012	16 932	1 999
2013	17 670	2 086
2014	18 002	2 126
2015	18 338	2 165
2016	19 847	4 799
2017	14 768	3 863
2018	11 522	2 990
2019	10 598	2 063
2020	8 168	2 028
2021	15 144	2 235
2022	15 442	2 279
2023	15 677	2 314
2024	15 990	2 360
2025	16 147	2 383
2026	16 461	2 430
2027	16 461	2 430
2028	16 617	2 453
2029	16 774	2 476
2030	16 931	2 499
2031	17 244	2 545
2032	17 401	2 568
2033	17 558	2 592
2034	17 715	2 615
2035	17 872	2 638
Total	1 013 178	74 698

Tabela A. 10 - Cálculos efetuados para o Cenário simulado no subcapítulo 5.2.

Sem RS de Biorresíduos				Com RS de Biorresíduos		
Ano	Resíduos gerados (ton/ano)	Resíduos depositados (ton/ano)	Biogás gerado (m ³ /ano)	Resíduos gerados (ton/ano)	Resíduos depositados (ton/ano)	Biogás gerado (m ³ /ano)
2020	5 041 848	2 057 074	0,00E+00	5 041 848	2 057 074	0,00E+00
2021	5 077 141	1 776 999	1,64E+07	5 077 141	1 776 999	6,24E+06
2022	5 112 681	1 738 311	2,98E+07	5 112 681	1 738 311	1,13E+07
2023	5 148 469	1 698 995	4,22E+07	5 148 469	1 698 995	1,60E+07
2024	5 184 509	1 710 888	5,37E+07	5 184 509	1 710 888	2,04E+07
2025	5 225 985	1 567 795	6,47E+07	5 225 985	1 567 795	2,46E+07
2026	5 267 793	1 527 660	7,41E+07	5 267 793	1 527 660	2,81E+07
2027	5 309 935	1 327 484	8,26E+07	5 309 935	1 327 484	3,14E+07
2028	5 352 414	1 284 579	8,92E+07	5 352 414	1 284 579	3,39E+07
2029	5 395 234	1 240 904	9,51E+07	5 395 234	1 240 904	3,61E+07
2030	5 391 309	1 186 088	1,00E+08	5 391 309	1 186 088	3,81E+07
2031	5 472 179	1 094 436	1,05E+08	5 472 179	1 094 436	3,99E+07
2032	5 554 261	1 055 310	1,09E+08	5 554 261	1 055 310	4,12E+07
2033	5 637 575	902 012	1,12E+08	5 637 575	902 012	4,24E+07
2034	5 722 139	858 321	1,13E+08	5 722 139	858 321	4,31E+07
2035	5 795 658	579 566	1,15E+08	5 795 658	579 566	4,36E+07
2036	-	-	1,14E+08	-	-	4,32E+07
2037	-	-	1,08E+08	-	-	4,11E+07
2038	-	-	1,03E+08	-	-	3,91E+07
2039	-	-	9,79E+07	-	-	3,72E+07
2040	-	-	9,31E+07	-	-	3,54E+07
2041	-	-	8,86E+07	-	-	3,37E+07
2042	-	-	8,43E+07	-	-	3,20E+07
2043	-	-	8,01E+07	-	-	3,05E+07
2044	-	-	7,62E+07	-	-	2,90E+07
2045	-	-	7,25E+07	-	-	2,76E+07
2046	-	-	6,90E+07	-	-	2,62E+07
2047	-	-	6,56E+07	-	-	2,49E+07
2048	-	-	6,24E+07	-	-	2,37E+07
2049	-	-	5,94E+07	-	-	2,26E+07
2050	-	-	5,65E+07	-	-	2,15E+07
Total	85 689 128	21 606 421	2,43E+09	85 689 128	21 606 421	9,24E+08

Tabela A. 11 - Dimensão do Painel Fotovoltaico.

Potência	200 watt-pico
Largura	1,0
Comprimento	1,2
Área (m ²)	1,2

Tabela A. 12 - Característica do Painel Fotovoltaico considerado.

Watt-Pico (wp)	200
Produção de energia (kWh/mês)	24 - 40
Produção de energia (Wh/dia)	800 - 1 300

Tabela A. 13 - Comparação da produção de energia, estimada, a partir do biogás produzidos nos aterros com a produção de energia através de painéis fotovoltaicos.

Ano	Energia total produzida pelos aterros de Palmela e Seixal (MWh)		
1998	0,00E+00	Potência (200 wp)	
1999	0,00E+00	Energia Produzida (MWh)	
2000	0,00E+00	Mínimo	Máximo
2001	0,00E+00	3,64E+03	5,91E+03
2002	0,00E+00		
2003	0,00E+00		
2004	2,64E+03		
2005	1,12E+04		
2006	1,09E+04		
2007	1,13E+04		
2008	1,24E+04		
2009	1,02E+04		
2010	8,47E+03		
2011	2,12E+04		
2012	2,50E+04		
2013	2,53E+04		
2014	2,20E+04		
2015	2,58E+04		
2016	2,71E+04		
2017	2,17E+04		
2018	1,11E+04		
2019	1,44E+04		
2020	1,14E+04		

Tabela A. 14 - Investimentos e custos de manutenção.

Investimento Inicial	Custo de manutenção por ano
2 360 266 €	133 505 €

Tabela A. 15 - Geração de Receitas, por ano, considerando o valor de venda de 100 €/MWh.

Mínima	Máxima
363 846 €	591 250 €

Tabela A. 16 - Receita Acumulada ao fim de 15 anos.

Ano	Mínima	Máxima
1	363 846 €	591 250 €
2	727 693 €	1 182 501 €
3	1 091 539 €	1 773 751 €
4	1 455 385 €	2 365 001 €
5	1 819 232 €	2 956 251 €
6	2 183 078 €	3 547 502 €
7	2 546 924 €	4 138 752 €
8	2 910 771 €	4 730 002 €
9	3 274 617 €	5 321 252 €
10	3 638 463 €	5 912 503 €
11	4 002 310 €	6 503 753 €
12	4 366 156 €	7 095 003 €
13	4 730 002 €	7 686 253 €
14	5 093 848 €	8 277 504 €
15	5 457 695 €	8 868 754 €

Tabela A. 17 - Lucro acumulado, mínimo, médio e máximo, da Análise Financeira.

Ano	Mínimo	Médio	Máximo
1	- 2 147 726 €	-2 016 223 €	- 1 920 322 €
2	- 1 935 185 €	-1 672 180 €	- 1 480 377 €
3	- 1 722 645 €	-1 328 137 €	- 1 040 433 €
4	- 1 510 105 €	-984 094 €	- 600 489 €
5	- 1 297 564 €	-640 051 €	- 160 545 €
6	- 1 085 024 €	-296 008 €	279 400 €
7	- 872 484 €	48 035 €	719 344 €
8	- 659 943 €	392 078 €	1 159 288 €
9	- 447 403 €	736 121 €	1 599 233 €
10	- 234 862 €	1 080 164 €	2 039 177 €
11	- 22 322 €	1 424 207 €	2 479 121 €
12	190 218 €	1 768 250 €	2 919 066 €
13	402 759 €	2 112 293 €	3 359 010 €
14	615 299 €	2 456 336 €	3 798 954 €
15	827 839 €	2 800 380 €	4 238 899 €
Total	-9 899 148 €	5 881 173 €	17 389 326 €

Tabela A. 18 - Coeficientes Técnicos considerados. Fonte: PERSU 2020.

Processo	Rejeitados e Refugos (%)	Recicláveis (%)
TMB	48	7
TM	93	7

A.2 Figuras

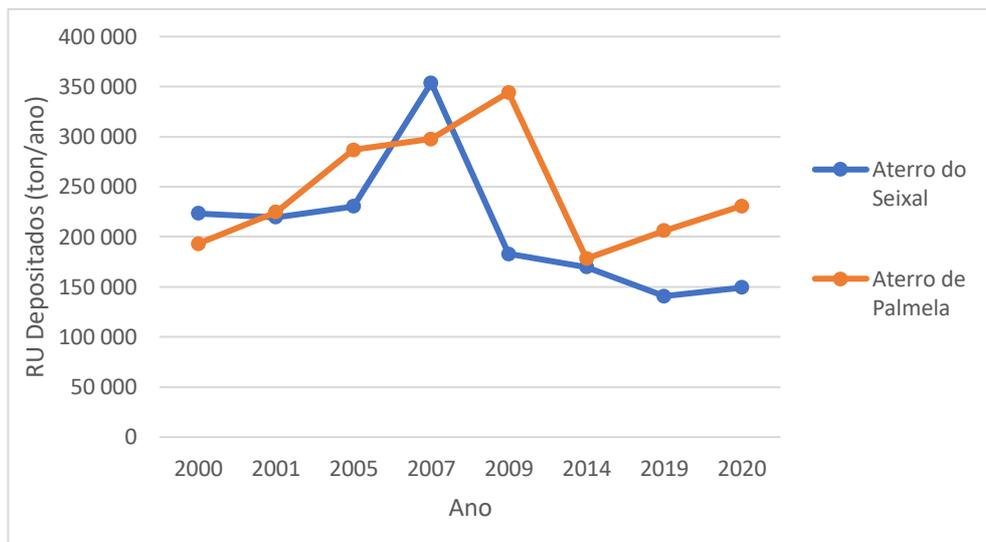


Figura A. 1 - RU depositados nos aterros da Amarsul.

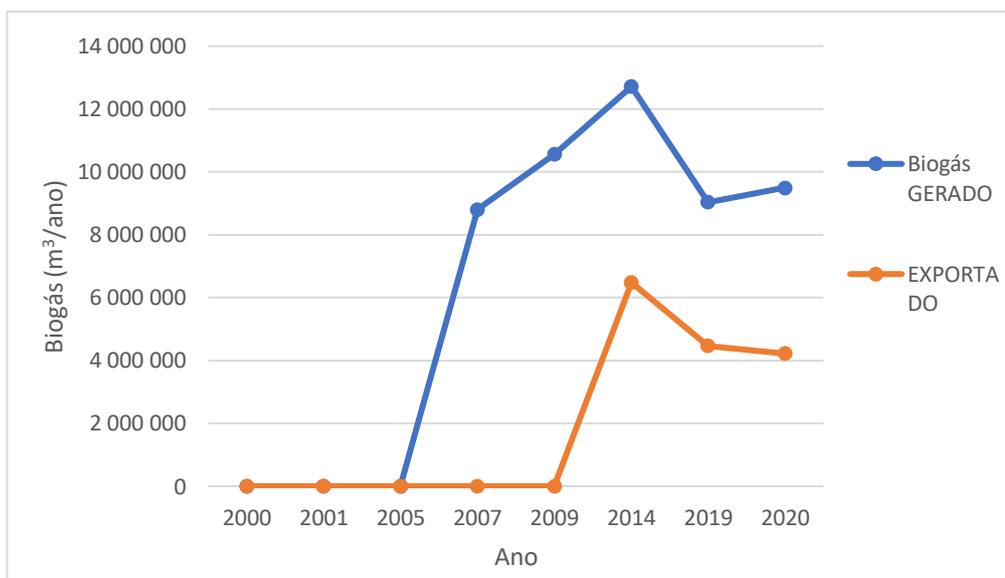


Figura A. 2 - Biogás gerado e exportado no Aterro de Palmela.

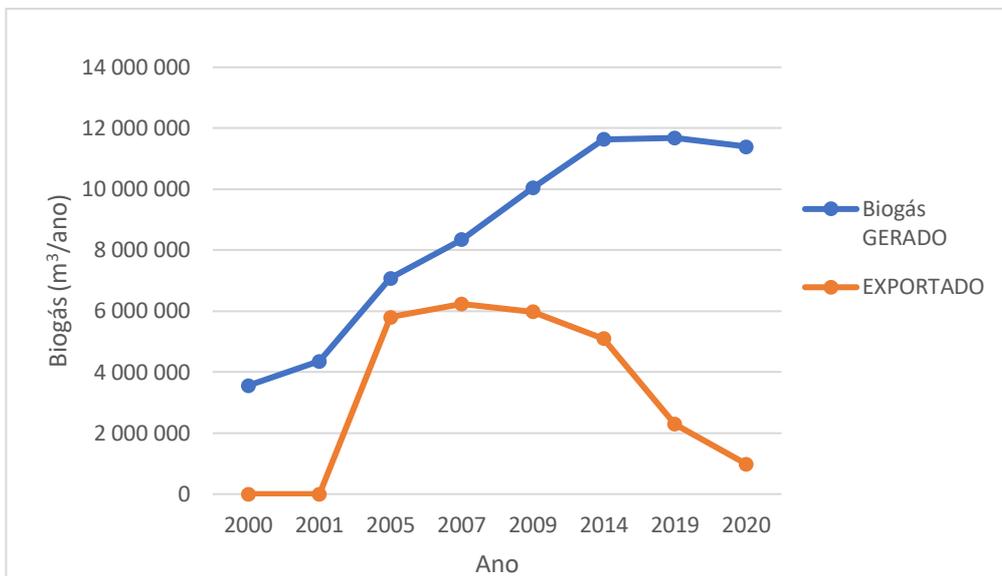


Figura A. 3 - Biogás gerado e exportado no Aterro do Seixal.

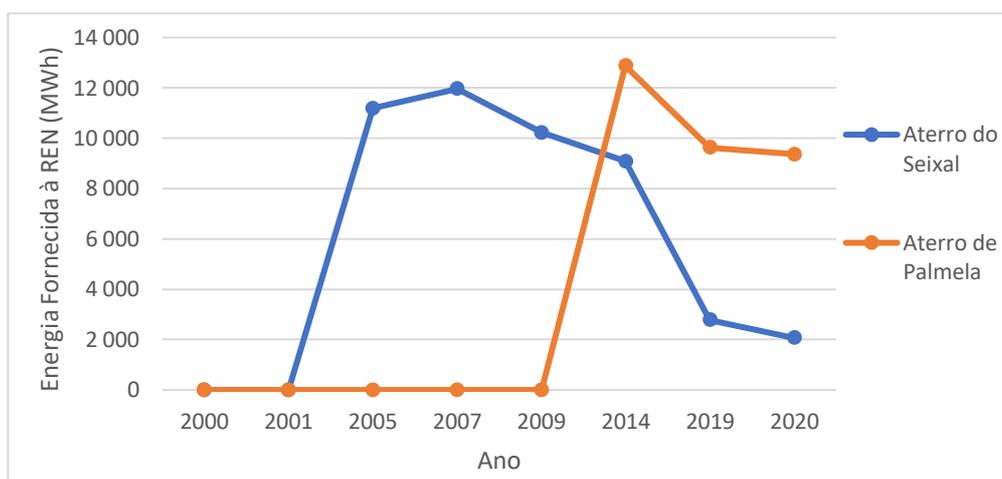


Figura A. 4 - Energia Fornecida à REN pelos aterros da Amarsul.



L0297
 ISO/IEC 17025
 Ensaios

Cliente:
 Amarsul - Ecoparque do Seixal/Palmela/Sesimbra
 Estrada Luís de Camões. Apartado117, EC da Moita
 2861-909 Moita



Relatório de Ensaios Nr: 28648

Versão: 1.0

Pág. 1 de 3

Boletim Definitivo

Identificação da Amostra:

Tipo de amostra: Águas Residuais - Lixiviado
 Local de Colheita: Ensaio Célula D
 Controlo: Quinzenal
 Colhida por: Rodrigo Alegria (LABEXPERT)
 Acondicionamento: De acordo com as especificações

Data da Colheita: 28/07/2021
 Hora da Colheita: ---
 Data de Receção: 28/07/2021
 Data Inic. Análise: 28/07/2021
 Data Fim Análise: 24/08/2021
 Data de Emissão: 26/08/2021

Ensaio/Método	Resultado	Unidade	U(%)	VMR	Valor Limite
pH <i>PT-MET-19 (2018-11-06)</i>	7,3 a 23°C	Escala de Sorensen	±0,2	---	---
Azoto Amoniacal <i>PT-MET-49 (2021-06-09)</i>	7600	mg NH4/L	±6	---	---
Carência Bioquímica de Oxigénio <i>PT-MET-27 (2017-04-05)</i>	2200	mg O2/L	±16	---	---
Carência Química de Oxigénio <i>PT-MET-31 (2016-08-18)</i>	54000	mg O2/L	±5	---	---
Cloreto <i>PT-MET-07 (2017-08-09)</i>	6300	mg Cl-/L	±3	---	---
Condutividade <i>PT-MET-09 (2013-01-24)</i>	34300	µS/cm, a 20°C		---	---
Azoto Total <i>PT-MET-70 (2018-06-15)</i>	8600	mg N/L	±10	---	---

Figura A. 5 - Análise do Lixiviado do dia 28 de julho.



L0297
 ISO/IEC 17025
 Ensaios

Cliente:
 Amarsul - Ecoparque do Seixal/Palmela/Sesimbra
 Estrada Luís de Camões. Apartado117, EC da Moita
 2861-909 Moita



Relatório de Ensaios Nr: 31602

Versão: 1.0

Pág. 1 de 3

Boletim Definitivo

Identificação da Amostra:

Tipo de amostra: Águas Residuais - Lixiviado
 Local de Colheita: Ensaio Célula D
 Controlo: Quinzenal
 Colhida por: Rodrigo Alegria (LABEXPERT)
 Acondicionamento: De acordo com as especificações

Data da Colheita: 18/08/2021
 Hora da Colheita: ---
 Data de Receção: 18/08/2021
 Data Inic. Análise: 18/08/2021
 Data Fim Análise: 06/09/2021
 Data de Emissão: 06/09/2021

Ensaio/Método	Resultado	Unidade	U(%)	VMR	Valor Limite
pH <i>PT-MET-19 (2018-11-06)</i>	8,1 a 23°C	Escala de Sorensen	±0,2	---	---
Azoto Amoniacal <i>PT-MET-49 (2021-06-09)</i>	4400	mg NH4/L	±6	---	---
Carência Bioquímica de Oxigénio <i>PT-MET-27 (2017-04-05)</i>	4200	mg O2/L	±16	---	---
Carência Química de Oxigénio <i>PT-MET-31 (2016-08-18)</i>	36000	mg O2/L	±5	---	---
Cloreto <i>PT-MET-07 (2017-08-09)</i>	6600	mg Cl-/L	±3	---	---
Condutividade <i>PT-MET-09 (2013-01-24)</i>	33200	µS/cm, a 20°C		---	---
Azoto Total <i>PT-MET-70 (2018-06-15)</i>	6800	mg N/L	±10	---	---

Figura A. 6 - Análise do Lixiviado do dia 18 de agosto.



Cliente:
 Amarsul - Ecomarque do Seixal/Palmela/Sesimbra
 Estrada Luís de Camões. Apartado117, EC da Moita
 2861-909 Moita



Relatório de Ensaios Nr: 33207 Versão: 1.0 Pág. 1 de 3
 Boletim Definitivo

Identificação da Amostra:

Tipo de amostra: Águas Residuais - Lixiviado
 Local de Colheita: Ensaio Célula D
 Controlo: Quinzenal
 Colhida por: Rodrigo Alegria (LABEXPERT)
 Acondicionamento: De acordo com as especificações

Data da Colheita: 01/09/2021
 Hora da Colheita: ---
 Data de Receção: 01/09/2021
 Data Inic. Análise: 01/09/2021
 Data Fim Análise: 07/10/2021
 Data de Emissão: 07/10/2021

Ensaio/Método	Resultado	Unidade	U(%)	VMR	Valor Limite
pH PT-MET-19 (2018-11-06)	8,0 a 23°C	Escala de Sorensen	±0,2	---	---
Azoto Amoniacal PT-MET-49 (2021-06-09)	150	mg NH4/L	±6	---	---
Carência Bioquímica de Oxigénio PT-MET-27 (2017-04-05)	2900	mg O2/L	±16	---	---
Carência Química de Oxigénio PT-MET-31 (2016-08-18)	43000	mg O2/L	±5	---	---
Cloreto PT-MET-07 (2017-08-09)	5900	mg Cl-/L	±3	---	---
Condutividade PT-MET-09 (2013-01-24)	33700	µS/cm, a 20°C		---	---
Azoto Total PT-MET-70 (2018-06-15)	7600	mg N/L	±10	---	---

Figura A. 7 - Análise do Lixiviado do dia 1 de setembro.



Cliente:
 Amarsul - Ecomarque do Seixal/Palmela/Sesimbra
 Estrada Luís de Camões. Apartado117, EC da Moita
 2861-909 Moita



Relatório de Ensaios Nr: 37133 Versão: 1.0 Pág. 1 de 3
 Boletim Definitivo

Identificação da Amostra:

Tipo de amostra: Águas Residuais - Lixiviado
 Local de Colheita: Ensaio Célula D
 Controlo: Quinzenal
 Colhida por: Rodrigo Alegria (LABEXPERT)
 Acondicionamento: De acordo com as especificações

Data da Colheita: 29/09/2021
 Hora da Colheita: ---
 Data de Receção: 29/09/2021
 Data Inic. Análise: 29/09/2021
 Data Fim Análise: 25/10/2021
 Data de Emissão: 25/10/2021

Ensaio/Método	Resultado	Unidade	U(%)	VMR	Valor Limite
pH PT-MET-19 (2018-11-06)	5,0 a 3°C	Escala de Sorensen	±0,2	---	---
Azoto Amoniacal PT-MET-49 (2021-06-09)	6000	mg NH4/L	±6	---	---
Carência Bioquímica de Oxigénio PT-MET-27 (2017-04-05)	2500	mg O2/L	±16	---	---
Cloreto PT-MET-07 (2017-08-09)	6200	mg Cl-/L	±3	---	---
Condutividade PT-MET-09 (2013-01-24)	34900	µS/cm, a 20°C		---	---
Carência Química de Oxigénio PT-MET-31 (2016-08-18)	38000	mg O2/L	±5	---	---
Azoto Total PT-MET-70 (2018-06-15)	13000	mg N/L	±10	---	---

Figura A. 8 - Análise do Lixiviado do dia 29 de setembro.



2021

JOÃO VACAS

Cenários de Evolução da Produção de Energia por Biogás de aterro – Caso de estudo nos aterros da AMARSUL S.A.