Proyecto final de máster

Viabilidad de la valorización del biogás de vertederos de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en plantas de Cogeneración

Autor : Rodrigo Bravo Figueroa

Director : Miguel Villarrubia

Índice

Índice de Ilustraciones 5

Índice de ecuaciones 6

Capitulo 1 8

1.1 Resumen 8

1.2 Aspectos preliminares y antecedentes 8

1.3 Objetivos 12

1.4 Metodología 12

Capitulo 2 13

2.1 Descripción e Inventario de los RSU 13

2.1.1 Inventario 13

2.1.2 Caracterización de los RSU 16

2.1.3 Composición 17

2.1.4 Balances de masa por componentes 19

2.1.5 Transformaciones físicas, químicas y biológicas 24

2.1.6 Identificación de promotores e inhibidores de la actividad metanogénica 26

2.2 Rellenos sanitarios 27

2.2.1 Planteamiento general de los componentes de un vertedero 27

2.2.2 Influencia en la producción de biogás y condiciones optimas 28

2.2.3 Influencia de los métodos, aspectos variables y las características de operación de los vertederos en la producción de biogás 30

2.2.4 Sistema de extracción del biogás 39

Capitulo 3 39

3.1 Estimación de la producción del biogás 39

3.1.1 Composición y características del gas de vertedero 40

3.1.2 Generación del gas de vertedero 41

3.1.3 Producción estequiometría 45

3.1.4 Biogás recuperable 49

3.1.5 Velocidad de generación del biogás 51

3.1.6 Estimación de filtraciones o migraciones 57

3.2 Producción de lixiviados 61

Capitulo 4 70
4.1 Estimación del potencial energético y consideraciones de la explotación 70
4.1.1 Red de tuberías y captación 74
4.1.2 Control de variables 75
4.1.3 Presiones 76
4.1.4 Temperatura 76
4.1.5 Caudal 77
4.1.6 Concentraciones 78
4.1.7 Sistema de extracción y manejo del biogás 78
4.1.8 Potencias brutas y netas instaladas. Balance energético 83
4.1.9 Equivalencias energéticas, aspectos normativos medioambientales y económicos 92
Conclusiones 109
Bibliografía 111

Índice de Tablas

Tabla 1 Producción de energía primaria del biogás de Europa en 2010 y 2011. 10
Tabla 2 Gestión de residuos urbanos España 2005. 13
Tabla 3 Residuos destinados a plantas de compostaje de la fracción orgánica....14
Tabla 4 Residuos destinados a centros de triaje, biometanización y compostaje por comunidad autónoma....15
Tabla 5 Residuos destinados a vertedero....16
Tabla 6 Composición física de los RSU....19
Tabla 7 Distribución porcentual de la composición de los RSU para la UE y U.S.A. Gendebien et.al., 1992 20
Tabla 8 Composición física de los RSU por ingresos....20
Tabla 9 Peso especifico y humedad de los desechos....21
Tabla 10 Datos típicos del análisis elemental de los RSU 22
Tabla 11 Nutrientes esenciales y otros elementos encontrados en la fracción orgánica de los RSU 22
Tabla 12 Contenido de sólidos, lignina y biodegradabilidad de la fracción orgánica en los RSU 24
Tabla 13 Compuestos orgánicos inhibidores de la metanogénesis. En condiciones de laboratorio se observa una reducción del 50% en la producción de biogás con las concentraciones indicadas. Gendebien 1992. 33
Tabla 14 Constituyentes típicos encontrados en el gas de vertedero de RSU. Gestión integral de Residuos Sólidos y complementación comparativa entre referencias bibliográficas.* La distribución porcentual exacta variara según la antigüedad del vertedero 41

Tabla 15 Distribución porcentual de los gases de vertedero observados durante los primeros 48 meses después de la clausura del vertedero. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil. 45
Tabla 16 Producción teórica de biogás a partir de distintos compuestos orgánicos. Gendebien et.al., 1992. 48
Tabla 17 Producción de biogás para cada uno de los componentes de los RSU Attal et.al.,(1992)....51
Tabla 18 Valores típico de tiempo de mineralización de residuos....52
Tabla 19 Valores para la constante d, expresados en años 53
Tabla 20 Valores de la producción de biogás por tonelada de residuo húmedo según su grado de degradabilidad 53
Tabla 21 Caudal de biogás generado en vertederos húmedos y secos por tonelada de materia orgánica de alta y media degradabilidad por capa 54
Tabla 22 Caudal de biogás generado para el caso mencionado 55
Tabla 23 Generación de biogás para el ejercicio hipotetico planteado 56
Tabla 24 Propiedades generales utilizadas en modelos de movimiento de fluidos 58
Tabla 25 Emisiones de CH4 como un porcentaje de la tasa de generación total 60
Tabla 26 Consideraciones de fugas y captación de la generación de biogás 60
Tabla 27 Caracterización típica de los lixiviados en vertederos por edad de maduración....61
Tabla 28 Valores de precipitaciones en función de la superficie para Catalunya 64
Tabla 29 Relación molar de los componentes para la estimación del aporte hídrico de la reacción a los lixiviados....65
Tabla 30 Valores estequiometricos correspondientes al aporte hídrico de la reacción a los lixiviados ...65
Tabla 31 Radiación media mensual para Barcelona 2010 68
Tabla 32 Generación media de lixiviados por año para el caso que se ha planteado....69
Tabla 33 Resumen de captura, disponibilidad, potencias y configuración de la instalación. 72
Tabla 34 Consumos eléctricos respectivos al conjunto de soplantes 75
Tabla 35 Resumen de consumos propios de la instalación 84
Tabla 36 Requerimientos térmicos de la instalación 85
Tabla 37 Hoja de datos técnicos de las calderas seleccionadas....85
Tabla 38 Hoja de datos técnicos del motor seleccionado 86
Tabla 39 Consumo eléctrico asociado al bombeo de lixiviados....86
Tabla 40 Consumos eléctricos por concepto de refrigeración....87
Tabla 41 Consumos eléctricos por concepto de extracción y transporte del biogás 87
Tabla 42 Conjunto de consumos asociados a todas las variables....87
Tabla 43 Balance general de generación y consumos de la instalación por periodos 88
Tabla 44 Configuración de los motores de combustión 90
Tabla 45 Datos comparativos y equivalencias de los principales sistemas de generación 91
Tabla 46 Plan de reducciones según Normativa....93
Tabla 47 Opción tarifaria de la categoría A 99
Tabla 48 Opción tarifaria de las categorías b4, b5, b6, b7 y b8 99
Tabla 49 Detalle tarifa regulada para la categoría a.1.3 102
Tabla 50 Detalle del denominado complemento por energía reactiva 102

Tabla 51 Tabla 47 Detalle tarifa regulada para la categoría b.7 103
Tabla 52 Tabla 47 Detalle tarifa regulada para la categoría c.1 104
Tabla 53 Evolución de las asignaciones de derechos de emisión 106

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Variación de Residuos Municipales Cataluña en el rango del 2004 – 2009. Elaboración propia 20
Ilustración 2 Evolución de la generación de residuos en Cataluña. Departamento de medio ambiente y vivienda. 21
Ilustración 3 Vista en sección de un vertedero sanitario controlado. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil; Tabla 3.5 27
Ilustración 4 Perfiles de temperatura de 2 vertederos, La Zoreda y Bratovo de izquierda a derecha respectivamente. 34
Ilustración 5 Esquema de operaciones y procesos en un vertedero. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil. 35
Ilustración 6 Sección de la excavación y recubrimiento 36
Ilustración 7 Sección del vertido de residuos 36
Ilustración 8 Sección del vertedero clausurado 36
Ilustración 9 Fases de la generación de gases de vertedero. (Adaptación de Farquhar y Rovers, 1973; Parker, 1983; Pohland, 1987; and Pohland, 1991) 42
Ilustración 10 Rutas de la digestión anaerobia para la producción de metano y dióxido de carbono. From Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. A., Integrated Solid Waste Management—Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill Book Company, New York, ...43
Ilustración 11 Representación grafica de la producción de gas para un periodo de 20 años, para materiales de rápida y lenta descomposición. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil. 47
Ilustración 12 Modelo de vaso de vertido 55
Ilustración 13 Representación de la generación de biogás por capas 55
Ilustración 14 Representación de la generación de biogás acumulado 56
Ilustración 15 Balance de lixiviados en un volumen de control 62
Ilustración 16 Representación del balance hídrico 64
Ilustración 17 Representación grafica del caudal de funcionamiento. 73
Ilustración 18 Esquema representativo de la instalación 73
Ilustración 19 Cobertura de la demanda de calor para el tratamiento de lixiviados. 73
Ilustración 20 Esquema que representa una trampa de condensados 77
Ilustración 21 Radio de influencia de los pozos de extracción 79
Ilustración 22 Representación de la trayectoria de arrastre del biogás 79
Ilustración 23 Configuración recomendada de los pozos de extracción 80
Ilustración 24 Ejemplo de chimenea de extracción típica 80

Ilustración 25 Ejemplo de las configuraciones de pozos, redes de captación y distribución de un vertedero hipotético 81
Ilustración 26 Esquema de sistema de extracción de forma horizontal 81
Ilustración 27 Representación grafica del conjunto de consumos 88
Ilustración 28 Grafica del balance general de generación y consumos de la instalación por periodos 89
Ilustración 29 Balance y cobertura de la demanda de calor combinando calderas y cogeneración. 89
Ilustración 30 Esquema de categorías del sistema tarifario 98
Ilustración 31 Modalidad de asignación derechos de emisión 105
Ilustración 32 Evolución del coste de la tonelada de CO_2 108

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Fracción biodegradable % 23
Ecuación 2 Combustión (Oxidación química) 25
Ecuación 3 Gasificación (Combustión parcial) 25
Ecuación 4 Reacción correspondiente al proceso de compostaje 26
Ecuación 5 Ecuación correspondiente a la digestión anaerobia 26
Ecuación 6 Reacción generalizada para la descomposición anaerobia 45
Ecuación 7 Coeficientes estequiométricos de la ecuación 45
Ecuación 8 Representación de la materia orgánica en la ecuación 46
Ecuación 9 Ecuación de estimación triangular de producción de biogás 47
Ecuación 10 Producción teórica estimada de biogás 50
Ecuación 11 Ecuación de la cinética de generación del biogás. 51
Ecuación 12 Integración de la ecuación de cinética 51
Ecuación 13 Proporcionalidad de producción de biogás y destrucción de materia orgánica 52
Ecuación 14 Expresión de la generación en unidades de tiempo 52
Ecuación 15 Expresión de la generación considerando ambas degradabilidad 53
Ecuación 16 Caudal de biogás generado por capas 53
Ecuación 17 Balance hídrico del vertedero 63
Ecuación 18 Aporte de la humedad de los residuos en el volumen de lixiviado 64
Ecuación 19 Aporte de las precipitaciones en el volumen de lixiviado 65
Ecuación 20 Aporte correspondiente al aporte de la reacción en el volumen de lixiviado 65
Ecuación 21 Formula de la reacción y consumo hídrico 66
Ecuación 22 Consumo hídrico por kg de SVRB 66
Ecuación 23 Consumo hídrico en función de la generación de biogás de los SVRB 66
Ecuación 24 Consumo hídrico en función del biogás generado 67
Ecuación 25 Ley de los gases ideales 67
Ecuación 26 Moles de agua que ingresan al balance en el biogás generado 67
Ecuación 27 Obtención de volumen correspondiente a la evaporación 67
Ecuación 28 Balance hídrico del vertedero 68
Ecuación 29 Calculo de potencia para el conjunto de soplantes 74

Ecuación 30 Calculo de la potencia de bombeo de lixiviados.....82
Ecuación 31 Calculo del caudal de aire necesario para la evaporación.....82
Ecuación 32 Calculo de potencia para el conjunto de soplado para la evaporación de lixiviados.....83
Ecuación 33 Calculo de la potencia térmica del intercambiador.....83
Ecuación 34 Calculo de la potencia de bombeo del circuito refrigerante.....83
Ecuación 35 Calculo de potencia considerando las perdidas.....83

Capitulo 1

1.1 Resumen

El trabajo que en adelante se desarrolla trata de la viabilidad para la valoración del biogás de vertederos de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en una planta de cogeneración en las mismas instalaciones. El estudio se basa en un caso hipotético de generación de residuos correspondiente a la población del Valles Occidental, se consideran los reportes de los inventarios de residuos según su clasificación y de acuerdo a los balances por componentes y las correspondientes transformaciones físicas, químicas y biologías que generan un biogás con un contenido aproximado del 50% de CH_4.

Se hace además una revisión completa acerca de la gestión de los distintos rellenos sanitarios que cuentan con sistemas de captación y explotación similares a los que se tratan en este trabajo, con el objetivo de plantear un escenario de explotación.

El caso desarrollado en este trabajo considera un vertedero capacitado para recibir una carga aproximada de 400.000 ton/año, correspondiente a los 892.269 habitantes del Valles Occidental reportados en el censo de 2011, los residuos se disponen en un conjunto de 6 capas formadas por 6 secciones cada, donde cada capa se completa a lo largo de un año, por lo que la vida útil del vertedero se establece en 36 años aprovechando además las máximas capturas del biogás generado.

En este conjunto de capas se modela la generación del caudal de biogás y se plantea su explotación considerando básicamente 3 ejes principales, 1) Cobertura de la demanda calorífica total estimada en aproximadamente 25 MW anuales, los que permiten llevar a cabo el tratamiento térmico de evaporación del total de los lixiviados generados que ascienden aproximadamente a 300.000 m^3/año, 2) Estructura de un sistema combinado entre 2 calderas auxiliares VIESSMANN de aproximadamente 16 MW que funcionaran en régimen variado complementado por un conjunto de generadores de 3 MW cada uno (13 en total), con el objetivo de combinar de forma modular los aportes térmicos y aprovechar el remanente disponible del biogás para la generación de energía eléctrica que será destinada a cubrir las necesidades propias de la instalación que ascienden aproximadamente a los 5.200 MWh/año, además de dejar un potencial eléctrico que asciende a 121.933 MWh/año disponible para su interconexión y el último eje 3) Considera la revisión de estrategias de la comercialización de la energía interconectada a la red tomando en cuenta un escenario donde aun se contaba con el sistema tarifario de régimen especial, además se cuantifica en 479.400 t CO_2/año los ahorros de emisiones de Gases de Efecto Invernadero que se podrían gestionar comercializándolos como derechos de emisión.

1.2 Aspectos preliminares y antecedentes

El manejo y aprovechamiento de los residuos se consideran hace tiempo como una alternativa por la que se puede aprovechar una materia prima que se podría considerar como residual, tanto para ser reciclados, como para la producción de compostaje y la biometanización.

Dentro de las alternativas antes mencionadas el proceso de biometanización considera la transformación de la materia orgánica presente de los residuos urbanos en una mezcla de gases que

básicamente contiene metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), también denominado biogás. Este biogás posee las características técnicas para ser utilizado como gas de combustión así como un alto potencial de calentamiento global principalmente porque en los rellenos sanitarios o vertederos se produce un alto grado de filtraciones o emisiones fugitivas justamente de CH_4 y CO_2.

Dentro de la tendencia mundial en la que se espera incrementar el uso de la energía renovable y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso y obtención del biogás se mantiene fluctuante, ganando y perdiendo terreno frente a las principales tecnologías como son la eólica y solar según las tendencias de mercado y políticas energéticas, en el caso de la captura y utilización del biogás además se podría capturar el CH_4 que se fuga, cabe mencionar que el potencial de calentamiento de este supera aproximadamente 21 veces el potencial del CO_2. En este contexto un dato a considerar es que en el año 2005 las emisiones totales de GEI en España alcanzaron las 440,6 Mt de CO_2 equivalentes, cifra que supone un 52,2% de exceso respecto al año base. De acuerdo a las políticas europeas se han establecido sistemas de incentivo económico a la producción de electricidad a partir de biogás, en los Estados Miembros. Básicamente existen 2, las cuotas vía certificados verdes y en los sistemas de precios mínimos (tarifas/primas), actualmente solo se podrá considerar la primera opción aun cuando en este trabajo se hará una descripción de la segunda opción, el sistema de cuotas certifica la "calidad verde" o "certificados verdes" que son asignados y comercializados.

El proceso de descomposición es conocido, así también como la cinética de producción de biogás y aunque existen diferencias entre casos se puede considerar como una tecnología madura en la carrera de la obtención de energía renovable.

En el ámbito nacional se podría considerar aproximadamente un número superior a 40 instalaciones de vertederos que cuentan con generación de electricidad mediante la utilización del biogás capturado, a nivel europeo son Alemania, Francia, Holanda, Italia, Suecia, Reino Unido, Dinamarca, Bélgica, España y Austria entre otros los países que lideran la producción de biogás, este liderazgo se debe básicamente a la actividad de las empresas y los marcos de actuación.

Como se comentara más adelante la tendencia a la disminución progresiva de vertidos de los próximos años guiara la obtención del biogás principalmente al biogás agroindustrial, sin embargo el potencial del biogás de vertedero aun es muy atractivo del punto de vista de la materia prima.

Específicamente en España a finales de 2010, la potencia eléctrica instalada con biogás era de 177 MW, correspondiendo alrededor del 65% de la potencia instalada y del 70% de la generación a biogás de vertedero.

Los datos reportados para 2010 y 2011 respecto a la producción de energía primaria a partir del biogás según EurObserv'$_{2012}$, se presenta en la siguiente tabla.

Pays/Country	2010 Décharges/ Landfill gas	2010 Stations d'épuration[1]/ Sewage sludge gas[1]	2010 Autres biogaz[2]/ Others biogas[2]	2010 Total/ Total	2011* Décharges/ Landfill gas	2011* Stations d'épuration[1]/ Sewage sludge gas[1]	2011* Autres biogaz[2]/ Others biogas[2]	2011* Total/ Total
Germany	232,50	402,6	6 034,5	6 669,6	149,0	504,2	4 414,2	5 067,6
United Kingdom	1 492,6	258,0	0,0	1 750,6	1 482,4	282,4	0,0	1 764,8
Italy	349,6	8,1	149,8	507,5	755,6	16,2	323,9	1 095,7
France	236,7	44,1	53,2	334,0	249,7	41,9	58,0	349,6
Netherlands	36,7	50,2	206,5	293,4	31,5	51,5	208,3	291,3
Czech Republic	29,5	35,9	111,3	176,7	31,8	38,8	179,9	249,6
Spain	119,6	12,4	66,7	198,7	148,1	15,3	82,6	246,0
Austria	5,1	22,3	144,2	171,6	4,3	16,4	138,8	159,5
Poland	43,3	63,3	8,0	114,6	47,5	67,8	20,1	135,4
Belgium	41,9	14,6	70,9	127,4	41,9	14,6	70,9	127,4
Sweden	35,7	60,7	14,8	111,2	12,4	68,9	37,9	119,3
Denmark	8,1	20,1	74,0	102,2	5,2	19,6	73,2	98,1
Greece	51,7	15,0	1,0	67,7	55,4	16,1	1,4	72,8
Ireland	44,2	9,6	4,6	58,4	43,8	8,2	5,6	57,6
Slovakia	0,8	9,5	1,8	12,2	3,0	13,6	29,3	45,8
Portugal	28,2	1,7	0,8	30,7	42,3	1,8	0,9	45,0
Finland	22,7	13,2	4,5	40,4	23,9	13,4	4,8	42,0
Slovenia	7,7	2,8	19,9	30,4	7,1	2,7	26,2	36,0
Hungary	2,6	12,3	19,3	34,2	7,3	6,4	15,5	29,1
Latvia	7,9	3,3	2,2	13,3	7,8	2,4	11,8	22,0
Luxembourg	0,1	1,2	11,7	13,0	0,1	1,4	11,3	12,8
Lithuania	2,0	3,0	5,0	10,0	5,9	3,1	2,1	11,1
Estonia	2,7	1,1	0,0	3,7	2,2	1,1	0,0	3,3
Romania	0,0	0,0	3,0	3,0	0,0	0,0	3,0	3,0
Cyprus	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0
European Union	2 801,7	1 065,0	7 008,8	10 875,4	3 157,9	1 208,0	5 719,3	10 085,8

*(1) Urbaine et industrielle. Municipal and industrial. (2) Unité décentralisée de biogaz agricole, unité de méthanisation des déchets municipaux solides, unité centralisée de codigestion et multiproduit. Decentralised agricultural plant, municipal solid waste methanisation plant, centralised co-digestion plant. * Estimation. Estimate. Les décimales sont séparées par une virgule. Decimals are written with a comma.* **Source: EurObserv'ER 2012.**

Tabla 1 Producción de energía primaria del biogás de Europa en 2010 y 2011.

Desde el 2008 que España se ubica en el séptimo lugar en términos de energía primaria de biogás, esa tendencia no ha variado, así mismo la mayor parte del total procede de vertedero mientras que su mínimo complemento proviene de unidades descentralizadas de digestor agrícola.

La evolución de la explotación del biogás a grandes rasgos considera una mayor presencia a mediados de los 80 de instalaciones de plantas de biogás en el sector ganadero, sin embargo problemas de mantenimiento y operación ocasionaron el estancamiento del biogás agroindustrial en España. La mayoría de plantas quedaron progresivamente fuera de servicio, y la producción de biogás agroindustrial ha sido prácticamente testimonial desde entonces.

En este caso cabe mencionar que el principal aprovechamiento del biogás es para la generación de electricidad, de esta, un 90% proviene de vertederos y plantas depuradoras, mientras que el biogás agroindustrial se encuentra en torno al 9%.

Como un sistema dinámico de desarrollo se pretende establecer un conjunto de medidas para favorecer la creación y explotación de las distintas fuentes de biogás, entre ellos los planes de fomento

de las energías renovables, en el último documento, el plan de acción nacional de energías renovables de España (2011-2020) se prevé pasar de los 152 MW (2005) a 400 MW (2020), de los que se espera que la tendencia se invierta, es decir que más del 50% se prevé que sea biogás agroindustrial.

Tomando en cuenta como origen del biogás tanto el de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) como del biogás de vertedero, a continuación se dará una breve estimación del potencial de cada una, en un horizonte fijado en el año 2020.

En ambos casos es importante considerar una estimación de generación y gestión del residuo, pues para el primer caso –FORSU- solo se podrían cumplir las expectativas si se ha realizado una separación adecuada de la fracción, se incluye además el cumplimiento del objetivo de recogida selectiva de biorresiduos y otros usos alternativos (producción de compost), en el caso del biogás de vertedero se debe tener en consideración que la normativa y sus transposiciones tanto comunitaria como española están encaminadas hacia la reducción progresiva de los residuos biodegradables, fijando como objetivo de que al 2016 la cantidad de residuos sea como máximo el 35% de la cantidad vertida en 1995.

Para el caso español, en general existen muchas instalaciones que se consideran como plantas de digestión anaerobia, plantas de tratamiento biológico, etc. en el caso especifico de Catalunya se cuenta con diversas instalaciones, a modo de ejemplo a continuación se detallaran algunas instalaciones y como se han gestionado, tomando en cuenta el principio de la valorización energética involucrado.

Como descripción del enfoque centrado en la región metropolitana de Barcelona, se pueden mencionar plantas de digestión anaerobia, valorización energética, un deposito controlado que aun estando clausurado de este se sigue extrayendo biogás.

Plantas de digestión anaerobia:

- Ecoparc de Barcelona

Posee una capacidad para tratar 300.000 toneladas de residuos municipales al año, da servicio para las zonas centro y sur de Barcelona, considerando la recogida de la fracción orgánica procedente de la recogida selectiva municipal además de la fracción orgánica de mercados y grandes productores y finalmente la fracción denominada resto de la recogida municipal.

En este centro se realiza separación, producción de biogás y compost.

- Ecoparc de Montacada i Reixac
- Zona de tractament mecànic i biològic de la Planta Integral de Valorització de Residus a Sant Adrià de Besòs

1.3 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo consideran:

i. Cuantificación del recurso energético derivado de la captura del biogás generado en un vertedero hipotético para la población del Valles Occidental de Catalunya, estableciendo un modelo de producción basado en la generación de residuos per cápita, caracterización del residuo, calculo de generación del biogás, calculo y estimación de las emisiones fugitivas y de los lixiviados generados, cálculos de una instalación de cogeneración para la obtención de electricidad y calor mediante el uso de motores alternativos, cuantificación de las necesidades energéticas de la instalación y gestión de una parte del biogás generado para el tratamiento total de lixiviados con la utilización de calderas auxiliares.

ii. La valorización de la energía obtenida y de los beneficios que genera un proyecto de este tipo para la reducción de GEI, para la valorización del recurso energético se consideraran los incentivos existentes hasta hace un tiempo que incluían la tarifa especial y otros conceptos para hacer más viable la comercialización de la energía, para el caso de la captura de los GEI se mencionan los aspectos normativos ambientales así como su potencial económico pudiendo ser comercializados como derechos de emisión.

Tal y como se presenta este trabajo podría plantearse un sistema que valorice el producto de un residuo lo que significaría obtener una "materia prima" o recurso combustible con valor residual, la obtención de electricidad y calor tanto para el funcionamiento como para una posible comercialización además de reducir los daños de los GEI los que también podrían generar un plus al momento de ser comercializados como derechos de emisión.

1.4 Metodología

Aunque la mayoría de los estudios realizados consideran principalmente la estimación del biogás agroindustrial, en el caso del biogás de vertedero, la cuantificación y obtención de los potenciales de generación y captura así como de las conversiones y energía obtenida seguirán la metodología que a continuación se detalla.

a) Cuantificación y caracterización típica del residuo presente en vertederos para Catalunya.
b) Calculo del potencial de biogás generado y capturado.
c) Valoración energética del recurso según hipótesis de vertedero y generación de residuos.
d) Cuantificación de la energía eléctrica y calorífica obtenida.
e) Alternativas de gestión del recurso energético según supuestos de la instalación y tratamientos.
f) Cuantificación e incidencia ambiental referente a la captura de GEI.
g) Viabilidad económica de la venta de la energía, uso del calor y de los bonos verdes.

Capitulo 2

2.1 Descripción e Inventario de los RSU

2.1.1 Inventario

Para estimar o desarrollar el estudio de viabilidad de la valoración del biogás que se produce en un vertedero controlado, es necesario conocer la situación actual del territorio en que se desea plantear o manejar información general relativa a las cantidades en función de la población a la cual se atribuye dicha disposición de residuos. En este caso se mencionaran cantidades totales de residuos para el territorio español así como también un desglose por comunidades autónomas y/o provincias.

De acuerdo a las estadísticas publicadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de la gestión de residuos sólidos urbanos para el 2005, se tienen datos de recogida según modalidad, además de los residuos que siguen tratamientos y eliminación.

GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS AÑO 2005

(Cantidades en miles de toneladas)

Recogida

Modalidad de Recogida	Cantidad	%
Cantidad de residuos recogidos selectivamente (Papel, Vidrio, envases y F. Orgánica) Ver Tabla	2.133	9.5
Cantidad de residuos mezclados	19.658	88
Cantidad recogida en puntos limpios	562	2.5
TOTALES	*22.353*	*100*

Tratamiento y eliminación: Cantidad de residuos urbanos tratados en diferentes instalaciones en España (2005)

Instalaciones	Nº centros	Entrada
Instalaciones de clasificación de envases Ver Tabla	67	331
Instalaciones de compostaje de F. orgánica recogida selectivamente Ver Tabla	23	244
Instalaciones de triaje y compostaje Ver Tabla	59	6.455
Instalaciones de triaje, biometanización y compostaje Ver Tabla	9	1.124
Instalaciones de incineración Ver Tabla	10	1.915
Vertederos Ver Tabla	188	14.696
Instalaciones	**Nº centros**	**Entrada**

Tabla 2 Gestión de residuos urbanos España 2005.

En este caso y con motivo del desarrollo de este trabajo es interesante observar que cerca de un 90% de los residuos corresponden a residuos mezclados, más adelante se hará referencia a la composición típica de estos residuos lo que a posteriori permitirá establecer balances por componentes y estimar la producción de biogás. En el presente trabajo se pretende dar un mayor énfasis a la información

referente a Cataluña, con el objetivo de plantear un ejercicio de cálculo al finalizar el marco teórico que pueda ser contrastado con datos experimentales.

En este aspecto cabe destacar que según el censo del 2011, la Generalitat de Cataluña ha registrado una población de 7.539.618 habitantes, la comunidad representa el 16% del conjunto de España y es la segunda después de Andalucía. Cataluña cuenta con 946 municipios, pero con poca población rural, porque la mayoría de los ciudadanos (cerca del 95%) se concentran en unos 300 municipios con más de 2000 habitantes y son considerados por lo tanto como una población urbana.

El objetivo de la recogida selectiva es recolectar segregadamente los residuos para, de esta forma, hacer posible su reciclaje y la fabricación de nuevos productos y evitar que se destinen a vertederos o incineradoras. Esto significa un ahorro energético y de materiales, en comparación con los requerimientos que tendría la fabricación de productos a partir de las materias primas originarias.

Respecto a la fracción presente de residuos orgánicos en la Tabla 2 se muestra la información referente a la que tiene como destino plantas de compostaje (para recogida selectiva).

(Cantidades en miles de toneladas)

Residuos destinados a Plantas de Compostaje de la Fracción Orgánica Recogida Selectivamente

Com. Autónom.	Nº Plantas	R. Totales	R. Form (1)	R. FV (2)	R. Ind. Agroalimentar.	Compost	Otros Materiales Clasificad. (3)	Recha
ANDALUCÍA	1	78	78			14	0.4	
CATALUÑA	18	128	79	42	7	12	0.0	16
GALICIA	1	15	4	10	1	1	2.0	6
I. BALEARES	2	3	3			7	0.6	31
NAVARRA	1	20	9		11	1	1.0	10
Com. Autónom.	**Nº Plantas**	**R. Totales**	**R. Form (1)**	**R. FV (2)**	**R. Ind. Agroalimentar.**	**Compost**	**Otros Materiales Clasificad. (3)**	**Recha**
TOTALES	23	244	173	52	19	35	4.0	63

(1) Residuos de la fracción orgánica municipal recogidos selectivamente

(2) Residuos de la fracción vegetal ej. : residuos de poda

(3) Otros materiales clasificados: vidrio, plástico, cartón, complejos, chatarra: férrica y no férrica

Tabla 3 Residuos destinados a plantas de compostaje de la fracción orgánica

Se observa que Cataluña posee el mayor número de plantas, sin embargo también se cuenta con una importante cantidad de residuos orgánicos destinados a plantas de triaje, compostaje y biometanización, la información se muestra a continuación, cabe recordar que los datos se expresan en miles de toneladas.

Residuos destinados a Centros que incluyen Plantas de Triaje, Biometanización y Compostaje (Biometanización)

Comunidad Autónoma	RSU (1)	FORM (2)	FV (3)
CASTILLA LEÓN	42	0	0
CATALUÑA	196	0	0
GALICIA		65	21
LA RIOJA	18	0	0
MADRID	113	0	0
Comunidad Autónoma	**RSU (1)**	**FORM (2)**	**FV (3)**
TOTALES	369	65	21

(1) Residuos sólidos urbanos. (Residuos mezclados)

(2) Residuos de la fracción orgánica municipal, recogida selectivamente

(3) Residuos de fracción vegetal , recogida selectivamente

Residuos destinados a Centros que incluyen Plantas de Triaje, Biometanización y Compostaje (Compostaje)

Comunidad Autónoma	RSU	FORM	FV	Compost Producido (t)
CASTILLA LEÓN	437	0	0	32
CATALUÑA	0	136	5	12
GALICIA	92	0	0	71
LA RIOJA	0	0	0	0
MADRID	0	0	0	0
Comunidad Autónoma	**RSU**	**FORM**	**FV**	**Compost Producido (t)**
TOTALES	529	136	5	115

Tabla 4 Residuos destinados a centros de triaje, biometanización y compostaje por comunidad autónoma

La Generalitat de Cataluña indica que la recogida selectiva aumenta progresivamente a lo largo de los últimos años. En términos generales, los resultados de la recogida selectiva varían según las características de los municipios, los modelos de recogida y las campañas de comunicación desplegadas. De esta forma, los porcentajes de recogida selectiva oscilan entre más del 80% en las poblaciones que obtienen los mejores resultados y alrededor del 2-4% en los municipios situados al final de la cola.

Los materiales recogidos selectivamente se destinan a procesos de reciclaje y reutilización. Estos materiales contienen generalmente una pequeña parte de residuos que no corresponden a la fracción, a los que se denomina impropios. Así pues, se denomina recogida selectiva neta o recuperación a las fracciones recogidas selectivamente menos los impropios que contengan.

Aun cuando existen importantes cantidades de los residuos que siguen las vías de recuperación y valorización mediante las recolecciones selectivas, la mayor parte de estos tiene como destino final los vertederos, la información se detalla en la Tabla 4.

(Cifras en miles de toneladas)

Residuos destinados a Vertedero

Comunidad Autónoma	Nº Total de Vertederos	R U Vertidos
ANDALUCÍA	35	3.054
ARAGÓN	21	501
ASTURIAS	1	480
BALEARES	3	352
CANARIAS	5	1.299
CANTABRIA	1	235
CASTILLA Y LEÓN	28	755
CASTILLA-LA MANCHA	9	639
CATALUÑA	29	2.095
CEUTA	1	47
EXTREMADURA	7	431
GALICIA	3	368
MADRID	5	1.691
MURCIA	4	158
NAVARRA	11	196
PAÍS VASCO	8	656
RIOJA	2	105
VALENCIA	14	1.634
Comunidad Autónoma	**Nº Total de Vertederos**	**R U Vertidos**
TOTALES	187	14.696

Tabla 5 Residuos destinados a vertedero

2.1.2 **Caracterización de los RSU**

Los residuos que se consideran como residuos urbanos o municipales son aquellos que se generan en los domicilios particulares, oficinas, servicios y consorcios además de aquellos que no tengan la clasificación de peligrosos, también se incluyen 3 clasificaciones que consideran a) de limpieza y otros, b) animales domésticos muertos, muebles y otros, y c) escombros. Sin embargo no se consideran específicamente los residuos industriales que no son considerados como no peligrosos, y que efectivamente se asimilan como urbanos.

Las definiciones han variado de forma considerable, pues en la Ley 10/1998, la definición de residuos se atiene a un listado, y se ha cambiado en determinados casos el carácter de residuo por el de materia prima secundaria y por lo tanto ya no le es aplicable la normativa sobre residuos y se someterían a la que regula las materias primas. Para que se cumpla esto, la materia u objeto no debe estar destinado por el poseedor a desprenderse de la misma, sino que se utilizara y no precisamente en un proceso de valorización, toma crucial interés la definición: “Todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente. En todo caso estarán incluidos en este concepto los

procedimientos enumerados en el Anexo II.B de la Decisión de la Comisión (96/350/CE) de 24 de mayo de 1996, así como los que se aprueben por el Gobierno. Para el desarrollo de este trabajo se mencionan:

I. Utilización como combustible o como otro medio de generar energía
II. Reciclado o recuperación de sustancias orgánicas que no se utilizan como disolventes (incluidas las operaciones de formación de abono y otras transformaciones biológicas)
III. Recuperación de componentes utilizados para reducir la contaminación
IV. Acumulación de residuos para someterlos a cualquiera de las operaciones enumeradas (con exclusión del almacenamiento temporal previo a la recogida en el lugar de la producción)

Entonces considerando las características que clasifican al tipo de residuo, para el desarrollo de este trabajo es necesario tener claras las cantidades y tipos de residuos así como conocer las fracciones involucradas en la generación del biogás, en los siguientes puntos se profundizara en la cuantificación tratando de centrar la información recogida de las diferentes fuentes consultadas.

De las últimas disposiciones y que se mencionan en la Agencia de Residuos de Cataluña es que se consideran residuos municipales, de acuerdo con el artículo 3 del Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley Reguladora de los Residuos, aquellos residuos generados en los domicilios particulares, los comercios, las oficinas y los servicios, y también los que no tienen la consideración de residuos especiales y que, por su naturaleza o composición, se pueden asimilar a los que se producen en dichos lugares o actividades. Tienen también la consideración de residuos municipales los residuos procedentes de la limpieza de las vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas; los animales domésticos muertos; los muebles, los utensilios y los vehículos abandonados; los residuos y los derribos procedentes de obras menores y reparación domiciliaria.

Un subgrupo de estos residuos lo constituyen los residuos comerciales, definidos como aquellos residuos generados por la actividad propia del comercio al detalle y al por mayor, la hostelería, los bares, los mercados, las oficinas y los servicios. Son equiparables a este subgrupo, a efectos de su gestión, los residuos originados en la industria que tienen la consideración de asimilables a los municipales.

2.1.3 **Composición**

Ya se ha hecho referencia a la distribución de residuos, en esta sección se hará principal referencia a la fracción orgánica. Cuando se ha de hablar de la fracción orgánica de los residuos municipales (FORM) se incluyen clasificaciones generales para la descripción del total, en este sentido la fracción orgánica está constituida principalmente por restos de comida y restos vegetales de pequeño tamaño que pueden recogerse selectivamente y son susceptibles de degradarse biológicamente.

La FORM es la fracción más inestable de los residuos municipales, debido a su elevado contenido en agua (en torno al 80% de su peso) y en materia orgánica (hidratos de carbono, proteínas y grasas).

Estos restos orgánicos son fácilmente degradables por los microorganismos. Por este motivo, es necesario que esta fracción se recoja y gestione lo más rápidamente posible, a fin de evitar la generación de lixiviados y malos olores. La fracción orgánica tiene una densidad bastante elevada, aunque variable (aproximadamente 0,5-0,6 t/m3), lo que hace que pese mucho y ocupe poco espacio.

Así entonces la fracción orgánica de residuos municipales se compone de residuos orgánicos biodegradables de origen vegetal y/o animal, susceptibles de degradarse biológicamente, constituidos fundamentalmente por:

a) Restos de la preparación de la comida, restos sobrantes de comida y alimentos en mal estado.
b) Restos vegetales de pequeño tamaño y tipo no leñoso (césped, hojarasca, ramos de flores, etc.).

Dentro de esta clasificación están:

- Restos de comida y restos de preparación de la comida
- Pieles y restos de fruta y verdura
- Huesos y restos de carne
- Espinas y restos de pescado, así como caparazones y conchas de marisco
- Cáscaras de huevo y pieles y cáscaras de frutos secos
- Restos de comida y comida en mal estado
- Restos de pan
- Poso de café y restos de infusiones

Residuos de papel

- Papel de cocina sucio
- Servilletas de papel sucias
- Pañuelos de papel

Restos vegetales de pequeñas dimensiones

- Ramos marchitos, flores y hojas secas
- Malas hierbas, césped, pequeñas ramas de poda y hojarasca

Materiales compostables

- Bolsas compostables
- Otros materiales compostables

Otros materiales:

- Tapones de corcho
- Aserrín
- Astillas y virutas de madera natural
- Excrementos de animales domésticos sin lechos ni arenas absorbentes
- Mondadientes y palos de helado, palillos de comida china o de cocinar pinchos, etc.

Los restos vegetales de pequeño tamaño y tipo no leñoso, siempre que se traten de fracción vegetal (hojas, flores, ramas, etc.), se pueden considerar FORM, dado que se podrán gestionar conjuntamente con los demás residuos orgánicos y no es necesario ningún tipo de pretratamiento (trituración) antes de su valorización.

En el caso de la fracción vegetal (FV) son residuos orgánicos biodegradables de origen vegetal, susceptibles de degradarse biológicamente. A efectos de su gestión, la FV se puede dividir en dos grupos específicos que deberán gestionarse de forma diferenciada:

a) Fracción vegetal de pequeño tamaño y tipo no leñoso (césped, hojarasca, ramos de flores, etc.) asimilable a la FORM.
b) Poda, fracción vegetal de gran tamaño y tipo leñoso, que requiere de una trituración previa a su valorización.

En este caso la poda considera residuos orgánicos biodegradables de origen vegetal, de tipo leñoso, generados en la poda de árboles o arbustos. La correcta gestión de la poda requiere de una recogida específica –diferenciada de la recogida selectiva de la FORM– y de una trituración previa, que reduzca su tamaño, para optimizar su transporte y facilitar su valorización.

2.1.4 **Balances de masa por componentes**

Según las referencias bibliográficas consultadas, existe gran diferencia en lo que se refiere al contenido de una muestra de residuos, sin embargo a continuación se entregara información que podría representar una estimación aproximada a la media, se incluyen 2 fuentes que representan a la gran mayoría de las fuentes consultadas.

Composicion fisica de los RSU excluyendo reciclados y residuos de comidas con aguas residuales			
Componente	Tipico	Embalaje	Davis, California
Residuos de comida	8		6
Papel	35	50 - 60	33,1
Cartón	6		7,9
Plásticos	7	12 - 16	10,7
Textiles	2		2,4
Goma	0,5		2,5
Cuero	0,5		0,1
Residuos de jardín	18,5		17,7
Madera	2	4 - 8	5
Orgánicos misceláneos			0,4
Vidrio	8	20 - 30	5,8
Latas de hojalata	6	6 - 8	3,9
Aluminio	0,5	2 - 4	0,4
Otros materiales (inorganicos)	3		3,6
Suciedad, cenizas, etc	3		0,5
	100		100

Gestion integral de residuos solidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil; Tabla 3.4

Tabla 6 Composición física de los RSU

Zona	Alimentación	Agrícolas	Papel y cartón	Madera	Textil	Plástico	Cristal	Metales	Otros
UE	20 - 50	12 - 18	20 - 24	1 - 8	1 - 6	3 - 8	4 - 12	3 - 13	1 - 20
U.S.A	8 - 9	18 - 20	36 - 42	8 - 9		6 - 7	8 - 10	9 - 10	1 - 2

Tabla 7 Distribución porcentual de la composición de los RSU para la UE y U.S.A. Gendebien et.al., 1992

Se ha observado que existe gran diferencia en lo que respecta a los residuos de comidas, en algunos casos se ha visto superado el 30%, otra medida que se ha visto y que sería interesante tomar en cuenta es la misma clasificación para distintos niveles de ingresos, la información se muestra a continuación.

Composicion fisica de los RSU domesticos por ingresos, excluyendo reciclados			
Componente	Bajos	Medios	Altos
Residuos de comida	40 - 80	20 - 65	6 - 30
Papel	1 - 10	8 - 30	20 - 45
Cartón			5 - 15
Plásticos	1 - 5	2 - 6	2 - 8
Textiles	1 - 5	2 - 10	2 - 6
Goma	1 - 5	1 - 4	0 - 2
Cuero			0 - 2
Residuos de jardín	1 - 5	1 - 10	10 - 20
Madera			1 - 4
Orgánicos misceláneos			
Vidrio	1 - 10	1 - 10	4 - 12
Latas de hojalata			2 - 8
Aluminio	1 - 5	1 - 5	0 - 1
Otros materiales (inorganicos)			1 - 4
Suciedad, cenizas, etc	1 - 40	1 - 30	0 - 10

Gestion integral de residuos solidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil; Tabla 3.5

Tabla 8 Composición física de los RSU por ingresos

En el caso especifico de Cataluña, la Generalitat mediante la Agencia de Residuos de Cataluña, informa las estadísticas referentes a las cantidades de los residuos recolectados además de los destinos de los residuos, en este caso solo se informara el contenido total y los destinados a disposición final, la información se muestra a continuación.

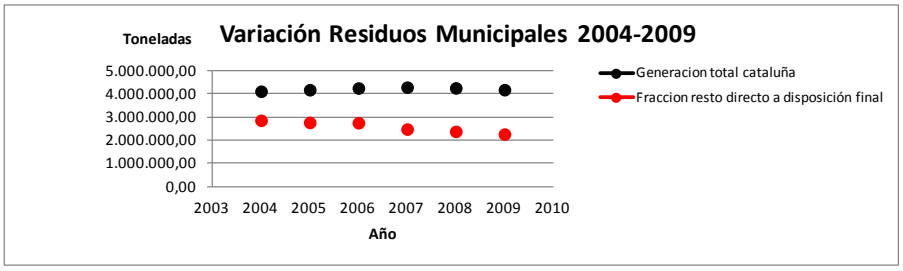

Ilustración 1 Variación de Residuos Municipales Cataluña en el rango del 2004 – 2009. Elaboración propia
Todos los datos son en toneladas. Los datos representados corresponden a recogidas en contenedor y recogida.

Se indica también el nivel de generación de residuos en una serie más extensa, donde también se incluye el aumento de la población y la razón de generación de los residuos, la grafica se adjunta a continuación.

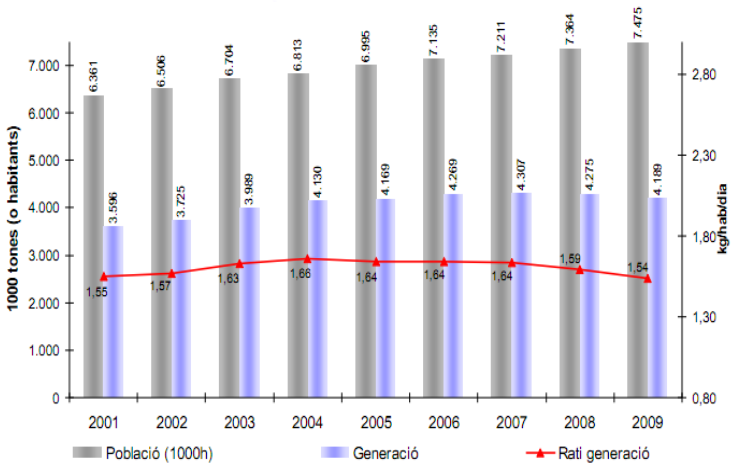

Ilustración 2 Evolución de la generación de residuos en Cataluña. Departamento de medio ambiente y vivienda.

Las características físicas más importantes de los RSU incluyen: peso especifico, el contenido de humedad, tamaño de partícula y distribución del tamaño, la siguiente tabla presenta información acerca de los pesos específicos típicos y el contenido de humedad (como porcentaje en peso) para varios tipos de residuos tal como son encontrados en los contenedores, compactados o no compactados.

	Peso específico, kg/m^3		Contenido de humedad, porcentaje en peso	
Tipos de residuos	Rango	Típico	Rango	Típico
Domésticos (no compactados)				
Residuos de comida mezclados	131 – 481	291	50 - 80	70
Papel	42 – 131	89	4 - 10	6
Cartón	42 – 80	50	4 - 8	5
Plásticos	42 – 131	65	1 - 4	2
Textiles	42 – 101	65	6 - 15	10
Goma	101 – 202	131	1 - 4	2
Cuero	101 – 261	160	8 - 12	10
Residuos de jardín	59 – 225	101	30 - 80	60
Madera	131 – 320	237	15 - 40	20
Vidrio	160 – 481	196	1 - 4	2
Latas de hojalata	50 – 160	89	2 - 4	3
Aluminio	65 – 240	160	2 - 4	2
Otros metales	131 – 1151	320	2 - 4	3
Suciedad, cenizas, etc.	320 – 1000	481	6 - 12	8
Cenizas	650 – 83	745	6 - 12	6
Basuras	89 – 181	131	5 - 20	15
Residuos de jardín domésticos				
Hojas (sueltas y secas)	30 – 148	59	20 - 40	30
Hierba verde (suelta y húmeda)	208 – 297	237	40 - 80	60
Hierba verde (húmeda y compacta)	593 – 831	593	50 – 90	80
Residuos de jardín (triturados)	267 – 356	297	20 – 70	50
Residuos de jardín (compostados)	267 – 386	326	40 – 60	50

Tabla 9 Peso especifico y humedad de los desechos

Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil; Tabla 4.1

Cuando se analizan los contenidos o caracterización más a fondo de los componentes de los residuos sólidos, se requiere de los denominados análisis elementales, donde se lleva a cabo la determinación del porcentaje de C (carbono), H (hidrogeno), O (oxigeno), N (nitrógeno), S (azufre) y cenizas. Los resultados del análisis elemental se utilizan para caracterizar la composición química de la materia

orgánica en los RSU. También se usan para definir la mezcla correcta de materiales residuales necesaria para conseguir relaciones C/N óptimas en los procesos de la conversión biológica.

Datos típicos del análisis elemental de los RSU						
	Porcentaje en peso (base seca)					
Componente	C	H	O	N	S	Cenizas
Residuos de comida	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5
Papel	43,5	6,0	44	0,3	0,2	6
Cartón	44	5,9	44,6	0,3	0,2	5
Plásticos	60	7,2	22,8			10
Textiles	55	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Goma	78	10		2		10
Cuero	60	8	11,6	10	0,4	10
Residuos de jardín	47,8	6	38	3,4	0,3	4,5
Madera	49,5	6	42,7	0,2	0,1	1,5
Inorganicos						
Vidrio	0,5	0,1	0,4	<0,1		98,9
Metales	4,5	0,6	4,3	<0,1		90,5
Suciedad, cenizas, etc	26,3	3	2,0	2	0,2	68

Gestion integral de residuos solidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil; Tabla 3.5

Tabla 10 Datos típicos del análisis elemental de los RSU

Por otro lado cuando la fracción orgánica de los RSU se va a utilizar como alimentación para la elaboración de productos biológicos de conversión, tales como compost, metano y etanol, la información sobre los nutrientes esenciales y los elementos del material residual para valorar los usos finales que puedan tener los materiales restantes después de la conversión biológica. Los nutrientes esenciales y los elementos encontrados en los principales materiales que conforman la fracción orgánica de los RSU se presentan en la siguiente tabla.

Constituyente	Unidad	Papel de periódico	Papel de oficina	Residuos de jardín	Residuos de comida
NH_4-N	ppm	4	61	149	205
NO_3-N	ppm	4	218	490	4278
P	ppm	44	295	3500	4900
PO_4-P	ppm	20	164	2210	3200
K	%	0,35	0,29	2,27	4,18
SO_4-S	ppm	159	324	882	855
Ca	%	0,01	0,1	0,42	0,43
Mg	%	0,02	0,04	0,21	0,16
Na	%	0,74	1,05	0,06	0,15
B	ppm	14	28	88	17
Se	ppm	-	-	<1	<1
Zn	ppm	22	177	20	21
Mn	ppm	49	15	56	20
Fe	ppm	57	396	451	48
Cu	ppm	12	14	7,7	6,9
Co	ppm	-	-	5	3
Mo	ppm	-	-	1	<1
Ni	ppm	-	-	9	4,5
W	ppm	-	-	4	3,3

Tabla 11 Nutrientes esenciales y otros elementos encontrados en la fracción orgánica de los RSU

Excluyendo el plástico, la goma y el cuero, la fracción orgánica de la mayoría de los RSU se puede clasificar de la siguiente forma:

a) Constituyentes solubles en agua, tales como azucares, féculas, aminoácidos y diversos ácidos orgánicos.
b) Hemicelulosa, producto de condensación de azucares con cinco y seis carbonos.
c) Celulosa, un producto de condensación de glucosa de azúcar con seis carbonos.
d) Grasas, aceites y ceras, que son esteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
e) Lignina, un material polimérico que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi ($-OCH_3$), cuya fórmula exacta aun no se conoce (presente en algunos productos de papel como periódicos y en tablas de aglomerado).
f) Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosa.
g) Proteínas, que están formadas por cadenas de aminoácidos.

Posiblemente la característica más interesante de los residuos orgánicos o de esta fracción, es que casi todos los componentes pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos relativamente inertes. La producción de olores y la generación de moscas están relacionadas también con la naturaleza putrefactible de los materiales orgánicos encontrados en los RSU.

La biodegradabilidad de los residuos orgánicos, la generación de moscas y olores son temas que se hace necesario tomar en cuenta, a continuación se hará una leve referencia a los parámetros principales a tener en consideración.

El contenido en sólidos volátiles (SV), determinado a 550°C, frecuentemente se utiliza como una medida de la biodegradabilidad de la fracción orgánica de los RSU. El uso de SV para la descripción de la fracción orgánica de los RSU es erróneo, porque algunos de los constituyentes orgánicos de los RSU son altamente volátiles pero bajos en biodegradabilidad (por ejemplo, el papel de periódico y algunos recortes de plantas). Alternativamente, se puede usar el contenido de lignina de un residuo para estimar la fracción biodegradable, mediante la siguiente relación:

$$BF = 0{,}83 - 0{,}028\ LC$$

Ecuación 1 Fracción biodegradable %

Donde,

BF : Fracción biodegradable expresada en base a los sólidos volátiles (SV)

0,83 : Constante empírica

0,082 : Constante empírica

LC : Contenido de lignina de los SV expresado como un porcentaje en peso seco

La biodegradabilidad de varios compuestos encontrados en los RSU, basados en el contenido de lignina, se muestran en la siguiente tabla. De estos se puede observar la diferencia de la biodegradabilidad entre papeles y los residuos orgánicos encontrados en los RSU.

Componente	Sólidos volátiles (SV) % de sólidos totales (ST)	Contenido de lignina (CL) porcentaje de	Fracción biodegradable (FV)
Residuos de comida	7 - 15	0,4	0,82
Papel periódico	94	21,9	0,22
Papel de oficina	96,4	0,4	0,82
Cartón	94	12,9	0,47
Residuos de jardín	50 - 90	4,1	0,72

Gestion integral de residuos solidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil; Tabla 4.7

Tabla 12 Contenido de sólidos, lignina y biodegradabilidad de la fracción orgánica en los RSU

El tema de olores y moscas podría considerarse una consecuencia de las condiciones de la descomposición de materia orgánica, las condiciones del vertedero o de las instalaciones de almacenamiento. Los principales componentes mal olientes de las instalaciones que manejan o almacenan RSU susceptibles a la descomposición son el sulfuro de hidrogeno (H_2S), sulfuros metálicos como por ejemplo el FeS o la reducción bioquímica de compuestos orgánicos que tienen un radical como el azufre, entre los que se tienen por ejemplo el metilmercaptano y el acido aminobutirico. El tema de las moscas se ve incrementado cuando se tienen condiciones de climas cálidos, además el adecuado control debe intervenir el ciclo de formación desde los huevos hasta su estado adulto.

2.1.5 **Transformaciones físicas, químicas y biológicas**

A continuación se hará una introducción al tema de las transformaciones físicas, químicas y biológicas que podrían sufrir los RSU, el tema se profundizara en el apartado donde el trabajo se direcciona a la valorización del biogás.
A modo de introducción se indicaran los principales procesos de transformación que se pueden utilizar para la gestión de los RSU, transformaciones naturales o inducidas, donde se incluyen medios físicos, químicos y biológicos.

2.1.5.1 Transformaciones físicas

Las principales operaciones que pueden producirse en la operación de sistemas de gestión de residuos incluyen 1) la separación de componentes, 2) la reducción de volumen y 3) la reducción de tamaño, no se considera un cambio de fase como podría ocurrir en el caso de las transformaciones químicas y biológicas.

La separación de componentes es una operación necesaria; en la separación de materiales reutilizables y reciclables de los RSU, en la separación de contaminantes de materiales ya separados, en la separación de residuos peligrosos de los RSU, y cuando los productos de conversión y de energía sean recuperados de los residuos procesados.

La reducción de tamaño se conoce también como densificación, los mecanismos de compactación generalmente están ubicados en los mismos vehículos de recolección. De esta manera se aumenta la capacidad de recepción además de generar algunos productos tales como troncos para chimeneas a partir de papel y cartón. Para incrementar la vida útil de los vertederos, los residuos se compactan antes de ser cubiertos.

En la reducción se busca obtener un producto final uniforme y con una reducción de tamaño considerable, la reducción de tamaño no necesariamente implica una reducción de volumen.

2.1.5.2 Transformaciones químicas

Normalmente se implican procesos de cambio de fase, la idea es generar una reducción de volumen y/o recuperar productos de conversión, generalmente se consideran procesos como la combustión, pirolisis y la gasificación, básicamente procesos térmicos mediante la oxidación, este tipo de proceso no se considera con mayor detalle en este trabajo.

De forma general las reacciones se pueden resumir como:

$$Materia\ orgánica + O_2 en\ exceso \rightarrow N_2 + CO_2 + H_2O + O_2 + Cenisas + Calor$$

Ecuación 2 Combustión (Oxidación química)

Se podrían encontrar también productos en pequeñas cantidades como NH_3, SO_2, NO_X y otros gases.

Pirolisis (cracking térmico o destilación destructiva)

Cuando se lleva a cabo la pirolisis de la parte orgánica se tienen 3 fracciones de productos

a) Flujo de gas con H_2, CH_4, CO, CO_2 y otros gases según características del material.
b) Flujo de alquitrán y/o aceite que es liquido a temperatura ambiente y que contiene sustancias químicas tales como acido acético, acetona y metanol.
c) Carbonilla.

Para la celulosa ($C_5H_{10}O_5$) se tiene la siguiente reacción como característica de la pirolisis

$$3(C_6H_{10}O_5) \rightarrow 8H_2O + C_6H_8O + 2CO_2 + CH_4 + H_2 + 7C$$

Ecuación 3 Gasificación (Combustión parcial)

De la combustión parcial se obtienen principalmente un gas rico en CO, H_2 y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano.

2.1.5.3 Transformaciones biológicas

Las transformaciones biológicas de la fracción orgánica de los RSU se pueden utilizar para reducir el volumen y el peso del material; para producir compost y metano. Los principales organismos implicados en las transformaciones biológicas de residuos orgánicos son bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos. Estas se pueden llevar a cabo en presencia o ausencia de oxigeno, según la

disponibilidad de este. Las principales diferencias entre las reacciones de conversión aerobia y anaerobia están en la naturaleza de los productos finales y en el hecho de que sea necesario suministrar oxigeno.

Los procesos biológicos más utilizados en la conversión de la fracción orgánica son: el compostaje aerobio, la digestión anaerobia y la digestión anaerobia de sólidos en alta concentración.

a) Compostaje aerobio: Si la fracción orgánica de los RSU se abandona, sufrirá descomposición, la extensión y el periodo de tiempo necesario para esto dependerá de la naturaleza del residuo, del contenido de humedad, disponibilidad de nutrientes y de otros factores ambientales. En condiciones controladas, los residuos de jardín y la fracción orgánica, se pueden convertir en un residuo orgánico estable conocido como *compost,* en un periodo de tiempo razonablemente corto (de 4 a 6 semanas), se representa por la siguiente ecuación.

$$Mat.org\acute{a}nica + O_2 + Nutrientes \rightarrow Nuevas\ c\acute{e}lulas + Materia\ org\acute{a}nica\ resistente +$$

$$CO_2 + H_2O + NH_3 + SO_4^{-2} + Calor$$

Ecuación 4 Reacción correspondiente al proceso de compostaje

b) Digestión anaerobia: La porción biodegradable de la fracción orgánica de los RSU se puede convertir biológicamente bajo condiciones anaerobias en un gas que contiene CO_2 y CH_4, la conversión se representa por la siguiente ecuación.

$$Mat.org\acute{a}nica + H_2O + Nutrientes \rightarrow Nuevas\ c\acute{e}lulas + Materia\ org\acute{a}nica\ resistente$$

$$+CO_2 + CH_4 + NH_3 + H_2S + Calor$$

Ecuación 5 Ecuación correspondiente a la digestión anaerobia

El metano y dióxido de carbono constituyen la mayoría de las veces más del 99% del gas total producido.

2.1.6 Identificación de promotores e inhibidores de la actividad metanogénica

En este apartado se mencionaran los principales agentes que se consideran importantes en el proceso de transformación biológica, específicamente de la actividad metanogénica, de manera superficial, pues más adelante se detallara el proceso completo.

Como se mencionará más adelante, la generación de los principales gases del vertedero y la variación de la generación, se produce en cinco o quizás menos fases secuenciales. Entre los principales promotores e inhibidores se consideran la distribución de los componentes orgánicos en el vertedero, la disponibilidad de nutrientes, contenido de humedad y el paso de esta por el relleno o el grado de compactación inicial. Estas características condicionan por ejemplo la proporción de C/N y el balance de los nutrientes, así por ejemplo la falta de humedad disponible retardara la generación de gases.

2.2 Rellenos sanitarios

La evacuación segura y fiable, a largo plazo, de los residuos sólidos es un componente importante y fundamental de la gestión integral de los residuos. En este sentido los rechazos de los residuos sólidos son componentes de los residuos que se reciclan, que quedan después del procesamiento en una instalación para la recuperación de productos de conversión y/o energía.

La planificación, el diseño y la operación de los vertederos implica la aplicación de diversos principios científicos, ingenieriles y económicos. Los temas que se incluyen más adelante envuelven desde el diseño y tipos de vertederos hasta el método de funcionamiento considerando vertido, localización gestión de efluentes y tocando temas de la clausura y planes de manejo así como de la explotación.

Existe una diferencia respecto a los términos que se manejaran y requiere una explicación, la que se hará a continuación, vertederos son las instalaciones físicas utilizadas para la evacuación, en los suelos de la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos. Antes se usaba el término "vertedero sanitario controlado" para denominar un vertedero en el que se cubrían los residuos puestos en el vertedero al finalizar un día de operación. Actualmente, "vertedero sanitario controlado" se refiere a una instalación ingenieril para la evacuación de RSU, diseñada y explotada para minimizar los impactos ambientales y sobre la salud pública.

2.2.1 Planteamiento general de los componentes de un vertedero

Se incluyen en esta descripción aspectos a considerar tales como la planificación, diseño, explotación, clausura y control post clausura de vertederos.

Se identifica el vertido como el proceso mediante el cual se depositan los residuos sólidos en un vertedero. El vertido incluye la supervisión del flujo de residuos entrante, la colocación y compactación de los residuos, y la implantación de instalaciones para el control y la supervisión ambiental. Se utiliza el término celda para describir el volumen de material depositado en un vertedero durante un periodo de explotación, normalmente un día, en una configuración como la que se muestra a continuación.

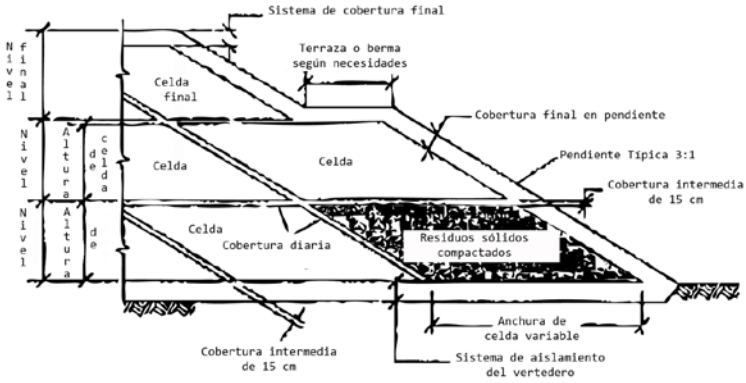

Ilustración 3 Vista en sección de un vertedero sanitario controlado. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil; Tabla 3.5

Normalmente, los vertederos se conforman en una serie de niveles, se utilizan terrazas cuando la altura del vertedero excede de 125 cm a 2 m, estas se utilizan para mantener la estabilidad de la pendiente del vertedero, para la localización de canales para el drenaje del agua superficial, y para la localización de tuberías destinadas a la recuperación del gas de vertedero. El nivel final incluye la capa de cubrición, esta se aplica a toda la superficie del vertedero después de concluir todas las operaciones del vertido.

La cubierta final consiste en múltiples capas de tierra y/o materiales como geomembranas diseñadas para facilitar el drenaje superficial, interceptar aguas filtrantes y soportar la vegetación superficial.

Los líquidos que se acumulan en el fondo de un vertedero se conocen como lixiviados, en vertederos profundos, frecuentemente se recoge el lixiviado en puntos intermedios. Este se forma debido a las precipitaciones, por la escorrentía no controlada y por el agua de irrigación que entra en el vertedero, también se pueden incluir aguas inicialmente contenidas en los residuos, así como aquellas procedentes de aguas subterráneas que se infiltren. El lixiviado contiene diversos constituyentes derivados de la solubilización de los materiales depositados en el vertedero y de los productos de reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del vertedero.

El gas de vertedero es la mezcla de los gases que se encuentran dentro de un vertedero, contiene principalmente CO_2 y CH_4, gases producto de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica biodegradable de los RSU. Otros componentes son el N_2 y O_2 atmosférico, NH_3 y compuestos orgánicos en cantidades traza.

Para el tema del recubrimiento se utilizan materiales naturales o fabricados, que se utilizan tanto en el fondo como en las superficies laterales del vertedero, suelen estar formados por capas de arcilla compactada y/o geomembranas diseñadas para evitar la migración del lixiviado y del gas de vertedero.

Las instalaciones para el control del vertedero incluyen recubrimientos, sistemas de recogida y extracción del lixiviado, sistemas de extracción y recogida del gas de vertedero, capas diarias y finales de cobertura.

La supervisión ambiental implica actividades, asociadas con la recogida y el análisis de la muestras de agua y de aire, se utilizan para supervisar el movimiento de los gases y el lixiviado del vertedero en la zona de vertido.

La clausura del vertedero es el término utilizado para describir los pasos que se deben seguir para cerrar y asegurar la zona del vertedero una vez completada la operación de relleno. El mantenimiento post clausura se refiere a las actividades asociadas con la supervisión y mantenimiento a largo plazo del vertedero completado (normalmente 30 a 50 años).

2.2.2 **Influencia en la producción de biogás y condiciones optimas**

Una determinada muestra de residuo genera una mayor o menor cantidad de biogás dependiendo de diferentes factores tales como por ejemplo su composición, existen también factores que influyen no en la cantidad a generar sino en la velocidad de generación, en este sentido la falta de humedad disminuye la velocidad de la degradación anaerobia, pero se mantiene por más tiempo la

metanogénesis, pues la cantidad final de biogás es la misma, estos temas se discutirán con mayor profundidad más adelante.

El conocimiento de la meteorología de la zona donde está ubicado el vertedero es de suma importancia. Tanto la temperatura ambiente como el índice de precipitaciones influyen en la degradación anaerobia de los residuos.

Como se verá con más detalle en capítulos posteriores, un contenido alto de humedad posee un carácter positivo desde el punto de vista de la generación de biogás (Attal *et.al., 1992; Suflita et al., 1992).* Existe una relación directa entre la humedad de los residuos y su tiempo de degradación, pudiéndose afirmar que los vertederos de zonas húmedas producen un caudal mayor de gas durante el periodo de explotación que los de zonas secas. Una vez clausurado el vertedero, no obstante, cesan más pronto de producir metano (Marticoren *et.al.,* 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995).

Christensen *et.al.* (1996) establece un incremento exponencial en la velocidad de degradación de los RSU al incrementar el contenido de humedad entre un 25 y un 60%.

Un alto contenido de humedad permite que sustancias nutrientes presentes en una zona del vertedero se trasladen a otras donde son escasas. El pH debe mantenerse en torno a 7 para que la producción de metano no se detenga, siendo muy beneficioso un nivel alto de la humedad, pues permite el movimiento de sustancias con un efecto buffer sobre el pH. Finalmente, sustancias que son toxicas cuando alcanzan determinadas concentraciones se diluyen en el lixiviado, reduciendo su concentración a niveles en los que incluso pueden convertirse en nutrientes necesarios para la degradación anaerobia, como ocurre con los cationes de calcio, magnesio, etc. (Pacey y DeGier, 1986).

Si no hay precipitaciones durante un largo periodo de tiempo, la superficie del vertedero se puede agrietar y facilitar así la entrada de aire. La lluvia, por el contrario, hace que la superficie del vertedero sea más impermeable. Este fenómeno se acentúa con materiales de recubrimiento de tipo arcilloso, por sus propiedades expansivas. Según algunos autores, la entrada de aire podría llegar a frenar la producción de metano (Boger, 1986; Brown y Maunder, 1994). Antes de llegar a este extremo, no obstante, se producirá una fuerte caída en el nivel de metano del biogás recuperado, por la dilución del gas generado en el vertedero en la corriente de aire que penetra a través del terreno poroso.

En muchas referencias se hace mención o la recomendación de llevar a cabo la recirculación de lixiviados en los periodos estivales para mantener alta humedad de los residuos (Stegmann y Spendlin, 1986; Rao y Suflita, 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995), así como para lograr una superficie mas impermeable. No obstante, en ningún caso, la recirculación del lixiviado constituye un sistema de tratamiento valido en un vertedero controlado. El agua también podría producir problemas en el sistema de extracción del biogás, además de los problemas asociados a la condensación de la humedad del biogás, las chimeneas de extracción tienden a inundarse por encima del nivel freático del entorno, disminuyendo entonces el rendimiento de captación.

En el caso de la temperatura ambiente, la generación de biogás se ve influida, por ejemplo si la temperatura de los residuos está por debajo de los 10°C y sobre los 60°C, la producción de biogás cae

rápidamente, los rangos óptimos de temperatura de los residuos son: 20 a 45 °C para bacterias mesófilas y de 45 a 75 °C para termófilas (Pacey y DeGier, 1986). Las temperaturas habituales que se han medido en el interior de los vertederos están entre 20 y 50 °C (Stegmann y Spendlin, 1986; Suflita *et.al.,*1992; Rao y Suflita, 1993). Suflita *et.al.,*(1992) registra temperaturas hasta de 62,3°C en el interior de un vertedero. Las variaciones de la temperatura ambiente influyen en vertederos poco profundos, con menos de 10 m (Attal *et.al.,*1992).

2.2.3 Influencia de los métodos, aspectos variables y las características de operación de los vertederos en la producción de biogás

Las características de los métodos y procedimientos con los que se lleva a cabo la explotación de un vertedero tienen influencia directa en el volumen y características del biogás generado, a continuación se hace referencia a los aspectos más relevantes en este sentido.

2.2.3.1 Cantidad de RSU gestionable

El volumen de biogás generado en un vertedero depende de la cantidad de materia orgánica depositada en el mismo. Interesa conocer no solo la cantidad total vertida sino el ritmo anual de deposición desde el inicio de las operaciones del vertedero hasta su clausura.

Cuando se estudia un vertedero en operación, se debe realizar una hipótesis de la evolución futura del vertido, para ello es necesario evaluar.

La tendencia demográfica en la zona usuaria del vertedero

La existencia de movimientos de población estacionales

Las tendencias en la cantidad de basura generada por habitante y día

La posibilidad de vertidos industriales asimilables a urbanos

La posibilidad de que la empresa gestora o la administración, impongan modelos de tratamiento de los residuos distintos al vertido controlado

La vida útil del vertedero

Según los datos que se han mencionado en secciones anteriores de este trabajo, para España y específicamente para Cataluña se han de conocer los ratios de producción de residuos, en este caso según la serie analizada se podría estimar un valor de 1,26 kg/hab/día, así también se conoce que la tendencia demográfica es positiva. Conociendo estos datos y el tiempo de vida útil de un vertedero es posible hacer una estimación de ingresos anuales de residuos al vertedero.

También se ha hecho referencia a la distribución de los tipos de residuos, cabe mencionar y adicionar, que la admisión de lodos de depuradoras de plantas de tratamiento de aguas es recomendable desde el

punto de vista de la generación de biogás, debido a su alto contenido de humedad, siempre que no contengan sustancias toxicas o que puedan modificar el pH.

Así también se debe mencionar que la presencia de papel, cartón y en general todos los derivados de la madera forman un grupo de residuos orgánicos de lenta degradación. Ello es debido a que presentan en su composición química moléculas orgánicas no solubles en agua. Para ser degradadas biológicamente, es necesaria su hidrólisis previa. Los restos de comida, así como los de jardín forman el grupo de los residuos orgánicos de degradación rápida. Son residuos de alto contenido en humedad y su vertido en grandes cantidades en vertederos jóvenes puede retrasar, paradójicamente, la formación de metano. Ello se debe al descenso del pH que produce la alta actividad microbiana inicial. Superada esta fase, la producción de biogás se recobra con fuerza (Christensen *et. al.,* 1996). El resto, vidrio, metales, cenizas, textiles, etc. son materiales no biodegradables.

Los RSU generados en zonas rurales tienen una composición distinta a los materiales en la ciudad. Así, por ejemplo, en las zonas rurales el contenido en materia orgánica es menor, debido al aprovechamiento de ésta en la alimentación de animales. Zonas residenciales, aéreas de servicios o zonas industriales originan también distintos tipos de residuos. El modo de vida moderno aumenta la proporción de todo tipo de embalajes (vidrio, plásticos, metales, papel y cartón) y disminuye la de escorias y cenizas (debido a la masificación en el uso de gas y electricidad).

Los residuos en verano tienen mayor contenido de frutas y verduras, mientras que en invierno aumentan escorias y cenizas. En el caso de zonas turísticas, en la época estival aumentara el porcentaje de embalajes. La inclusión de vertidos industriales no asimilables, podrían actuar de manera toxica y detener la degradación de la materia orgánica y los asimilables a urbanos pueden no ser biodegradables (restos de construcción, por ejemplo) o presentar un alto contenido en materia orgánica (residuos forestales o de plantas depuradoras de aguas residuales).

El vertido de lodos de depuradora es considerado positivo por su alto contenido en humedad, nutrientes e incluso biomasa activa. Este último factor es menos importante cuando las condiciones metanogénicas ya están presentes en el vertedero. Si los lodos tienen un pH bajo, pueden tener un efecto negativo. La caracterización típica de los residuos se ha detallado anteriormente tanto para la UE como para U.S.A.

2.2.3.2 Contenido de humedad de los RSU

La degradación de la materia orgánica se ve favorecida por la presencia de agua (Attal *et. al*., 1992; Suflita *et. al*., 1992). La producción de metano exige un contenido en humedad de los residuos depositados de al menos un 40 – 60 % (Pacey & DeGiere, 1986; Rao y Suflita, 1993; Brown & Maunder, 1994). Contenidos altos de humedad aceleran la velocidad de degradación de las basuras y, por tanto, la producción de biogás (Marticorena *et. al*., 1993; Pohland & Al-Yousfi, 1995). No obstante los niveles altos de humedad en los residuos plantean problemas en el sistema de captación del biogás (Eden & Eden, 1992). La presencia de agua en el vertedero es positiva porque facilita la presencia de los microorganismos responsables de la degradación anaerobia en todos los puntos del vertedero, diluye la

concentración de sustancias tóxicas, regula el pH y facilita la difusión de nutrientes (Pacey & DeGier, 1986).

Parte del agua que entra al vertedero lo hace directamente con las basuras depositada. Estas contienen porcentajes de humedad distintos según su origen o la época del año. Los restos de comida y jardín, así como los lodos de depuradoras, aportan la mayor parte de esta agua (Pacey & DeGier, 1986). Si durante la recogida de los residuos están expuestos a las inclemencias atmosféricas, el contenido de humedad aumentará. El contenido de humedad de los RSU antes de ser depositados puede variar entre valores tan dispares como 25 y 60% en peso (Gendebien, 1992 citando a Dorfman, 1985). Un contenido del 35% se podría considerar normal, en los detalles referentes a los datos reportados donde se hace referencia al peso especifico, se calcula una humedad promedio de un 23,5 % aproximadamente.

2.2.3.3 Nutrientes

El ecosistema anaerobio necesita, además de materia orgánica, de otros nutrientes, entre los que destacan el nitrógeno y el fosforo. Todos los micronutrientes necesarios, como el azufre, calcio, magnesio, potasio, hierro, cinc, cobre, cobalto, molibdeno y selenio son habitualmente abundantes en el vertedero. El ecosistema anaerobio precisa de una menor cantidad de nitrógeno y fosforo que el aerobio. El ratio optimo para el ecosistema anaerobio entre materia orgánica (expresada como DQO), nitrógeno y fosforo es de 100:0,44:0,08 (Christensen *et. al*., 1996, citando a McCarty, 1964). Aunque considerando un conjunto, el vertedero dispone de suficiente cantidad de nitrógeno y fosforo, la heterogeneidad del mismo puede provocar la existencia de zonas donde sean escasos. El fosforo es, aunque solo en estas circunstancias limite, el nutriente con más probabilidades de escasear.

2.2.3.4 Inhibidores de la actividad metanogénica

Existen sustancias contenidas en los residuos capaces de inhibir el proceso de la metanogénesis. Entre ellas, las más importantes son algunas sales, sulfuros, metales pesados y algunos compuestos orgánicos (Pacey & DeGier, 1986; Rao & Suflita, 1993). El lixiviado generado por sales presentes en los residuos puede tener una alta concentración de cationes. Aunque en bajas concentraciones resultan estimulantes de la actividad metanogénica, en altas concentraciones su efecto es inhibitorio. Así, son tóxicos niveles de Na^+ por encima de 3500 mg/l, de K^+ por encima de 2500 mg/l, de Ca^{2+} por encima de 2500 mg/l y de NH_4^+/NH_3 superiores a 1500 mg/l. estos niveles, no obstante rara vez se alcanzan en el vertedero.

Los metales pesados son tóxicos a concentraciones mucho más bajas. El cobre, Cu (II) a 1 mg/l, el cinc, ZN (II) a 5 mg/l, el níquel, Ni (II) a 2 mg/l y el cadmio, Cd (II) a tan solo 0,02 mg/l.

Anteriormente se ha hecho referencia a las cantidades y tipos de compuestos orgánicos que se podrían encontrar típicamente en los RSU, a continuación se mencionan aquellos que podrían generar efectos negativos en la generación de biogás. Concentraciones tan elevadas en estos compuestos solo se pueden producir si en el vertedero se admiten residuos de origen industrial.

Compuesto	Concentracion (mg/l)
Acetaldhído	440
Acroleína	20 - 50
Ácido acrílico	864
2-Etil-1-Exanol	500 - 1000
Formaldehído	50 - 100

Tabla 13 Compuestos orgánicos inhibidores de la metanogénesis. En condiciones de laboratorio se observa una reducción del 50% en la producción de biogás con las concentraciones indicadas. Gendebien 1992.

Cuando la concentración de sulfatos es alta la producción de metano cae dramáticamente. Ello no se debe a ningún efecto toxico de los sulfatos sobre las bacterias metanogénicas, sino simplemente a una competencia entre los dos grupos de bacterias por los mismos nutrientes. La mayor energía liberada en la reducción de los sulfatos favorece el predominio de las bacterias sulfato-reductoras.

Se ha comentado que la adición de los lodos de depuradoras con un pH bajo puede afectar negativamente a la generación de metano. Lo mismo ocurre con la recirculación de lixiviados. Ello se debe a que las bacterias metanogénicas operan eficientemente solamente en un estrecho intervalo de pH, entre 6 y 8. El intervalo tolerado por las bacterias fermentativas y acetogénicas es mayor. Si las bacterias metanogénicas tienen actividad baja por un descenso del pH, el consumo de hidrogeno y acido acético será bajo. La acumulación consiguiente de ácidos orgánicos volátiles hará caer aun más el pH, lo que puede afectar aun mas su actividad, pudiéndose llegar al cese de la actividad metanogénica. En cuanto a las bacterias sulfato-reductoras, toleran un intervalo de pH mayor, entre 5 y 9.

El descenso en el pH también puede ser provocado por el vertido de grandes cantidades de residuos de degradación rápida, como restos alimenticios o de limpieza de jardines.

2.2.3.5 Diseño del vertedero

Un factor importantísimo en el manejo de un vertedero, es la consideración de las condiciones de diseño y operación, en este sentido al diseñarse un vertedero, la ubicación de este y las condiciones geográficas optimas son un punto crítico, pues se debe tomar en cuenta por ejemplo las capacidades del sitio y/o depresiones naturales del terreno, valles u hondonadas, la relación de la superficie exterior y el volumen de los residuos depositados es baja. Esto favorece la generación de biogás, pues garantiza un aislamiento térmico natural del vertedero respecto de la temperatura ambiental. También favorece la recuperación posterior del gas, siempre que el vaso de vertido haya sido correctamente impermeabilizado.

El caso contrario se representa por los vertederos en zonas llanas, donde las capas de residuos alcanzan cotas superiores a la del terreno circundante. Evidentemente, la relación superficie/volumen es ahora mayor y, por tanto, el vertedero está más expuesto a las condiciones térmicas ambientales. También será necesario un mayor número de sondas de captación y cada una de ellas recuperara un caudal menor.

El análisis topográfico del vertedero debe incluir el plano de las curvas de nivel inicial del sitio y los planos de evolución de vertido, al menos en la situación actual y final del vertedero. De esta forma, es posible dividir el vertedero en distintas zonas según la antigüedad y la profundidad de los residuos. Esta división permite decidir la posición de la sonda de muestreo de modo que sean lo más representativas. La zona de profundidad inferior a 10 m es, en principio, no solo la de menor producción de biogás sino también donde las captaciones tienen menor eficiencia. En estas zonas la temperatura de los residuos se ve afectada por la temperatura ambiente, como ha sido mencionado antes, pudiendo descender por debajo del rango mesófilo cuando se producen heladas (Pacey, 1986). Brown & Maunder (1994) fijan en 8 m la profundidad mínima de los residuos necesaria para una adecuada degradación mientras que el UK Departament of enviroment (1994) lo sitúa en 5 m. En el estudio llevado a cabo por Attal *et. al*., (1992) en el vertedero de Villeparisis (Paris, Francia), con una temperatura ambiente de 14°C, se ha registrado un aumento de la temperatura de los residuos en los primeros 10 m, desde 26 a 50 °C, manteniéndose constante en los 15 m restantes hasta el fondo del vertedero. Es posible que en este vertedero la flora bacteriana de la zona superficial estuviese en el rango mesofilo, mientras que en la zona profunda estuviese en el rango termófilo.

A continuación se mostrara el perfil de temperaturas de 2 vertederos, en este caso, la figura con un perfil más angosto y profundo, presenta condiciones más favorables para la generación y recuperación del biogás.

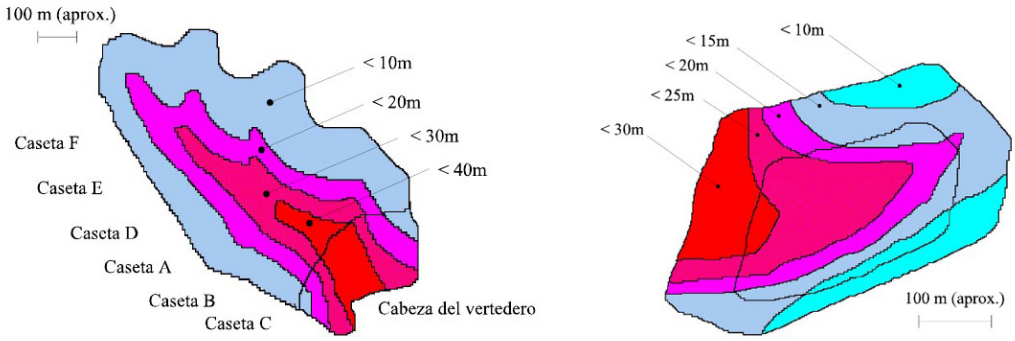

Ilustración 4 Perfiles de temperatura de 2 vertederos, La Zoreda y Bratovo de izquierda a derecha respectivamente.

A continuación se muestra un esquema de las principales operaciones y procesos en un vertedero.

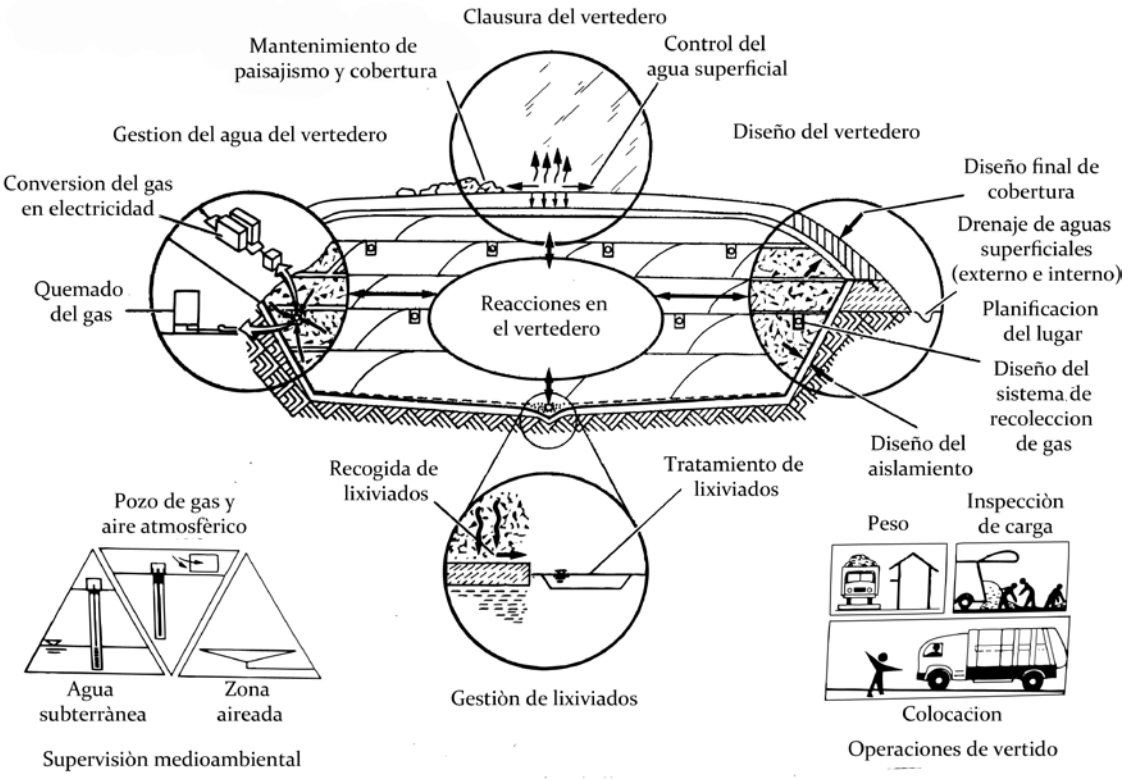

Ilustración 5 Esquema de operaciones y procesos en un vertedero. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil.

2.2.3.6 Disposición o relleno por capas

Para la explotación del vertedero será necesario acondicionar la zona de vertido no solo para evitar la contaminación de aguas subterráneas sino también para evitar la migración del biogás hacia zonas alejadas. Al ser más liviano que el aire y generarse de forma continua, el biogás tiende a salir preferentemente a través de la cobertura superficial del vertedero. Pero si la superficie presenta poca porosidad, debido a un aguacero reciente o una helada, el gas tendera a migrar lateralmente, con el consiguiente riesgo en las edificaciones colindantes al vertedero. Se ha llegado a detectar biogás en puntos alejados 180 m del vertedero (Gendebien *et al*., 1992) e incluso entre 300 y 400 m (UK Departament of the Enviroment, 1994). Naturalmente, si es adecuadamente impermeabilizado en su etapa de construcción, este riesgo se evita.

Respecto a las condiciones en que se lleva a cabo el vertido de los residuos, existen diferentes técnicas y que dependen de la orografía del terreno, las principales son:

- Trinchera o zanja
- Relleno por área
- Celdas

Antes se ha mostrado un esquema de una sección de una celda, a continuación se hará una breve explicación de cada técnica.

En la trinchera o zanja se abren trincheras apartando la tierra extraída para posteriormente utilizarla como material de relleno. Las basuras son extendidas y trituradas in situ. En el relleno por área, los residuos se disponen en terrazas sobre el terreno, esta técnica se utiliza cuando el terreno forma depresiones naturales. En la técnica de relleno en celdas, las basuras se vierten en áreas previamente delimitadas con diques de tierra, esta técnica se usa en todo tipo de entornos topográficos. Las operaciones de vertido, extensión, compactado, trituración de los residuos y cobertura, se llevan a cabo de forma común entre los diferentes tipos de técnica, con las correspondientes variaciones debidas a las diferencias geométricas. Los siguientes esquemas representan las etapas: a) excavación y recubrimiento; b) vertido; y c) recubrimiento de un vertedero.

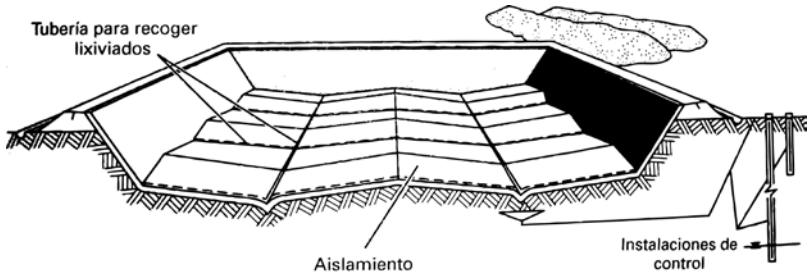

Ilustración 6 Sección de la excavación y recubrimiento

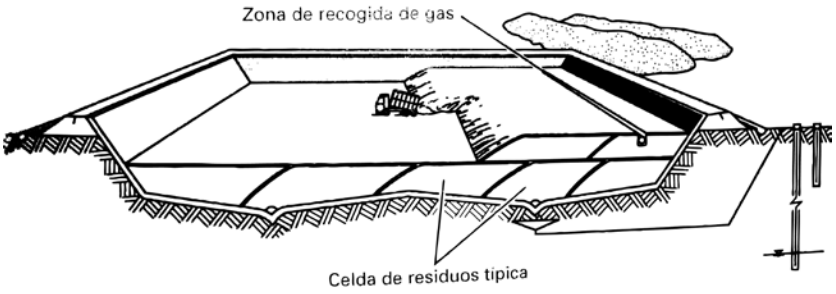

Ilustración 7 Sección del vertido de residuos

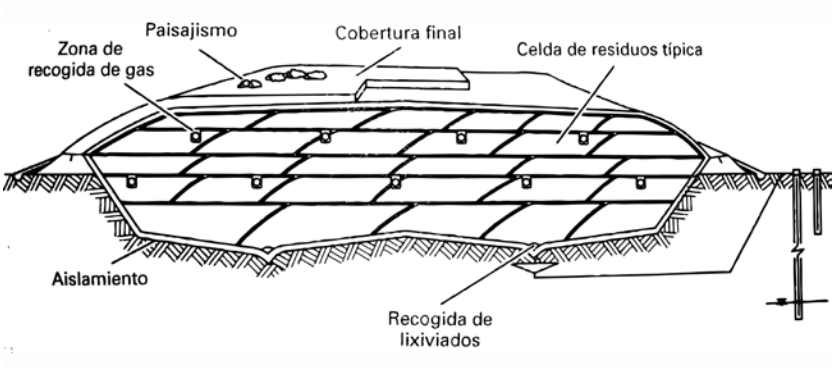

Ilustración 8 Sección del vertedero clausurado

La altura de las capas debe estar bien controlada, pues se podrían generar grietas en la superficie del vertedero así como quiebres internos de los conductos del biogás y lixiviados, generados principalmente por la aparición de esfuerzos cortantes debido a los asentamientos de forma diferenciada. La experiencia de distintos vertederos indica que la altura de las capas no debe superar los 3 m, recomendándose 2,5 m a fin de evitar estos problemas (Gendenbien *et al*., 1992). Un menor espesor de la capa de residuos se traduce también en una mayor compactación de los mismos.

2.2.3.7 Compactación

Se lleva a cabo aplastando los residuos usando vehículos especiales, en el proceso influye el tamaño de la maquinaria, el número de pasadas, la pendiente y el espesor de la capa. El proceso aumenta la vida útil del vertedero, al reducir los requerimientos de espacio; facilita el movimiento de vehículos; reduce el riesgo de asentamientos o movimientos de basura; reduce la presencia de moscas y parásitos; reduce el riesgo de fuego en el interior del vertedero y los eventuales incendios superficiales y por ultimo aumenta la generación del biogás.

Se considera como el proceso más idóneo el depósito de los residuos en forma compactada, en fardos, maximizando la densidad, pero se debe controlar el contenido de humedad ya que la elevada densidad no permite alcanzar el grado de humedad óptimo para la fermentación de la materia orgánica, pudiendo llegar a inhibirse la producción del biogás (Pacey & DeGier, 1986). Los RSU tienen una densidad, sin compactar, entre 140 y 180 kg/m^3. El camión de recolección aumenta la densidad, compactando, hasta el rango de 240 a 420 kg/m^3, en el vertedero con una compactadora moderada se podrían lograr densidades en el rango de 300 a 700 kg/m^3.

2.2.3.8 Trituración

En este proceso se desgarran las bolsas, se trocea el contenido antes de la compactación y posterior recubrimiento con material inerte. En general es la misma maquinaria de compactación (ruedas y cadenas) la que lleva a cabo esta labor a la vez que compactan, la trituración aumenta la superficie de los residuos expuesta a la actividad de las bacterias (Pacey & DeGier, 1986; Rao & Suflita, 1993). Se aumenta también la homogeneidad. La gran generalidad de recolección donde se utilizan bolsas plásticas es la principal barrera a romper para desgarrar, si no fuera así, la producción de biogás podría decrecer.

La trituración de los RSU, al facilitar la acción biológica, puede provocar una fase inicial acida más intensa, retrasándose la metanogénesis. A largo plazo, no obstante, el efecto es positivo, ya que la hidrólisis, aunque es la etapa limitante de la degradación anaerobia, se completa en un tanto por ciento mayor con una buena trituración.

2.2.3.9 Cobertura

La cobertura, también llamada recubrimiento, es la operación por la cual las basuras depositadas y ya compactadas son tapadas diariamente con material inerte. El recubrimiento diario de las basuras

minimiza el vuelo de papeles, plásticos y otros elementos livianos, posibilita el movimiento de vehículos; reduce olores en el vertedero; evita el contacto de los residuos con el oxigeno del aire reduciendo la fase aerobia inicial; inhibe la aparición de roedores y aves; reduce la entrada de agua de lluvia; y reduce el riesgo de incendios.

La cobertura final es de gran importancia para la clausura y recuperación final del vertedero. La calidad y espesor de esta cobertura depende del uso que se le vaya a dar al lugar. Generalmente la capa consiste, de abajo hacia arriba, de un drenaje de biogás, una zona impermeable de agua, una zona de drenaje de aguas y una capa final de tierra con vegetación. Se puede instalar una doble barrera que incluya una zona de recogida de filtraciones y lixiviados intermedia.

El recubrimiento diario, determinara el tipo de proceso biológico que tendrá lugar en el vertedero. Para la obtención del biogás es imprescindible la no aireación de los residuos y, por tanto, su cubrición periódica. En cuanto al espesor de la capa de recubrimiento, de ser el suficiente para que la degradación de los residuos no se vea afectada por los cambios meteorológicos y, además, no se facilite la penetración de aire.

El tipo de material de recubrimiento determinara en algunos casos el espesor óptimo que tendrá que tener la capa, en algunos casos se utiliza una mezcla de escoria de y tierra extraída de los laterales del vertedero, en otros casos se utiliza tierra arcillosa, el espesor de las capas es suficiente entre 20 y 40 cm.

2.2.3.10 Captación y tratamiento de lixiviados

Ya se ha comentado el carácter beneficioso y perjudicial que tiene la recirculación de los lixiviados, el efluente constituye el canal a través del cual los microorganismos responsables de la generación del biogás colonizan todas las zonas del vertedero, estos microorganismos, además, necesitan un medio húmedo para su desarrollo.

Se considera una medida positiva para mantener alta humedad de los residuos y potenciar así la generación de biogás (Rao & Suflita, 1993; Brown & Maunder, 1994).

Si el lixiviado no es recirculado y presenta niveles de DBO altos, el resultado es una pérdida de nutrientes negativa para la metanogénesis (UK Departament of the Enviroment 1994). En zonas húmedas, la recirculación es beneficiosa durante los primeros años del vertedero, hasta que el proceso biológico se estabiliza. No obstante, si el pH del lixiviado es bajo, se debe ajustar mediante sustancias moderadoras (hidróxido de sodio por ejemplo). Cuando el vertedero mantiene niveles de humedad aceptables y la DBO del lixiviado es baja, la recirculación tiene pocos efectos. En vertederos con climas secos, la recirculación continúa siendo positiva durante periodos de tiempo más largos, pues la metanogénesis es más lenta (Christensen *et al*., 1996).

Se utiliza material arcilloso para la cobertura, pues la recirculación de lixiviados por irrigación provoca el hinchamiento de las arcillas y, con ello, mejora el carácter impermeable del terreno, esto redunda en un mayor rendimiento del sistema de recuperación del biogás.

No se debe llegar a la inundación del vertedero, pues ello hace imposible la recuperación del biogás en los pozos de captación y puede provocar migraciones de biogás disuelto en el lixiviado de difícil control, además de otros riesgos para el vertedero como la inestabilidad de taludes o la fuga de lixiviados a través del fondo del vaso de vertido.

La recirculación de lixiviados no es, en ningún caso, un método valido de tratamientos de los mismos, siempre es necesario disponer de plantas de tratamientos especificas para tal fin.

2.2.4 Sistema de extracción del biogás

Se considera también la influencia del sistema de captación del biogás, la extracción se lleva a cabo mediante sondas sometidas a cierta depresión relativa, que podría inevitablemente provocar la entrada de aire al interior del vertedero, aunque el aire penetra superficialmente y solo en el pozo de captación, la presencia de oxigeno altera las condiciones anaerobias en la zona. Si el vertedero es sometido a una sobre-extracción de biogás, la entrada de aire puede repercutir negativamente en el caudal y la composición del biogás generado.

No se debe confundir el caudal generado con el caudal recuperado por el sistema de extracción, la tasa de recuperación depende del correcto diseño y operación de la red de captación y del grado de impermeabilidad del material utilizado en la cobertura superficial del vertedero y en el sellado del vaso de vertido.

Es habitual observar un incremento en el caudal de biogás recuperado inmediatamente después de un aguacero que interrumpa un periodo de sequia. Aunque la lluvia es positiva para la metanogénesis, sus efectos no son inmediatos. En realidad, la causa del incremento del caudal recuperado esta en el hinchamiento de la arcilla de cobertura y su inminente mejora de la impermeabilidad, una helada nocturna tiene el mismo efecto y por ende también aumenta el caudal de biogás recuperado. Al construir una barrera impermeable superficial, se aumenta el caudal recuperado.

Capitulo 3

3.1 Estimación de la producción del biogás

Se podría comparar un vertedero con un reactor biológico, con residuos y agua como principales entradas, y con gases de vertedero y lixiviados como principales salidas. El material almacenado en el vertedero incluye: material orgánico parcialmente biodegradado y otros materiales inorgánicos de los residuos originalmente colocados en el vertedero.

Se emplean los sistemas de control de los gases del vertedero para prevenir el movimiento indeseable hacia la atmosfera de los gases del vertedero, o el movimiento lateral o vertical a través del suelo circundante. Se puede utilizar el gas recuperado, y es el motivo de este trabajo, para producir energía, o

se puede quemar bajo condiciones controladas, para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero como el metano y el dióxido de carbono.

El metano y el dióxido de carbono son los principales gases procedentes de la descomposición anaerobia de los componentes biodegradables de los residuos orgánicos en los RSU. Cuando el metano está presente en el aire en concentraciones en el rango de 5 - 15 %, es explosivo. Como en el vertedero solo están presentes cantidades limitadas de oxigeno, cuando las concentraciones de metano llegan a ese nivel crítico hay poco peligro de explosión. Sin embargo, pueden formarse mezclas de metano que están dentro del rango explosivo si el gas del vertedero migra fuera del lugar y se mezcla con el aire. La concentración de los gases que pueden escaparse en el lixiviado dependerá de su concentración en la fase gas cuando se pone en contacto con el lixiviado, esta concentración se estima gracias a la Ley de Henry. Como el dióxido de carbono afecta al pH del lixiviado, se deben conocer los datos referentes al equilibrio carbónico, así se podría estimar el pH del lixiviado.

3.1.1 Composición y características del gas de vertedero

El gas de vertedero o biogás está compuesto de varios gases que están presentes en grandes cantidades (principales) y de varios gases que están presentes en pequeñas cantidades (secundarios). Los principales proceden de la descomposición de la fracción orgánica de los RSU. Algunos de los oligogases, aunque en pequeñas cantidades, pueden ser tóxicos y podrían presentar riesgos para la salud pública.

3.1.1.1 Constituyentes principales

En los gases principales se incluyen, metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrogeno (H_2), sulfuro de hidrogeno (H_2S), amoniaco (CH_3), nitrógeno (N_2) y oxigeno (O_2). Las concentraciones se indican en la siguiente tabla, otro tipo de gases, pero en cantidades traza lo conforman los denominados compuestos orgánicos volátiles (COV), sin embargo, la frecuencia de concentraciones significativas de COV en el gas de vertedero está asociada a vertederos antiguos, que aceptaban residuos industriales y comerciales que contenían COV.

La información referente a la distribución porcentual típica de los distintos componentes se indica en la siguiente tabla.

Componente	Porcentaje (base volumen seco)*
Metano	45 - 60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrógeno	2 - 5
Oxígeno	0,1 - 1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc	0 - 1,0
Amoníaco	0,1 - 1,0
Hidrógeno	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Constituyentes en cantidades traza	0,01 - 0,6
Características	**Valor**
Temperatura °C	37 - 67
Densidad kg/m³	1,02 - 1,06
Contenido en humedad	Saturado
Poder calorífico inferior, Kcal/m³	5000
Equivalente en potencia Kwh/m³	5,83

Tabla 14 Constituyentes típicos encontrados en el gas de vertedero de RSU. Gestión integral de Residuos Sólidos y complementación comparativa entre referencias bibliográficas.* La distribución porcentual exacta variara según la antigüedad del vertedero

3.1.2 Generación del gas de vertedero

A continuación se tratan los temas referentes a la generación de los principales gases de vertedero, la variación en la tasa de producción frente al tiempo y los orígenes de los oligogases.

3.1.2.1 Generación de los principales gases de vertedero

Básicamente la generación de los principales gases de vertedero se desarrolla en 5 etapas o fases. En este apartado se describirán estas fases, se indicaran además referencias bibliográficas donde se podrá encontrar más información referente a los microorganismos y rutas bioquímicas de las reacciones.

La siguiente figura ilustra las principales fases de la generación del gas de vertedero así como también la de los lixiviados, en función de la composición en el tiempo.

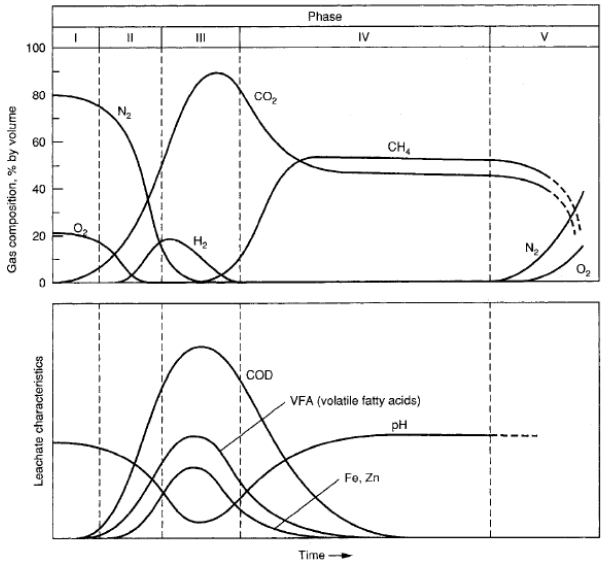

Ilustración 9 Fases de la generación de gases de vertedero. (Adaptación de Farquhar y Rovers, 1973; Parker, 1983; Pohland, 1987; and Pohland, 1991)

3.1.2.2 Descripción y duración de las fases

Fase I: Ajuste inicial

Corresponde a la primera fase, donde los componentes orgánicos biodegradables de los RSU sufren descomposición microbiana mientras se colocan en el vertedero y poco después. En esta fase, se produce descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del vertedero. La fuente principal de organismos, aerobios y anaerobios, responsables de la descomposición de los residuos es el material del suelo que se utiliza como cubrición diaria y final. Otras fuentes de organismos son los fangos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales evacuados en muchos vertederos de RSU, y lixiviados reciclados.

Fase II. Fase de transición

En esta fase, desciende el oxigeno y comienzan a desarrollarse las condiciones anaerobias. Mientras el vertedero se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrogeno. El comienzo de condiciones anaerobias se puede supervisar midiendo el potencial de oxidación/reducción que tiene el residuo. Las condiciones de reducción suficientes para producir la reducción del nitrato y del sulfato se dan aproximadamente entre -50 a -100 milivoltios, mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción, los miembros de la comunidad microbiana responsables de la conversión del material orgánico de los RSU en metano y dióxido de carbono empiezan un proceso de tres pasos, con la conversión de material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, como se describe en la fase III. En la fase II, el pH del lixiviado, si es que este se forma, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas

concentraciones de CO_2 dentro del vertedero. Se adjunta un esquema que muestra las rutas que llevan a la producción de metano y de dióxido de carbono mencionada anteriormente.

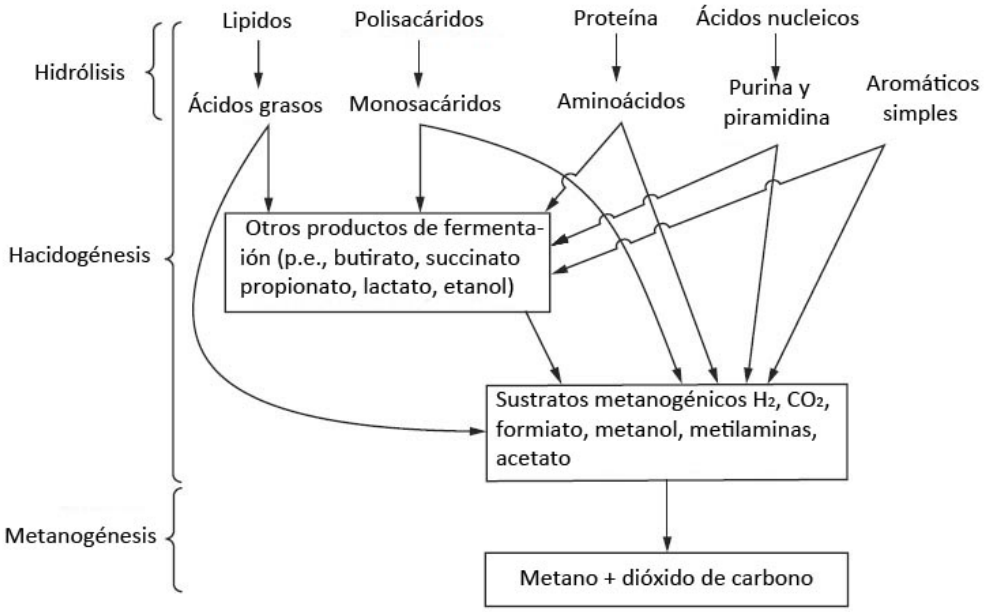

Ilustración 10 Rutas de la digestión anaerobia para la producción de metano y dióxido de carbono. From Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. A., Integrated Solid Waste Management—Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill Book Company, New York,

Fase III. Fase ácida

En esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas hidrogeno. El primer paso en el proceso de tres pasos implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (p.e, lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso en el proceso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el acido acético (CH_3COOH) y las pequeñas concentraciones de acido fulvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono (CO_2) es el principal gas generado durante la fase III. También se producirían cantidades más pequeñas de hidrogeno (H_2). Los microorganismos implicados en esta conversión, llamados colectivamente no metanogénicos, son las bacterias anaerobias facultativas y obligadas. A menudo se identifican estos microorganismos en la literatura de ingeniería como acidogénicos o formadores de acido.

El pH del lixiviado, si se forma, frecuentemente caerá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia de ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del vertedero. La demanda bioquímica de oxigeno (DBO_5), la demanda química de oxigeno (DQO) y la conductividad del lixiviado se incrementara significativamente durante la fase III debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado. También se solubilizaran durante la fase III algunos orgánicos del lixiviado. También se solubilizaran durante la fase III algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados,

debido a los bajos valores de pH en el lixiviado. Muchos nutrientes esenciales también se separan del lixiviado en la fase III. Si no se recicla el lixiviado, se perderán del sistema nutrientes esenciales, es importante resaltar que si no se forma lixiviado, quedaran dentro del vertedero productos de conversión producidos en la fase III como constituyentes absorbidos en el agua contenida por los residuos, como se define en la capacidad de campo (el agua que entra en el vertedero, que no se consume y que no sale como vapor de agua, puede mantenerse en el vertedero o puede aparecer como lixiviado).

Fase IV: Fase de fermentación del metano

En esta fase un segundo grupo de microorganismos, que convierte el acido acético y el gas hidrogeno producidos por los formadores de ácidos en la fase acida en CH_4 y CO_2, llegan a ser mas predominantes. En algunos casos, estos organismos comenzaran a desarrollarse hacia el final de la fase III. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos. Colectivamente, se identifican en la literatura como metanogénicos o formadores de metano. En la fase IV la formación de metano y acido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida.

Como los ácidos y el gas hidrogeno producidos por los formadores de ácidos se han convertido en CH_4 y CO_2 en la fase IV, el pH dentro del vertedero subirá a valores neutros, en el rango de 6,8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, si se forma, subirá, y se reducirán las concentraciones de DBO_5 y DQO y el valor de la conductividad del lixiviado. Con valores más altos el pH, menos constituyentes inorgánicos quedan en la disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirá.

Fase V: Fase de maduración

Es la fase que se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en CH_4 y CO_2 durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos, se convierten porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. Durante la fase V la velocidad de generación de gas de vertedero disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el vertedero son de una degradación lenta. Los principales gases de vertedero que han evolucionado en la fase V son CH_4 y CO_2. Según las medidas de sellado del vertedero, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxigeno en el gas de vertedero. Durante la fase de maduración, el lixiviado a menudo contendrá ácidos húmico y fulvico, que son difíciles de degradar biológicamente.

Duración de las fases

La duración de las fases individuales de producción del gas de vertedero variara según la distribución de los componentes orgánicos en el vertedero, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial. Por ejemplo si se compactan juntos varios cargamentos de matorrales la relación carbono/nitrógeno y el balance de

nutrientes puede que no sea favorable para la producción del gas de vertedero. De forma similar, se retardara la generación del gas si no hay suficiente humedad disponible. Incrementando la densidad del material colocado en el vertedero, descenderá la posibilidad de que la humedad llegue a todas las partes de los residuos y, por lo tanto, reducirá la velocidad de bioconversión y la producción de gas.

En la siguiente tabla se adjunta la información referente a los principales gases encontrados en un vertedero recientemente clausurado.

Intervalo temporal desde el llenado de la celda, meses	Medio, porcentaje por volumen		
	Nitrógeno	Dioxido de carbono	Metano
0 - 3	5,2	88	5
3 - 6	3,8	76	21
6 - 12	0,4	65	29
12 - 18	1,1	52	40
18 - 24	0,4	53	47
24 - 30	0,2	52	48
30 - 36	1,3	46	51
36 - 42	0,9	50	47
42 - 48	0,4	51	48

Tabla 15 Distribución porcentual de los gases de vertedero observados durante los primeros 48 meses después de la clausura del vertedero. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil.

3.1.3 **Producción estequiometría**

La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la siguiente forma:

$$Materia\ orgánica + H_2O + Nutrientes \rightarrow \rightarrow Células\ nuevas + Materia\ orgánica\ no\ biodegradable + CH_4 + CO_2 + NH_3 + H_2S + Calor$$

Ecuación 6 Reacción generalizada para la descomposición anaerobia

Con fines prácticos, la conversión global de la fracción orgánica de los residuos sólidos en metano, dióxido de carbono y amoniaco puede representarse con la siguiente ecuación:

$$C_aH_bO_cN_d \rightarrow nC_wH_xO_yN_z + mCH_4 + sCO_2 + rH_2O + (d - nx)NH_3$$

Ecuación 7 Coeficientes estequiométricos de la ecuación

Donde

$s \quad = a - nw - m$

$r \quad = c - ny - 2s$

Los términos $C_aH_bO_cN_d$ y $nC_wH_xO_yN_z$ se utilizan para representar (sobre una base molar) la composición de la materia orgánica presente en el comienzo y en el final del proceso, respectivamente. Si se supone que los residuos orgánicos están completamente estabilizados, la expresión correspondiente será:

$$C_aH_bO_cN_d + \left(\frac{4a - b - 2c + 3d}{4}\right)H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8}\right)CO_2 + dNH_3$$

Ecuación 8 Representación de la materia orgánica en la ecuación

En operaciones donde los residuos sólidos han sido mezclados con fangos de aguas residuales, se ha encontrado que el gas recogido de los digestores contiene entre el 50 y el 60% de metano. También se ha encontrado que aproximadamente se producen en algunos casos entre0,6 y 1 m^3 de gas por kg de sólidos volátiles biodegradables destruidos.

3.1.3.1 Volumen de gas producido

El volumen de los gases emitidos durante la descomposición anaerobia puede estimarse de varias formas. Por ejemplo, si los constituyentes orgánicos individuales encontrados en los RSU (con la excepción de plásticos) se representan de una forma generalizada con la formula $C_aH_bO_cN_d$, entonces se puede estimar el volumen total del gas utilizando la ecuación mencionada anteriormente, suponiendo la conversión completa de los residuos orgánicos biodegradables en CO_2 y CH_4.

De acuerdo a la cantidad de residuos, distribución porcentual estimada de estos, conocimiento del contenido de agua presente se podría hacer el cálculo del contenido molar por componente que tendrían los residuos y de esta forma se determina la formula química (de la forma que tiene la ecuación estequiométrica indicada en el punto anterior).

Cuando se tienen estimados los coeficientes de la formula anterior y utilizando el peso especifico del metano y el dióxido de carbono (0,717 y 1,978 kg/m^3, respectivamente) se estima el volumen generado, tanto para la fracción rápidamente y lentamente descomponible.

En general, se pueden dividir los materiales orgánicos presentes en los residuos sólidos en dos clasificaciones: 1) aquellos de rápida descomposición (tres meses a 5 años, aunque los altamente biodegradables se descomponen después de algunos días) y 2) aquellos materiales que se descomponen lentamente (de 5 a 10 años, incluso hasta 50 años o más).

Luego con los valores obtenidos de la producción volumétrica para ambos casos es posible hacer la estimación de la cantidad teórica del gas generado por unidad en peso seco de la materia orgánica destruida. La variación en la tasa de producción del gas a partir de la descomposición anaerobia de los materiales orgánicos de los RSU rápidamente biodegradables puede seguir la representación grafica mostrada a continuación.

Las tasas anuales de descomposición para materiales rápidamente y lentamente descomponibles se basan en un modelo triangular de producción del gas. Se supone que la producción de gas se inicia a finales del primer año de la puesta en funcionamiento del vertedero, por lo tanto se utiliza la relación del área del triangulo, como:

$$Total\ gas\ producido, \frac{kg}{m^3} = \frac{1}{2}(base, \text{año}) * altura, tasa\ punta\ de\ producción\ de\ gas, \frac{kg}{m^3}. \text{año})$$

Ecuación 9 Ecuación de estimación triangular de producción de biogás

Como se ha mencionado anteriormente en muchos vertederos, la humedad disponible es insuficiente para permitir la conversión completa de los constituyentes orgánicos biodegradables de los RSU. Se busca tener un contenido, optimo, de 50 al 60%. Cuando el contenido de humedad del vertedero es limitado, la curva que representa la producción de gas es más plana y se extiende por un periodo de tiempo más largo.

Las cantidades reales de gas generado serán menores a los obtenidos en condiciones optimas, pues toda la materia orgánica biodegradable no estará disponible para la descomposición, además, no se convertirán los residuos orgánicos biodegradables que no estén expuestos a la humedad suficiente para sostener la actividad biológica.

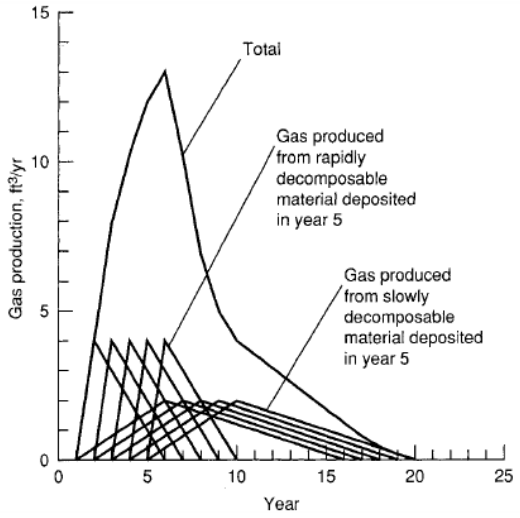

Ilustración 11 Representación grafica de la producción de gas para un periodo de 20 años, para materiales de rápida y lenta descomposición. Gestión integral de residuos sólidos. G.Techobanoglous, H.Theisen, S. A. Vigil.

El caudal de biogás recuperable de un vertedero puede ser estimado mediante modelos matemáticos, utilizando los valores de las cantidades vertidas y su composición, tal como se ha mencionado antes. Los resultados obtenidos de esta manera deben ser contrastados con los resultados experimentales de ensayos en campo y al estudio y caracterización del vertedero, pues cada caso es particular y los coeficientes o variables obtenidas son relativos al caso.

Teóricamente, se puede relacionar la producción de biogás con la demanda química de oxigeno (DQO). La DQO se define como la cantidad de oxigeno necesario para oxidar químicamente un determinado

sustrato. No toda la materia orgánica oxidable químicamente lo es biológicamente. Así, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etc.) no son degradables biológicamente aunque estén reflejados en la DQO porque si lo son químicamente. Por tanto, al calcular la producción de biogás, que depende del grado de biodegradabilidad del sustrato, en función de la DQO, se comete un error por exceso. Esta consideración se tendrá en cuenta.

Suponiendo ahora que la degradación de la materia orgánica fuera completa, el oxigeno necesario para oxidar 1 gr de materia orgánica inicial seria igual al oxigeno necesario para oxidar el volumen de metano generado anaeróbicamente a partir de ese sustrato.

En la combustión de un mol de metano se consumen dos moles de oxigeno. Es decir, para oxidar completamente un mol de metano (16 gr de metano) son necesarios 2 moles de oxigeno (64 gr de oxigeno). La DQO del metano es, por tanto, de 4 gr de oxigeno/ gr de metano. Si la $DQO_{mat\ org}$ es de x gramos de oxigeno por gramo de materia orgánica, su degradación anaerobia completa debe generar x/4 gramos de metano. Es decir, se generan 0,25 gr de metano por cada gr de $DQO_{mat\ org}$, lo que equivale a $0{,}35e10^{-3}$ m^3 de metano a 0°C y 1 bar de presión (condiciones estándar de presión y temperatura, en las que el volumen medido se denomina "normal").

Producción de metano, 350 m^3N/t DQO

La producción de metano por kg de DQO de materia orgánica es 0,35 m^3N. Esta es la producción máxima, es decir, supone la degradación biológica total de las basuras, algo que ciertamente no ocurre en el vertedero, ya sea por su ineficiente funcionamiento como digestor anaerobio o bien por el hecho de que no toda la materia orgánica vertida es oxidable biológicamente. Los RSU solo contienen un cierto porcentaje de "materia orgánica degradable anaeróbicamente". Naturalmente dentro de este concepto entran una amplia variedad de compuestos cuya DQO es distinta.

La producción teórica de biogás a partir de distintos compuestos orgánicos se detalla en la siguiente tabla.

Compuesto	Fórmula	DQO (gr/gr)	Metano	Biogas	% en metano
Celulosa	$(C_6H_{10}O_5)_x$	1,185	0,415	0,83	50
Proteinas	$(C_4H_6ON)_y$	1,619	0,567	1,1	51,5
Lípidos	$(C_{55}H_{106}O_6)_z$	2,914	1,02	1,428	71,4

Tabla 16 Producción teórica de biogás a partir de distintos compuestos orgánicos. Gendebien et.al., 1992.

Se supondrá una DQO media, por gr de sustrato seco, para la materia orgánica de alta degradabilidad (alimentos, restos de jardín, etc.), por su mayor contenido en proteínas y lípidos, de 1,52 gr y, para la materia orgánica de media degradabilidad (papel, cartón, etc.), por su mayor contenido de celulosa, de 0,95 (Gendebien *et.al.,* 1992).

La producción de metano teórica máxima por tonelada de materia orgánica seca será, por tanto, de 532 m^3N para la fracción de alta degradabilidad y de 332,5 m^3N para la fracción de media degradabilidad.

Este cálculo, basado en la DQO del sustrato, produce un error por exceso, como ya se ha comentado, pues no toda la materia orgánica químicamente degradable lo es biológicamente. Las distintas referencias consultadas reportan valores cercanos al 70% de la DQO como correspondiente a la materia biológicamente degradable, por lo que se supondrá esta fracción.

El vertedero tampoco es un reactor anaerobio totalmente eficiente. La mineralización incompleta se debe a factores tales como el grado de trituración de las basuras, su mayor o menor compactación, la falta de agua en el vertedero, etc. el metano que efectivamente se genera en un vertedero está entre 40 y un 50% del teórico (Suflita *et.al*., 1992; Marticorena *et.al*., 1993; Coops *et.al*., 1995). En este trabajo se admitirá un rendimiento de mineralización del 50%.

De esta forma, la producción total de metano por tonelada de materia orgánica seca es de 186 m^3N para la fracción de alta degradabilidad y de 117 m^3N para la fracción de media degradabilidad.

Producción de metano

186 m^3N / t de materia orgánica de alta degradabilidad seca

117 m^3N / t de materia orgánica de media degradabilidad seca

Aun cuando se presentan condiciones muy heterogéneas y con alta variabilidad, las referencias especializadas en la hidrología de los vertederos consideran la homogeneidad del medio como una hipótesis razonable, se podrían utilizar modelos cada vez más ajustados que considerarían las canalizaciones, variabilidad de la permeabilidad y capacidad de campo, sin embargo considerando las referencias bibliográficas consultadas y contrastando con los datos aquí presentados, se puede estimar el contenido de humedad en el rango de 20% al 40%, en este trabajo se utiliza un 35% .

Para describir entonces la producción teórica de metano, a continuación se hace el cálculo para la biomasa seca, es decir el 65%, la producción teórica de metano por tonelada de materia orgánica de alta y media degradabilidad serán.

120 m^3N/t de materia orgánica de alta degradabilidad húmeda

76 m^3N/t de materia orgánica de media degradabilidad húmeda

3.1.4 **Biogás recuperable**

El contenido en metano del biogás varía según el compuesto que se degrade, suponiendo una composición del biogás recuperado de 50% en volumen de gas seco de metano, valor habitual en los vertederos mencionados en la bibliografía consultada y de acuerdo al análisis previo, la producción de biogás por tonelada de materia orgánica húmeda será de 240 m^3N/t para la fracción de alta degradabilidad y 152 m^3N/t para la de degradabilidad media.

Ningún sistema de captación de biogás es perfecto, por lo que parte del biogás generado se perderá, como ya se ha comentado, se puede considerar normal la recuperación del 70% del gas generado. Teniendo esto en cuenta la producción teórica recuperable estimada de biogás por tonelada de materia

orgánica húmeda será de 168 m^3N y 106 m^3N para la fracción de alta y media degradabilidad respectivamente.

Se podría suponer que la composición de los residuos la establecemos en un 50% de restos de comida y jardín, y un 25% de papel y cartón, la producción total de biogás por tonelada de RSU será de 143 m^3N y la producción recuperable de biogás, 100 m^3N.

El cálculo se ha llevado a cabo usando la siguiente relación:

$$V = K * (1 - H) * \left(\frac{1}{M}\right) * R * \alpha * \beta * \{A * X * B * Y\}$$

Ecuación 10 Producción teórica estimada de biogás

Donde,

V : Caudal de biogás (50% metano) por t de RSU húmedo, 50% moderadamente biodegradable y 25% lentamente biodegradable (V=100 m^3N/t)

K : Caudal de metano generado por unidad de DQO (K=350 m^3N/t)

H : Humedad de residuos (0,35)

M : Contenido de metano del biogas (50%)

R : Rendimiento de la captación (70%)

α : Relación biodegradabilidad frente a DQO (0,70)

β : Rendimiento de mineralización (0,45)

A : t de DQO/t de materia orgánica de alta biodegradabilidad (1,52)

X : Porcentaje de materia orgánica de alta degradabilidad (0,50)

B : t de DQO/t de materia orgánica de media degradabilidad (0,95)

Y : Porcentaje de materia orgánica de media degradabilidad (0,25)

La disparidad de los resultados que se han encontrado en la bibliografía da una idea del riesgo inherente a este tipo de modelos matemáticos, no obstante los distintos métodos utilizados para la obtención de estos valores, no los hace comparables.

Componente	Volumen de biogás [m^3N/t]
Restos de comida	51,5
Restos de vegetales	52,4
Papel	44,9
Madera	5,5
Textiles y cuero	8,5
Plasticos	9,3
Cristal y metales	0
Otros	38,9

Tabla 17 Producción de biogás para cada uno de los componentes de los RSU Attal et.al.,(1992)

3.1.5 **Velocidad de generación del biogás**

La velocidad con que se destruye la materia orgánica en el vertedero puede suponerse directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica no degradada, que denominamos C(t), o a una potencia de ella, $C^n(t)$. Los distintos modelos cinéticos propuestos en la bibliografía se diferencian en el valor de esta constante n. Así tenemos modelos de orden cero, donde n=0 y por tanto la velocidad de destrucción de la materia orgánica es constante; los modelos de primer orden, donde n=1; y los modelos de segundo orden, con n=2 además de otros con ordenes mayores no proporcionan mejores resultados. De hecho, la ecuación de primer orden proporciona una mejor modelización de la generación de biogás en el vertedero que la de segundo orden según algunos autores (Marticorena, 1993; Coops *et.al.,*1995). En este trabajo se utilizara, entonces, la ecuación con n=1.

$$-\frac{dC}{dt} = kC(t)$$

Ecuación 11 Ecuación de la cinética de generación del biogás.

Donde k es una constante que refleja la velocidad con que la materia orgánica se degrada. Más adelante profundizaremos en su significado.

Integrando esta expresión, obtenemos la cantidad de materia orgánica aun no degradada en un instante t:

$$C(t) = C_o \cdot e^{-kt}$$

Ecuación 12 Integración de la ecuación de cinética

Donde C_o es la cantidad de materia orgánica inicialmente presente.

La producción de biogás es proporcional a la cantidad de materia orgánica destruida, según se ha explicado anteriormente. Para un instante t determinado, la producción de biogás acumulada desde el

principio de la degradación será proporcional a la cantidad de materia orgánica destruida desde el instante cero:

$$D(t) = \alpha \cdot C_o \cdot \left(1 - e^{-kt}\right)$$

Ecuación 13 Proporcionalidad de producción de biogás y destrucción de materia orgánica

Donde α es la constante de proporcionalidad, que refleja la eficiencia en la conversión de la materia orgánica en biogás.

Podemos calcular el caudal de biogás producido entre (t-1) y t, es decir, el caudal de gas correspondiente al año t, se supone que para t=0 la proporción de gas es nula.

$$Q(t) = D(t) - D(t-1) = \alpha \cdot C_o \cdot \left(e^{kt} - 1\right) \cdot e^{-kt}$$

Ecuación 14 Expresión de la generación en unidades de tiempo

La constante k hace referencia a la mayor o menor velocidad de degradación de los residuos. Para expresar esta constante en unidades de tiempo, sustituimos por su inversa $d = 1/k$. La nueva constante d se denomina tiempo de degradación. Para t = d se ha generado un 63% del total del gas, según se puede deducir de la formula mencionada anteriormente.

La velocidad de degradación depende del tipo de sustrato. Los restos de papel, cartón y madera degradan más lentamente que los restos de alimentación y de jardín, a continuación se muestra un resumen de los tiempos de degradación hasta el 50% ($t_{1/2}$) de distintos materiales según la bibliografía consultada. Se observa que no existe consenso sobre cuál es el tiempo que tardan los residuos en mineralizarse completamente en un vertedero. Marticorena *et. al.,* (1993) cita periodos de generación de biogás en vertederos de entre 12 años (Findikakis *et. al.,* 1988) y 20 años (Bogner *et. al.,* 1989) Attal *et. al.,* (1992) cita incluso tiempos mayores, entre 20 y 25 años (Mounton *et. al.,* 1985).

Componente	Palmer, 1985	Stegmann,	Ham, *et. al.,*	Moolemaar,	Bowermann	Coops *et.*
Alimentación	1	1,5	1	1-5	0,4	5,4
Jardín	5	1,5	15	5 - 25	0,4	5,4
Papel	15	25	15	1 - 5	0,6	10
Cartón	15	25	15	5 - 25	0,6	10
Madera	15	---	15	20-100	0,6	33,3

Tabla 18 Valores típico de tiempo de mineralización de residuos.

En su trabajo, Marticorena *et. al.,* (1993) encuentra una relación entre el contenido en humedad de los residuos y el tiempo necesario para su completa degradación. Muestras de 6 años de antigüedad tomadas en un vertedero húmedo se encuentran totalmente mineralizadas, mientras que otras muestras, recogidas en un vertedero más seco, están poco degradadas 10 – 15 años después de su vertido. Esta relación entre la humedad de los residuos y el tiempo de degradación es ratificada por otros autores (Pohland y Al-Yousfi, 1995). Los valores para la constante d, expresados en años, se detallan en la siguiente tabla.

Fracción	Vertederos Húmedos	Vertederos secos
Degradabilidad alta, dx	1	5
Degradabilidad baja, dy	15	20

Tabla 19 Valores para la constante d, expresados en años

El producto αC_o representa la cantidad total de biogás producida por cada tonelada de residuos depositada en el vertedero. Los valores de la producción de biogás por tonelada de residuo húmedo según su grado de degradabilidad se presentan a continuación.

Degradabilidad alta	1
Degradabilidad baja	15

Tabla 20 Valores de la producción de biogás por tonelada de residuo húmedo según su grado de degradabilidad

Denominando X e Y a las fracciones de residuos de degradabilidad alta y media respectivamente, se puede escribir la formula anterior como:

$$Q(t) = 168 \cdot X \cdot \left(e^{\frac{1}{dx}} - 1\right) \cdot e^{\frac{-t}{dx}} + 106 \cdot Y \cdot \left(e^{\frac{1}{dy}} - 1\right) \cdot e^{\frac{-t}{dy}}$$

Ecuación 15 Expresión de la generación considerando ambas degradabilidad

Donde

$Q(t)$ Se expresa en m^3N/t

t, dx, dy Se expresan en años (dx y dy, son las fracciones de degradabilidad alta y baja para vertederos húmedos y secos)

X e Y En %

Mediante la relación obtenida se puede construir una tabla que indique el caudal de biogás generado en vertederos húmedos y secos por tonelada de materia orgánica de alta y media degradabilidad, por capa. La tabla se muestra más adelante.

Para obtener la producción de biogás en el vertedero, se modela éste como un conjunto de capas de residuos de distinta antigüedad superpuestas una a otras. Se calculan las producciones de biogás por año correspondientes a los distintos vertidos. Ya que el caudal de biogás que se genera en cada capa en un momento dado se mezcla con el de las otras y escapa a la atmosfera o es recogido por un sistema de captación, para calcular la producción de biogás correspondiente a ese año en cada una de las capas, teniendo en cuenta la distinta cantidad de residuos vertidos y su antigüedad, se deben adicionar, como indica la siguiente relación:

$$Q_{TOTAL}(t) = \sum T_i \cdot Q_i(t - t_i)$$, para i =0, 1, 2…n capas

Ecuación 16 Caudal de biogás generado por capas

Donde,

T_i es igual al número de toneladas de RSU vertidas en la capa i-esima

Q_i es el caudal de biogás que produce la capa i-esima

t_i es el año en que fueron vertidos los residuos de la capa i-esima

$(t-t_i)$es, por tanto, la antigüedad de la capa i-esima

	Humedos		Secos	
Tiempo [años]	Fracción de degradabilidad alta 168(e-1)e^-t/1 [m³N/ton]	Fracción de degradabilidad media 106(e^1/15-1)e^-t/15 [m³N/ton]	Fracción de degradabilidad alta 168(e^1/5 -1)e^-t/5 [m³N/ton]	Fracción de degradabilidad media 106(e^1/20-1)e^-t/20 [m³N/ton]
1	106,196	6,836	30,453	5,170
2	39,067	6,395	24,933	4,918
3	14,372	5,983	20,413	4,678
4	5,287	5,597	16,713	4,450
5	1,945	5,236	13,684	4,233
6	0,716	4,898	11,203	4,026
7	0,263	4,582	9,172	3,830
8	0,097	4,287	7,510	3,643
9	0,036	4,010	6,148	3,465
10	0,013	3,752	5,034	3,296
11	0,005	3,510	4,121	3,136
12	0,002	3,283	3,374	2,983
13	0,001	3,072	2,763	2,837
14	0,000	2,874	2,262	2,699
15	0,000	2,688	1,852	2,567
16	0,000	2,515	1,516	2,442
17	0,000	2,353	1,241	2,323
18	0,000	2,201	1,016	2,210
19	0,000	2,059	0,832	2,102
20	0,000	1,926	0,681	1,999
21	0,000	1,802	0,558	1,902
22	0,000	1,686	0,457	1,809
23	0,000	1,577	0,374	1,721
24	0,000	1,475	0,306	1,637
25	0,000	1,380	0,251	1,557
26	0,000	1,291	0,205	1,481
27	0,000	1,208	0,168	1,409
28	0,000	1,130	0,138	1,340
29	0,000	1,057	0,113	1,275
30	0,000	0,989	0,092	1,213
31	0,000	0,925	0,075	1,154
32	0,000	0,866	0,062	1,097
33	0,000	0,810	0,051	1,044
34	0,000	0,757	0,041	0,993
35	0,000	0,709	0,034	0,944

Tabla 21 Caudal de biogás generado en vertederos húmedos y secos por tonelada de materia orgánica de alta y media degradabilidad por capa

Se puede representar entonces con esta generación un modelo para un vertedero hipotético, donde se podría considerar un número de secciones para el depósito de los residuos y un numero de capas, en este caso para demostrar el caso que más adelante se desarrollara se presenta un volumen de control de 6 secciones y 6 capas de relleno. El modelo de vaso de vertido mencionado se muestra en la siguiente figura.

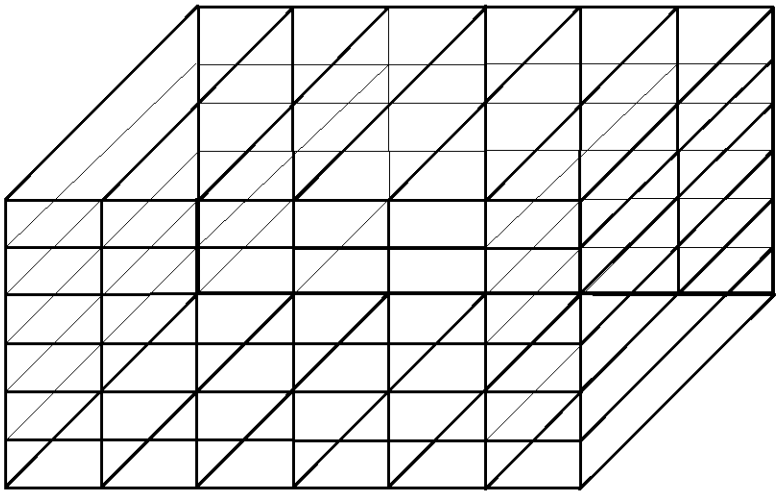

Ilustración 12 Modelo de vaso de vertido

La siguiente tabla considera el caso mencionado por secciones y capas, mas adelante la grafica muestra la generación por capas en el tiempo de vida útil del vertedero y utilizando las ecuaciones para el caso de un residuo húmedo y considerando además biodegradabilidad alta y media.

Capas - Húmedos **[Nm³/ton RSU]**								
Periodos de 6 años	1	2	3	4	5	6	Generado	Acumulado
1 a 6	1.039,6	-	-	-	-	-	1.188,1	1.188,1
6 a 12	264,4	1.039,6	-	-	-	-	1.490,2	2.678,3
12 a 18	112,3	264,4	1.039,6	-	-	-	1.618,5	4.296,9
18 a 24	75,1	112,3	264,4	1.039,6	-	-	1.704,4	6.001,2
24 a 30	50,3	75,1	112,3	264,4	1.039,6	-	1.761,9	7.763,1
30 a 36	33,1	50,3	75,1	112,3	264,4	1.039,6	1.799,7	9.562,8
36 a 42	4,5	33,1	50,3	75,1	112,3	264,4	616,7	10.179,5
42 a 48		4,5	33,1	50,3	75,1	112,3	314,5	10.494,1

Tabla 22 Caudal de biogás generado para el caso mencionado

Para la representación de la generación de biogás acumulado se consideran todas las capas y secciones, tal como lo muestra la siguiente grafica.

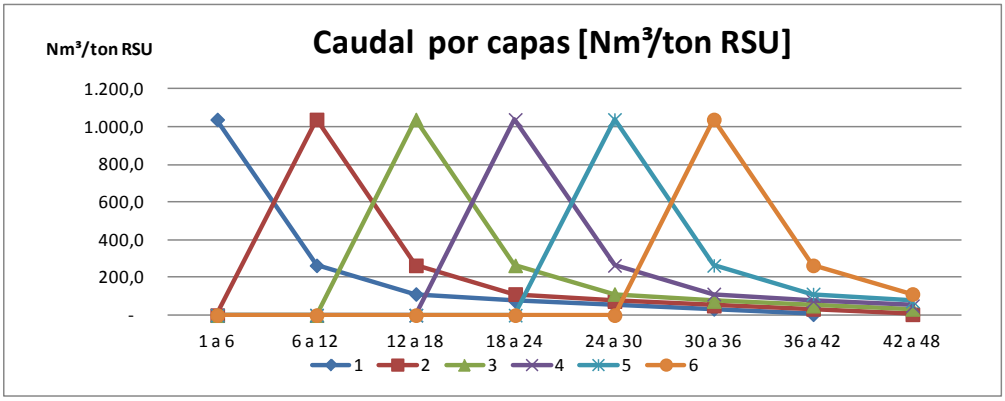

Ilustración 13 Representación de la generación de biogás por capas

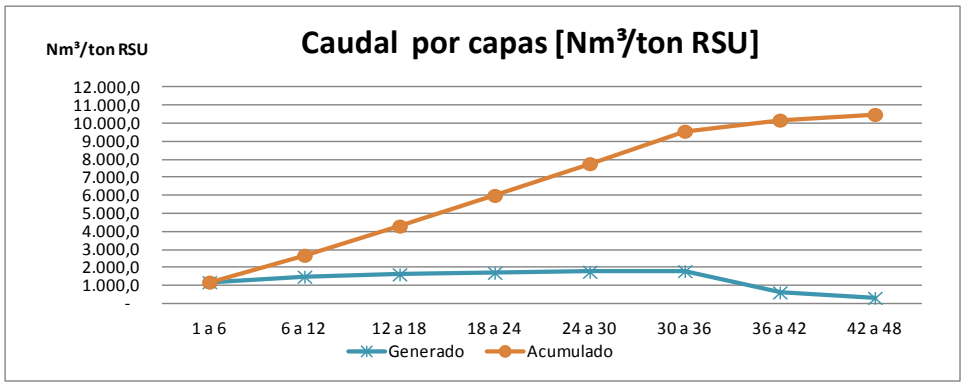

Ilustración 14 Representación de la generación de biogás acumulado

Para llevar a cabo la estimación del biogás que se podría obtener y así valorizarlo, es necesario establecer un marco hipotético de la generación y vertido del residuo, en este trabajo se ha tomado la información de los datos generados por la Web de la estadística oficial de Catalunya para llevar a cabo un ejercicio numérico.

Se deben considerar también las hipótesis correspondientes para llevar a cabo el cálculo.

- Se considerara como referencia la comarca del Valles Occidental, con una población de 892.260 habitantes (Fuente idescat, 2011) y un coeficiente de generación de residuos de 1,26 kg/hab/día, es decir 410350 Ton/año, se supone constante la tasa de vertido.
- Se supone una composición homogénea y correspondiente a los parámetros mencionados antes para toda la vida útil del vertedero, así también como la tasa de generación del biogás.
- Se consideran condiciones del residuo que lo ubican en la categoría de húmedo.
- Se supone una vida útil de 36 años, sin embargo se muestra la evolución que se produce hasta el año 42.

Con los valores mencionados se estima la generación de biogás que se obtendría, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Capas - Humedos y filtraciones [MNm³]							
Periodos de 6 años	1	2	3	4	5	6	Suma 80%
1 a 6	426,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	487,5
6 a 12	108,5	426,6	0,0	0,0	0,0	0,0	611,5
12 a 18	46,1	108,5	426,6	0,0	0,0	0,0	664,2
18 a 24	30,8	46,1	108,5	426,6	0,0	0,0	699,4
24 a 30	20,7	30,8	46,1	108,5	426,6	0,0	723,0
30 a 36	13,6	20,7	30,8	46,1	108,5	426,6	738,5
36 a 42	1,8	13,6	20,7	30,8	46,1	108,5	253,1

Tabla 23 Generación de biogás para el ejercicio hipotetico planteado

En lo que continua se incluirán consideraciones tales como la efectividad de la captura referida específicamente a la existencia de fugas y migraciones.

3.1.6 **Estimación de filtraciones o migraciones**

Como anteriormente se ha mencionado, al momento de hacer los cálculos del biogás recuperado se deben tener en cuenta además de la variabilidad por tipo de residuo, otras variables (contenido de humedad, cinética bacteriana, etc.) que pueden influir en la existencia de filtraciones o migraciones que se deben incluir para que el balance pueda ser más próximo a la realidad, se ha mencionado también que se estima una recuperación del 70% del biogás generado, sin embargo aunque es una buena aproximación, sigue siendo una aproximación, a continuación se explicaran aspectos más específicos que han sido motivo de distintas publicaciones y que pretenden dar una base solida al tema de las fugas y que justifican una mayor recuperación.

Las filtraciones se producen habitualmente cuando el sistema de extracción no está funcionando o lo hace de forma inadecuada, pues la generación constante de biogás produce un aumento de la presión interna del vertedero lo que ocasiona una fuga que generalmente se produce por la superficie, ya que representa la cara más permeable. De otra forma y como se ha verificado el biogás podría filtrarse por vías horizontales para aflorar por sectores aledaños al vertedero (Gendebien et.al.,1992; UK Departament of the Environment, 1994).

Dentro de las posibles fallas que puedan ocurrir en el volumen de vertido se observa una causa común en casi todas, que es la inadecuada impermeabilización además de vías de fugas que pueden ser originadas por tuberías o cableados subterráneos.

Aunque la mejor forma de conocer las cantidades y concentraciones de los gases que se encuentran con mayor frecuencia (NH_4, CO_2, COV's y otros) en el biogás es mediante un riguroso plan de monitorización tanto superficial como subterráneo, desde el inicio de la actividad hasta su cierre y durante el tiempo de explotación del biogás, este tipo de medida se considera casi como una medida correctiva.

Dentro de las que se podrían considerar medidas preventivas se encuentran estimaciones matemáticas que involucran leyes fundamentales de los gases que serán explicadas más adelante, estas expresiones matemáticas se encuentran en un rango muy amplio desde muy básicas hasta expresiones muy complejas y que son parte de los algoritmos que utilizan los programas de modelación más usados.

Para este trabajo se han considerado medidas que permiten calcular las filtraciones de una forma estimativa, pues el objetivo fundamental es la valoración de un potencial energético a partir del biogás capturado y como este impacta en la disminución de las emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero) que por efectos antropogénicos alcanzarían el rango del 7 al 20 % (Thorneloe, 1991), su importancia en la inclusión del mercado de bonos de carbono y como se podría llevar a cabo el cálculo de un ahorro o disminución de estos gases.

De esta forma el tema de la generación de lixiviados, también se tocara desde una perspectiva informativa, haciendo mención a las herramientas predictivas que se encuentran en la actualidad y sus principios.

3.1.6.1 Migraciones y/o filtraciones de biogás y modelo de cálculo

Antes se estimó en un 70% la recuperación del biogás, por otra parte existen registros bibliográficos que en un balance de masa de CH_4, solo un 65% del CH_4 generado fue recuperado en un sistema activo en un sitio con una cobertura intermedia de arcilla (Spokas et al., 2006).

Se ha estudiado la incidencia de las capas intermedias, estas no son suficientes para atrapar el CH_4 en el vertedero, previniendo además la intrusión de aire, son más delgadas y permeables que las cubiertas (Kreith y Tchobanoglous, 2002), es interesante también agregar que en la zona de captura, la zona de influencia se puede ver limitada por la alta compactación y alto grado de mezcla (Yu et al., 2009).

El aumento de tuberías de succión producirían un aumento en la concentración de O_2 y con esto también los riesgos de ignición y una disminución de la calidad del biogás, este problema se puede incrementar si se producen grietas o fisuras que se podrían desarrollar en las capas intermedias pues se podrían generar vías de escape.

Debido al flujo de liquido, ya sea de los lixiviados (recirculados y no recirculados), además de las infiltraciones por lluvias, se pueden producir variaciones en la magnitud y dirección de los flujos de gas (Jain et al., 2005; Reinhart et al., 2002).

La variación espacial de la permeabilidad de los gases y la tasa de generación del biogás son factores importantes que afectan la captación del biogás y por ende el control de las emisiones de CH_4 (Yung et al., 2009).

A continuación se muestran valores que han sido asumidos para modelar el movimiento de los fluidos en una celda imaginaria, dichos valores se presentan para tener una perspectiva de las variables con mayor importancia en el establecimiento de los modelos más usados.

Table 1
General properties of the model domain for base-case simulations.

Property	Refuse	Tire	Soil	
Porosity	0.45	0.5	0.35	
Water saturation	0.21	0.21	0.15	
Horizontal gas permeability, k_x (m^2)[a]	2×10^{-11}	3×10^{-8}	Condition 1 1×10^{-12}	Condition 2 1×10^{-11}
Vertical gas permeability, k_z (m^2)[a]	2×10^{-12}	3×10^{-9}	Condition 1 1×10^{-13}	Condition 2 1×10^{-12}

[a] The gas permeability of refuse represents the mean permeability before scaling with a permeability modification coefficient.

Tabla 24 Propiedades generales utilizadas en modelos de movimiento de fluidos

En el caso de la porosidad de los residuos, esta se basa en los valores reportados por Han et al., 2006, así mismo la saturación de agua y la fracción de poro llena de agua, los valores se corresponden con los reportes de otros investigadores Bear et al., 1988.

En la totalidad de los modelos reportados para el transporte de biogás con múltiples componentes (CH_4, CO_2, O_2 y N_2) debidos a la generación de gas y la intrusión de aire, se usan aproximaciones de elementos finitos, así la discretización de un volumen de control se hace por nodos siguiendo para el fenómeno advectivo la ley de Darcy (que representa la permeabilidad relativa del flujo de gas) y para el fenómeno difusivo la ley de Fick (que se modifica para considerar la difusión de múltiples componentes en el gas), Yung et al., 2009.

Aunque existen pequeñas variaciones y errores asociados al análisis de múltiples componentes o a la variabilidad de la permeabilidad, los resultados obtenidos se aproximan mucho a la realidad de la dinámica de los fluidos.

Muchos autores están más familiarizados con los mecanismos de transporte en fase liquida que en fase gaseosa, los principales mecanismos de transporte lo consideran la advección y la dispersión hidrodinámica (Freeze and Cherry, 1979). La dispersión mecánica, resultante de la variación de velocidad a una escala micro, es el producto de la velocidad advectiva y dispersiva.

El transporte de gas también puede ser descrito por estos fenómenos, además, en la mayoría de los casos la dispersión mecánica se omite porque la velocidad del gas es generalmente muy baja y los efectos de la difusión son mucho mayores que la dispersión en la fase gas.

Coeficientes de difusión molecular son aproximadamente cuatro órdenes de magnitud mayor en el gas que en la fase líquida.

Son muchos los modelos hídricos que se han desarrollado y que se han podido utilizar con la finalidad de explicar el flujo de gases, entre los más utilizados para predicciones en vertederos se encuentran:

- HSSWDS (HYDROLOGIC SIMULATION MODEL FOR ESTIMATION PERCOLATION AT SOLID WASTE DISPOSAL SITES),
- TMVOCBio (Version extendida del modelo TMVOC capas de simular la biodegradación usando multiples modelos de la Cinetica de Monod, el modelo es utilizado para simular la oxidación del CH_4 que pasa a través del suelo, además de simular el transporte de gas en el vertedero, Aquater, 2002)
- Moduelo (Basado en el ajuste de curvas de producción de biogás observadas además de fundamentos biocinéticos).

El análisis y la recopilación de la información que se ha obtenido mediante la utilización de modelos de alta complejidad, muestran las emisiones de CH_4 como un porcentaje de la tasa de generación total, a continuación se muestra una tabla con los valores obtenidos para distintas condiciones de simulación, para este trabajo se han considerado las condiciones más próximas a la mayoría de los vertederos en funcionamiento, se ha obtenido un intervalo (mínimos y máximos) de fugas o migraciones en el rango de 10,8% a 25,4%, sin embargo para este trabajo se usara un valor medio de 20% pues este valor se ha obtenido para un vertedero de relleno típico sin capa permeable intermedia para facilitar la extracción.

Effect of permeability heterogeneity on CH_4 emissions.

Parameter varied [a]		CH_4 emission (% of total CH_4 generation rate)			
		Condition 1		Condition 2	
		With NSPL [b]	Without NSPL	With NSPL	Without NSPL
$\sigma^2(\log k)$	0.25	11.6 (±0.2)[c]	11.7 (±0.4) [12.4][d]	11.6 (±0.2)	15.0 (±1.8) [18.3]
	0.5	11.5 (±0.2)	11.5 (±0.5) [12.3]	11.6 (±0.3)	13.8 (±1.9) [17.6]
	1.0	11.5 (±0.3)	11.3 (±0.5) [12.3]	11.5 (±0.3)	12.8 (±2.0) [16.6]
r_x/r_z	2.0	11.7 (±0.2)	12.4 (±1.1) [14.1]	11.7 (±0.2)	18.0 (±4.6) [25.4]
	10.0	11.6 (±0.2)	11.7 (±0.4) [12.4]	11.6 (±0.2)	15.0 (±1.8) [18.3]
	20.0	11.6 (±0.1)	11.6 (±0.4) [12.2]	11.6 (±0.2)	14.4 (±1.3) [16.8]
r_x (m)	4.0	11.6 (±0.1)	11.8 (±0.3) [12.2]	11.6 (±0.1)	15.0 (±1.0) [16.1]
	10.0	11.6 (±0.2)	11.7 (±0.4) [12.4]	11.6 (±0.2)	15.0 (±1.8) [18.3]
	20.0	11.6 (±0.3)	11.9 (±1.0) [13.6]	11.6 (±0.3)	15.3 (±3.5) [19.9]
	40.0	11.5 (±0.3)	12.0 (±1.1) [13.7]	11.6 (±0.3)	15.1 (±3.3) [21.1]
Average		11.6 (±0.06)	11.8 (±0.3)	11.6 (±0.05)	14.9 (±1.3)

[a] Unless otherwise indicated, all parameters were base-case values.
[b] NSPL = near-surface permeable layer.
[c] Values in parentheses are the standard deviations of 10 realizations.
[d] Values in square brackets are the maximum CH_4 emission among 10 realizations.

Tabla 25 Emisiones de CH4 como un porcentaje de la tasa de generación total

Cabe mencionar que en la condición 1 representa que la correlación de la tasa de generación de biogás con la permeabilidad del gas se ha considerado positiva, mientras que en la condición 2 la correlación se considera negativa.

De acuerdo a la tasa de generación y para el supuesto con el que se ha construido la tabla de biogás acumulado presentada anteriormente, a continuación se hará un cálculo para conocer el volumen de biogás que podría formar parte de las fugas o migraciones. Cabe mencionar que existen situaciones en que las variaciones de presión generan grietas que permiten la entrada de aire en el vertedero, afectando así la calidad del biogás generado y por lo tanto se debe reducir la tasa de extracción para obtener la concentración optima, este tipo de extracción tiene como consecuencia una mayor tasa de emisiones o fugas, llegando incluso a valores sobre el 30% del biogás generado.

La tabla que se presenta a continuación representa que la tasa de generación que antes incluía una eficiencia de captura del 70% y por lo tanto un 30% de pérdidas o fugas, ahora se ha corregido para presentar un 80% de captura y un 20% de perdidas o fugas.

Capas - Humedos y filtraciones [MNm³]									
Periodos de 6 años	1	2	3	4	5	6	Suma 80%	Fugas 20%	Acumulado
1 a 6	426,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	487,5	121,9	487,5
6 a 12	108,5	426,6	0,0	0,0	0,0	0,0	611,5	152,9	1099,0
12 a 18	46,1	108,5	426,6	0,0	0,0	0,0	664,2	166,0	1763,2
18 a 24	30,8	46,1	108,5	426,6	0,0	0,0	699,4	174,8	2462,6
24 a 30	20,7	30,8	46,1	108,5	426,6	0,0	723,0	180,7	3185,6
30 a 36	13,6	20,7	30,8	46,1	108,5	426,6	738,5	184,6	3924,1
36 a 42	1,8	13,6	20,7	30,8	46,1	108,5	253,1	63,3	4177,2

Tabla 26 Consideraciones de fugas y captación de la generación de biogás

En el apartado que se refiere a la valorización energética, económica y ambiental se utilizaran los valores correspondientes a las fugas o migraciones para incluirlos en el balance general.

3.2 Producción de lixiviados

Un aspecto importante a considerar en el manejo de un vertedero casi independiente del objetivo de valorización de los residuos y específicamente del bigas, que se pueda tener en mente, lo conforman los lixiviados. Estos se generan y acumulan dentro del vertedero debido a múltiples razones, ya sea por la humedad inherente de los mismos residuos como por fenómenos atmosféricos como las precipitaciones, aguas superficiales, de manantiales o subterráneas. Anteriormente se ha mencionado a modo informativo como una alternativa la recirculación de estos, sin embargo en este apartado se aclara que no forma parte de una opción recomendable, básicamente porque la composición de la flora bacteriana encargada de llevar a cabo el proceso de generación del biogás posee rangos de tolerancia (temperatura, pH, concentración de nutrientes, etc.) que podrían considerarse restringidos, y que podrían poner en riesgo el continuo desarrollo de esta, y por ende de la producción de biogás.

Así entonces el lixiviado se considera como un residuo liquido del vertedero, que necesariamente debe ser retirado con el objetivo de evitar inundaciones y los problemas que este fenómeno acarrea, tales como imposibilitar la extracción del biogás, que se produzcan grietas internas que producirían fugas del biogás ya sea en su estado gaseoso así como disuelto en el mismo lixiviado (Christensen, *et al.*, 1996).

El contenido de los lixiviados es el producto del liquido que se filtra a través de los residuos sólidos que además extrae materiales disueltos o en suspensión, se incluyen en solución materiales biológicos y constituyentes químicos, existen diferencias en las composiciones de los lixiviados dependiendo del vertedero, una caracterización se puede hacer al tomar en cuenta por ejemplo si el vertedero es nuevo o maduro, la siguiente tabla presenta una descripción de esto.

	Valor, mg/l		
	Vertedero nuevo (menos de 2 años)		Vertedero maduro (mayor de 10 años)
Constituyente	Rango	Tipico	
DBO_5	2000 - 30000	10000	100 - 200
COT (Carbono orgánico total)	1000 - 20000	6000	80 - 160
DQO	3000 - 60000	18000	100 - 500
Total sólidos en suspensión	200 - 2000	500	100 - 400
Nitrógeno organico	10 - 800	200	80 - 120
Nitrógeno amoniacal	10 - 800	200	20 -40
Nitrato	5 - 10	25	5 - 10
Total de fósforo	5 - 100	30	5 - 10
Ortofosfato	4 - 80	20	4 - 8
Alcalinidad, $CaCO_3$	1000 - 10000	3000	200 - 1000
pH	4,5 - 7,5	6	6,6 - 7,5
Dureza, $CaCO_3$	300 - 10000	3500	200 - 500
Calcio	200 - 3000	1000	100 - 400
Magnesio	50 - 1500	250	50 - 200
Potasio	200 - 1000	300	50 - 400
Sodio	200 - 2500	500	100 - 200
Cloro	200 - 3000	500	100 - 400
Sulfatos	50 - 1000	300	20 - 50
Hierro total	50 - 1200	60	20 - 200

Tabla 27 Caracterización típica de los lixiviados en vertederos por edad de maduración

Estas composiciones solo se dan como una referencia, pues la composición de los lixiviados viaria mucho según la antigüedad del vertedero y la historia previa al muestreo, es decir dependiendo incluso de la etapa de metanización de los residuos por ejemplo.

La biodegradabilidad del lixiviado varia con el tiempo, la relación de la DBO_5/DQO ayuda a la supervisión de esta variable, al principio la relación rondara un valor de 0,5 o más, así entonces un valor de 0,4 a 0,6 indica que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los vertederos antiguos, la relación DBO_5/DQO se encuentra a menudo en el rango de 0,05 a 0,2, en estos se encuentra una mayor concentración de ácidos húmicos y fulvico, que no se degradan con facilidad.

Para entender cómo se forman los lixiviados y poder cuantificarlos se emplea un modelo de volumen de control, a continuación se muestra el esquema que ayuda a su comprensión.

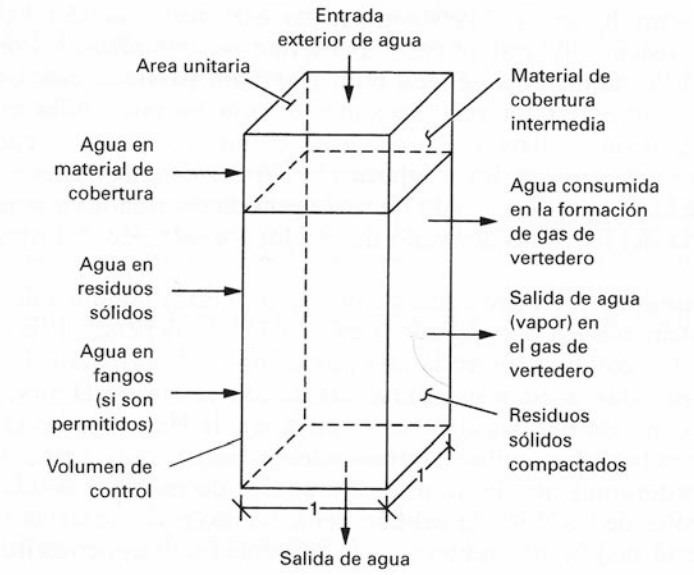

Ilustración 15 Balance de lixiviados en un volumen de control

Así entonces para obtener un estimativo del volumen de lixiviado que se podrían generar se podría hacer un balance donde los principales componentes son:

Entradas

- El agua presente en los residuos sólidos depositados (puede ser variable debido a factores que influyen desde la recogida y almacenamiento, hasta disposición, se recomienda hacer ensayos durante periodos húmedos y secos).
- El agua que entra como precipitaciones (el programa de evaluación hidrológica HELP permite evaluar las filtraciones, también existen métodos de cálculo que permiten obtener estimaciones).
- La humedad del material de cubrición (se pueden estimar aproximaciones utilizando datos de los distintos tipos de materiales)

Salidas

- El agua que abandona el vertedero formando parte del gas de vertedero (utilizada en la formación del biogás)
- El vapor de agua saturado en el propio biogás
- Escorrentía superficial
- Lixiviado (se le denomina así al agua que atraviesa una celda, sea la primera o la ultima, aunque existan sistemas de recolección intermedios)
- Evaporación

Se conoce la capacidad de campo como la cantidad de agua que se puede retener en el relleno del vertedero, cuando esta capacidad se supera es cuando se aparece el lixiviado, se obtienen estimaciones conociendo la humedad de los desechos y según el peso de sobrecarga por nivel, aunque para efectos prácticos solo tendremos en cuenta los factores fundamentales del balance.

Generalmente la cantidad de lixiviado está en función directa de la cantidad de agua externa que entra en el vertedero y cuando no se utilizan programas que modelen o evalúen el rendimiento hidráulico del vertedero se puede calcular un balance hídrico según la siguiente expresión.

$$Lixividos = H_2O_{prcp} + H_2O_{RSU} + H_2O_{cob} - H_2O_{ex} - H_2O_{fbiog} - H_2O_{inbioga} - H_2O_{evap}$$

Ecuación 17 Balance hídrico del vertedero

$Lixiviados$ = Masa de agua percolada o lixiviados

H_2O_{prcp} = Agua correspondiente a las precipitaciones

H_2O_{RSU} = Agua presente en los residuos

H_2O_{cob} = Agua presente en los materiales de cobertura (despreciable en el ejemplo de cálculo)

H_2O_{ex} = Agua de excorrentias (despreciable en el ejemplo de cálculo)

H_2O_{fbiog} = Agua consumida en la formación del biogás

H_2O_{inbiog} = Agua como vapor de agua en biogás

H_2O_{evap} = Agua por concepto de evaporación

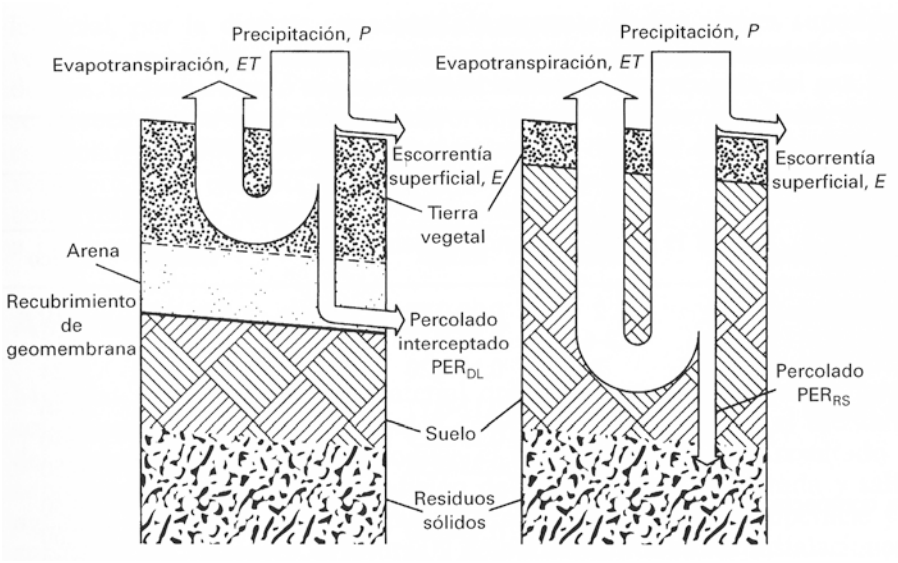

Ilustración 16 Representación del balance hídrico

En el caso de las precipitaciones a modo de ejemplo se han tomado los datos históricos de desde el 2007 al 2011 del Valles Occidental de Barcelona (Servei meteoróligic de Catalunya) para suponer un valor proyectado para la totalidad de años de funcionamiento (sin considerar los periodos húmedos ni secos), la tabla se muestra a continuación, como el dato de las precipitaciones es un dato en función de la superficie, entonces para tener un estimado del volumen mensual, se supondrá la superficie de un vertedero ya existente que posea una capacidad de carga similar (de acuerdo a la bibliografía consultada para el vertido de 400.000 ton/año, la superficie requerida ronda las 30 ha, se utilizara este valor), más adelante se planteara la estimación total de los lixiviados que podrían generarse.

	Precipitaciones mm/m²					
	2007	2008	2009	2010	2011	
Vallès Occidental VT Cerdanyola del Vallès	475,9	630,5	485	704,8	853,1	
Vallès Occidental VU Rellinars	527,2	712	474	800,8	654	
Vallès Occidental VV Sant Llorenç Savall	d.i.	d.i.	575,3	804,9	725,6	
Vallès Occidental D2 Vacarisses	550,7	762,1	550,5	867	761,8	
Vallès Occidental XC Castellbisbal		d.i.	575,4	631,2	510,4	
Vallès Occ. XF Sabadell - Parc Agrari			459,3	668,9	809,3	
Promedios	517,9	701,5	519,9	746,3	719,0	640,9

Servei meteorológic de Catalunya

Tabla 28 Valores de precipitaciones en función de la superficie para Catalunya

Si se considera que se ha reportado un valor del 35% de humedad inherente de los RSU, una estimación de los lixiviados corresponde a:

$$V_{lix} = 0{,}35 \cdot 400000 \frac{ton}{\text{año}} = 143500 \frac{m^3}{\text{año}} \approx 140000 \frac{m^3}{\text{año}}$$

Ecuación 18 Aporte de la humedad de los residuos en el volumen de lixiviado

Ahora tomando en cuenta las precipitaciones registradas para la zona del Valles Occidental y utilizando el valor promedio por año, la expresión usada para estimar el volumen de agua caída sobre el vertedero es:

$$V_{prcp} = \frac{mm/m^2 \cdot S_v}{1000}\left(\frac{m^3}{mes}\right) = \frac{640{,}9\,\frac{mm}{m^2 año} \cdot 300000 m^2}{1000} = 192270 m^3/año$$

Ecuación 19 Aporte de las precipitaciones en el volumen de lixiviado

En general la mayoría de las entradas y salidas de agua son necesariamente evaluables con ensayos, sin embargo el agua consumida en la descomposición anaerobia se podría estimar utilizando las ecuaciones de estequiometría para el caso.

$$C_a H_b O_c N_d + \left(\frac{4a - b - 2c + 3d}{4}\right) H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right) CH_4 + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8}\right) CO_2 + dNH_3$$

Ecuación 20 Aporte correspondiente al aporte de la reacción en el volumen de lixiviado

Se puede hacer la suposición para el cálculo de la fracción rápidamente y lentamente descomponibles, de acuerdo a las estimaciones molares de los residuos se obtienen las siguientes composiciones (sin considerar las cenizas).

	C	H	O	N	S
g/mol	12,01	1,01	12	14,01	32,06
Moles totales					
Rápidamente descomponible	1,651	2,663	1,207	0,024	0,003
Lentamente descomponible	0,320	0,475	0,153	0,016	0,000

Tabla 29 Relación molar de los componentes para la estimación del aporte hídrico de la reacción a los lixiviados

Para obtener los factores estequiometricos de las correspondientes categorías, es necesario equilibrar la ecuación, así entonces los valores obtenidos son:

Componente	Relacíon mol (nitrógeno=1)	
	Rápidamente descomponible	Lentamente descomponible
Carbono	68,5	19,5
Hidrógeno	110,5	29
Oxígeno	50,1	9,2
Nitrógeno	1	1

Tabla 30 Valores estequiometricos correspondientes al aporte hídrico de la reacción a los lixiviados

Así entonces para residuos que se descomponen rápida y lentamente las formulas quedan respectivamente como:

a) $C_{68}H_{111}O_{50}N$
b) $C_{20}H_{29}O_9N$

Como se ha mencionado, en ambos casos se desprecia el azufre.

Así los correspondientes índices para el resto de la ecuación de generación quedan:

$$\underset{1741,0}{C_{68}H_{111}O_{50}N} + \underset{288}{16H_2O} \rightarrow\rightarrow \underset{560}{35CH_4} + \underset{1452,0}{33CO_2} + \underset{17}{NH_3}$$

Ecuación 21 Formula de la reacción y consumo hídrico

Se indican los pesos moleculares de los componentes de la reacción.

El cálculo de los lixiviados para este trabajo considerara la masa de agua absorbida por kg de residuos sólidos volátiles rápidamente biodegradables secos y destruidos (SVRB) es:

$$Agua\ consumida = \frac{288}{1741,0} = 0,165\ kg\ \frac{H_2O}{kg} SVRB\ destruidos$$

Ecuación 22 Consumo hídrico por kg de SVRB

Según estimaciones reportadas, se puede asumir para la cuantificación del los lixiviados un valor de generación de biogás en función de los SVRB de

$$223,61\ \frac{kg\ SVRB}{m^3}$$

Entonces

$$Agua\ consumida = \frac{0,615\ kgH_2O/kg\ SVRB\ destruidos}{223,61\ kg/m^3\ SVRB\ destruidos} = 7,3789\ kg\ H_2O/m^3$$

Ecuación 23 Consumo hídrico en función de la generación de biogás de los SVRB

Estos valores representan el máximo teórico de generación, tanto del biogás como de los lixiviados.

Otros datos de generación que consideran un mayor grado de limitaciones y que se han presentado en la literatura para residuos orgánicos mezclados, reportan un valor más ajustado a las condiciones medidas, el valor reportado es:

$$0,75\ \frac{m^3}{kg\ SVB}$$

Por lo que, asumiendo la estequiometría, el agua consumida seria:

$$H_2O_{fbiog} = \frac{0{,}615\ kgH_2O/kg\ SVB}{0{,}75\ m^3/kg\ SVB} = 0{,}22\ kg\ H_2O/m^3 de\ biogas$$

Ecuación 24 Consumo hídrico en función del biogás generado

El vapor de agua presente en el biogás se podría calcular suponiendo que a la salida el biogás está saturado en vapor de agua, así entonces aplicando la ley de los gases ideales se podría estimar esta masa de agua.

$$P_v V = nRT$$

Ecuación 25 Ley de los gases ideales

P_v = Presión de vapor del agua a una temperatura T, (atm)

V = Volumen, (l)

n = Numero de moles

R = Constante de los gases, 0,082 (atm l K^{-1})

T = Temperatura, °K

El valor numérico para la masa de vapor de agua contenida por litro de gas de vertedero a 32°C se obtiene de la siguiente forma:

P_v = 42,175 mm Hg, es decir 0,055 atm a 35°C

V = 1 l

n = Numero de moles

R = Constante de los gases, 0,082 (atm l K^{-1})

T = 35 °C, lo que serian 308,5 °K

$$n = \frac{P_v \cdot V}{RT} = \frac{0{,}055 \cdot 1}{0{,}082 \cdot 308{,}15} = 0{,}0022\ moles\ \cdot 18 \frac{kg}{kg \cdot mol} = 0{,}039\ \frac{kg\ H_2O}{m^3 biogas} = H_2O_{inbiog}$$

Ecuación 26 Moles de agua que ingresan al balance en el biogás generado

En el caso de la evaporación, la estimación que se hace corresponde a la evaporación superficial por efecto de la radiación, el cálculo se realiza para todo un año y se obtiene una proyección de la cantidad total evaporada, le metodología de cálculo y la tabla resumen se muestra a continuación.

$$H_2O_{evap} = \frac{\alpha \cdot R_m \cdot S_v}{L}$$

Ecuación 27 Obtención de volumen correspondiente a la evaporación

Donde:

α = Coeficiente de absorción para radiación solar, 0,75

R_m = Radiacion media mensual, MJ/m^2

S_v = Superficie útil, 300000 m^2

L = Calor latente del cambio de fase, 2440 MJ/m^3

Los resultados se muestran en la tabla para el año 2010, como forma estimativa se proyectaran luego para todo el periodo de funcionamiento y explotación.

2010		
Radiacion Barcelona	MJ/m²	m³
Enero	6,8	627,0
Febrero	9,7	889,9
Marzo	13,9	1279,9
Abril	18,5	1709,6
Mayo	22,3	2051,7
Junio	24,0	2215,9
Julio	23,4	2155,0
Agosto	20,4	1883,0
Septiembre	16,1	1480,0
Octubre	11,4	1051,2
Noviembre	7,7	712,8
Diciembre	6,0	557,0
Totales	180,2	16613,1

Tabla 31 Radiación media mensual para Barcelona 2010

Ya se han obtenido los valores por concepto de entradas y salidas de agua del vertedero, por lo que para la superficie supuesta, se puede llevar a cabo el balance que permitirá tener la primera estimación de los lixiviados que se podrían generar, según la ecuación del balance de aguas descrita anteriormente, se tiene:

$$Lixividos = H_2O_{prcp} + H_2O_{RSU} + H_2O_{cob} - H_2O_{ex} - H_2O_{fbiog} - H_2O_{inbioga} - H_2O_{evap}$$

Ecuación 28 Balance hídrico del vertedero

H_2O_{prcp} = 192.270 m^3/año

H_2O_{RSU} = 140.000 m^3/año

H_2O_{cob} = Se desprecia

H_2O_{ex} = Se desprecia

H_2O_{fbiog} = No se puede dar un valor fijo, pues la generación cambia con el tiempo, la evolución

se muestra en la tabla, sin embargo el factor utilizado es de 0,00022 $\frac{m^3\ H_2O}{m^3\ Biogas}$

H_2O_{inbiog} = No se puede dar un valor fijo, pues la generación cambia con el tiempo, la evolución se muestra en la tabla, sin embargo el factor utilizado es de 0,000039 $\frac{m^3\ H_2O}{m^3\ Biogas}$

H_2O_{evap} = 16613,1 $\frac{m^3\ H_2O}{m^3\ Biogas}$

Entonces,

Lixiviados = De acuerdo a los cálculos la generación media de lixiviados por año podría rondar los ~300.000 m^3.

Si bien el volumen de lixiviados podría parecer excesivo, se debe tener en cuenta que no se ha considerado la recirculación, en muchos vertederos con valorización de residuos se ha optado por incluir un circuito de recirculación que incluso podría llegar a recircular el 60 o 70% del volumen total, se han mencionado las principales razones por las que incluir un circuito de recirculación no forma parte de este trabajo. Los cálculos se presentan a continuación.

	Lixiviados		m³	m³	m³	m³	m³	m³
años	[Nm³/ton RSU]	[MNm³/año]	RSU ~ 35%	Presip	Formación	Como vapor de agua	Evaporación	total
1	113,03	53,01	140000	192270	11662,0	2067,4	16613,1	301927,6
2	45,46	74,33	140000	192270	16352,6	2898,9	16613,1	296405,5
3	20,36	83,88	140000	192270	18452,7	3271,2	16613,1	293933,1
4	10,88	88,98	140000	192270	19575,6	3470,2	16613,1	292611,0
5	7,18	92,35	140000	192270	20316,5	3601,6	16613,1	291738,8
6	5,61	94,98	140000	192270	20895,8	3704,2	16613,1	291056,9
7	4,85	97,25	140000	192270	21395,7	3792,9	16613,1	290468,3
8	4,38	99,31	140000	192270	21848,0	3873,1	16613,1	289935,8
9	4,05	101,21	140000	192270	22265,4	3947,1	16613,1	289444,4
10	3,76	102,97	140000	192270	22653,9	4015,9	16613,1	288987,1
11	3,51	104,62	140000	192270	23016,5	4080,2	16613,1	288560,2
12	3,29	106,16	140000	192270	23355,5	4140,3	16613,1	288161,1
13	3,07	107,60	140000	192270	23672,5	4196,5	16613,1	287788,0
14	2,87	108,95	140000	192270	23969,0	4249,0	16613,1	287438,9
15	2,69	110,21	140000	192270	24246,3	4298,2	16613,1	287112,4
16	2,51	111,39	140000	192270	24505,8	4344,2	16613,1	286806,9
17	2,35	112,49	140000	192270	24748,6	4387,2	16613,1	286521,1
18	2,20	113,53	140000	192270	24975,6	4427,5	16613,1	286253,8
19	2,06	114,49	140000	192270	25188,1	4465,2	16613,1	286003,7
20	1,93	115,39	140000	192270	25386,8	4500,4	16613,1	285769,7
21	1,80	116,24	140000	192270	25572,7	4533,3	16613,1	285550,8
22	1,69	117,03	140000	192270	25746,7	4564,2	16613,1	285346,1
23	1,58	117,77	140000	192270	25909,4	4593,0	16613,1	285154,5
24	1,48	118,46	140000	192270	26061,6	4620,0	16613,1	284975,3
25	1,38	119,11	140000	192270	26204,0	4645,3	16613,1	284807,6
26	1,29	119,71	140000	192270	26337,2	4668,9	16613,1	284650,8
27	1,21	120,28	140000	192270	26461,8	4691,0	16613,1	284504,1
28	1,13	120,81	140000	192270	26578,4	4711,6	16613,1	284366,8
29	1,06	121,31	140000	192270	26687,5	4731,0	16613,1	284238,4
30	0,99	121,77	140000	192270	26789,5	4749,1	16613,1	284118,3
31	0,93	122,20	140000	192270	26885,0	4766,0	16613,1	284005,9
32	0,87	122,61	140000	192270	26974,3	4781,8	16613,1	283900,8
33	0,81	122,99	140000	192270	27057,8	4796,6	16613,1	283802,5
34	0,76	123,35	140000	192270	27136,0	4810,5	16613,1	283710,4
35	0,71	123,68	140000	192270	27209,1	4823,4	16613,1	283624,4
36	0,00	70,67	140000	192270	15547,1	2756,1	16613,1	297353,7
								287806,5

Tabla 32 Generación media de lixiviados por año para el caso que se ha planteado

Capitulo 4

4.1 Estimación del potencial energético y consideraciones de la explotación

De acuerdo a los cálculos hechos anteriormente, se han obtenido valores referentes al volumen de biogás total que se podría generar y capturar, además de los correspondientes a las fugas o migraciones, todo referido a una población hipotética asumiendo los valores y características de los residuos que reporta la Generalitat de Catalunya.

Para establecer el régimen de explotación del recurso energético generado se debe tener en cuenta una dinámica de vertido que está condicionada básicamente por la geometría del vertedero, es decir que la capacidad de llenado del vertedero determinara dicho régimen. Como se ha mencionado antes, a modo de ejemplo se ha esquematizado una configuración hipotética del vertedero, en adelante la configuración a evaluar considera 6 capas de 6 secciones cada una, donde cada capa supondrá una superficie aproximada de 30 ha.

Para efectos de cálculo no se especificaran las dimensiones del vertedero, sino que directamente se considerara que cada capa se rellenara cada 6 años por lo que el vertido de residuos se lleva a cabo hasta el año 36, sin embargo al presentar los resultados se mostrara la evolución post cierre.

Al momento de hacer el cálculo del potencial energético del biogás de vertedero existen muchas referencias acerca del poder calorífico de este, sin embargo el rango que se maneja es entre 4,9 – 8,8 kWh/Nm^3, en este trabajo se tomara un valor de 5,815 kWh/Nm^3 correspondiente a datos reportados por Urbaser S.A.

El potencial energético se calcula considerando una captación del 80% del biogás total generado, para luego considerar una disponibilidad del 75%, de este potencial energético se obtiene la energía que requiere el proceso de evaporación de los lixiviados. Para ello se plantea el uso de 2 calderas auxiliares capaces de generar la energía suficiente para tratar el 100% de los lixiviados, luego en las etapas posteriores se podrá prescindir de una parte de la potencia de las calderas y completar el requerimiento energético del tratamiento con el calor generado por las maquinas térmicas seleccionadas para la producción de electricidad.

Las calderas seleccionadas son capaces de trabajar en un regimen continuo durante todo el año ofreciendo una eficiencia de conversion igual o superior al 90% y como medida de precausion el calor obtenido siempre supera al requerido por el proceso, exepto en el primer año de explotacion.

Para la eleccion de las maquinas termicas que se utilizaran para la cogeneracion (electricidad y calor) se encuentran principalmente la turbina de gas y el motor alternativo (ciclo Otto), a continuación se mencionan algunas características de ambos que nos llevaran finalmente a decantar la decisión por el motor alternativo.

- El rendimiento eléctrico del motor alternativo se encuentra en el orden del 40% frente al 30% que presentan las turbinas de gas.
- Aunque el rendimiento térmico de las turbinas es superior al que presenta el motor alternativo cuyos valores se encuentran en el rango del 50% y 26% respectivamente, el objetivo de este trabajo privilegia la obtención de energía eléctrica pues la parte importante del requerimiento de calor al comienzo lo proporcionan las calderas.
- El coste de mantenimiento del motor de combustión interna es menor al de una turbina de gas y aun más si se trata de quemar un carburante gaseoso.
- Los motores alternativos poseen un rango más amplio de empleabilidad que las turbinas, esto se refleja en la variabilidad de tamaños, seguridad y eficiencia.
- La frecuencia de generación en el caso del motor alternativo puede ser regulada con mayor precisión.
- Los motores alternativos poseen una vida útil más prolongada que las turbinas de gas (incluso 80000 horas hasta la primera revisión).
- Los motores alternativos poseen una mejor adaptación a las variaciones de demanda, relaciones de arranque y paradas que no podrían ser soportados por una turbina de gas.
- Por el carácter modular con el que se pretende llevar a cabo la explotación, nuevamente se favorece la elección de los motores por su facilidad de ampliación, frente a las turbinas específicamente.

Como se ha comentado, debido al carácter progresivo de explotacion las unidades de generacion (electrica y de calor) se proyectan de forma modular, de acuerdo al caudal disponible en el periodo y a los requerimientos de la instalacion.

El tratamiento del biogas previo ingreso al motor alternativo se menciona mas adelante asi como las caracteristicas de los procesos (principalmente la eliminacion del Azufre que se pueda encontrar presente) para que el biogas tenga las condiciones optimas que requiere el motor.

A continuacion se presentan las estimaciones del potencial energetico de acuerdo a las restricciones de captura, fugas y disponibilidad cmentadas anteriormente, para el periodo de vertido y algunos años de extencion en los que se podria seguir explotando el vertedero.

	[MNm³/año]						SUMA	Captura 80%	Disponible 75%	Caudal 8000h	Potencial
años	1	2	3	4	5	6	[MNm³/año]	**[MNm³/año]**	**[MNm³/año]**	**[Nm³/h año]**	energético **[MW]**
1	46,4						46,4	53,0	39,8	4969,6	28,9
2	65,0						65,0	74,3	55,7	6968,4	40,5
3	73,4						73,4	83,9	62,9	7863,4	45,7
4	77,9						77,9	89,0	66,7	8341,9	48,5
5	80,8						80,8	92,3	69,3	8657,6	50,3
6	83,1						83,1	95,0	71,2	8904,4	51,8
7	38,7	46,4					85,1	97,3	72,9	9117,5	53,0
8	21,9	65,0					86,9	99,3	74,5	9310,2	54,1
9	15,2	73,4					88,6	101,2	75,9	9488,1	55,2
10	12,2	77,9					90,1	103,0	77,2	9653,6	56,1
11	10,7	80,8					91,5	104,6	78,5	9808,2	57,0
12	9,8	83,1					92,9	106,2	79,6	9952,6	57,9
13	9,1	38,7	46,4				94,2	107,6	80,7	10087,7	58,7
14	8,4	21,9	65,0				95,3	108,9	81,7	10214,0	59,4
15	7,9	15,2	73,4				96,4	110,2	82,7	10332,2	60,1
16	7,4	12,2	77,9				97,5	111,4	83,5	10442,8	60,7
17	6,9	10,7	80,8				98,4	112,5	84,4	10546,3	61,3
18	6,4	9,8	83,1				99,3	113,5	85,1	10643,0	61,9
19	6,0	9,1	38,7	46,4			100,2	114,5	85,9	10733,6	62,4
20	5,6	8,4	21,9	65,0			101,0	115,4	86,5	10818,2	62,9
21	5,3	7,9	15,2	73,4			101,7	116,2	87,2	10897,5	63,4
22	4,9	7,4	12,2	77,9			102,4	117,0	87,8	10971,6	63,8
23	4,6	6,9	10,7	80,8			103,0	117,8	88,3	11040,9	64,2
24	4,3	6,4	9,8	83,1			103,7	118,5	88,8	11105,8	64,6
25	4,0	6,0	9,1	38,7	46,4		104,2	119,1	89,3	11166,5	64,9
26	3,8	5,6	8,4	21,9	65,0		104,8	119,7	89,8	11223,2	65,3
27	3,5	5,3	7,9	15,2	73,4		105,2	120,3	90,2	11276,4	65,6
28	3,3	4,9	7,4	12,2	77,9		105,7	120,8	90,6	11326,0	65,9
29	3,1	4,6	6,9	10,7	80,8		106,1	121,3	91,0	11372,5	66,1
30	2,9	4,3	6,4	9,8	83,1		106,5	121,8	91,3	11416,0	66,4
31	2,7	4,0	6,0	9,1	38,7	46,4	106,9	122,2	91,7	11456,7	66,6
32	2,5	3,8	5,6	8,4	21,9	65,0	107,3	122,6	92,0	11494,7	66,8
33	2,4	3,5	5,3	7,9	15,2	73,4	107,6	123,0	92,2	11530,3	67,0
34	2,2	3,3	4,9	7,4	12,2	77,9	107,9	123,3	92,5	11563,6	67,2
35	2,1	3,1	4,6	6,9	10,7	80,8	108,2	123,7	92,8	11594,8	67,4
36	1,7	2,9	4,3	6,4	9,8	83,1	108,2	123,7	92,8	11594,8	67,4
37	1,3	2,7	4,0	6,0	9,1	38,7	61,8	70,7	53,0	6625,2	38,5
38	0,9	2,5	3,8	5,6	8,4	21,9	43,2	49,3	37,0	4626,4	26,9
39	0,6	2,4	3,5	5,3	7,9	15,2	34,8	39,8	29,9	3731,4	21,7
40	0,3	2,2	3,3	4,9	7,4	12,2	30,4	34,7	26,0	3252,9	18,9
41	0,0	2,1	3,1	4,6	6,9	10,7	27,4	31,3	23,5	2937,2	17,1
42	0,0	1,7	2,9	4,3	6,4	9,8	25,1	28,7	21,5	2690,3	15,6

Tabla 33 Resumen de captura, disponibilidad, potencias y configuración de la instalación.

Se han modelado diferentes alternativa referentes a las necesidades a cubrir, teniendo en cuenta primero la obtencion de la energia que requiere el proceso de evaporacion de los lixiviados, y luego la obtencion de energia.

Existe la posibilidad de estructurar de forma modular la instalacion, considerando al comienzo el aporte total de calor por parte de las calderas y luego regular y combinar el funcionamiento de las calderas y los motores generadores.

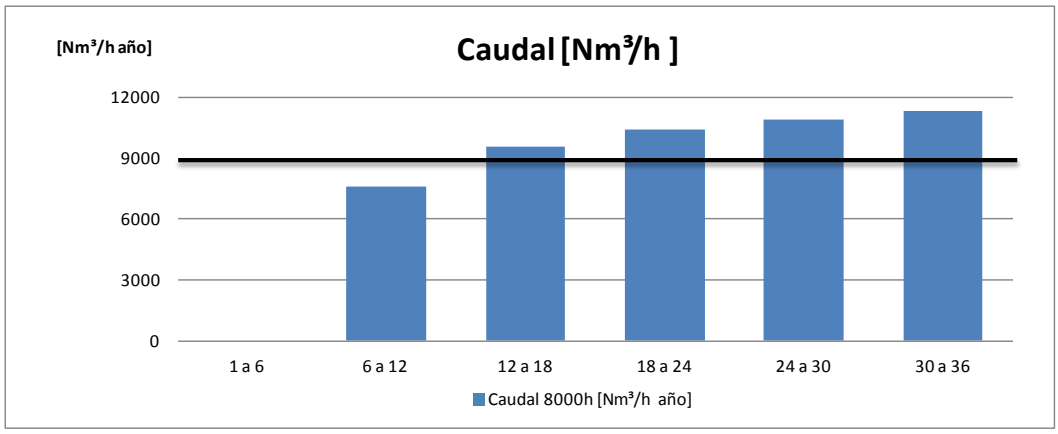

Ilustración 17 Representación grafica del caudal de funcionamiento.

Una representación grafica del proceso se puede observar en la siguiente ilustración, donde la unidad de secado en este caso se constituye del calor aportado por calderas y motores a un sistema intercambiador de calor.

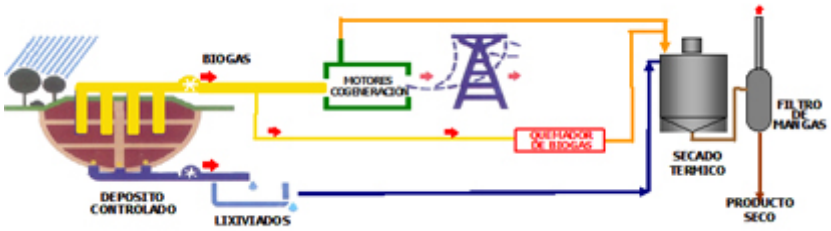

Ilustración 18 Esquema representativo de la instalación

La siguiente grafica esquematiza que la demanda de calor requerida para el tratamiento de los lixiviados se cubre en todo el periodo de explotación del vertedero.

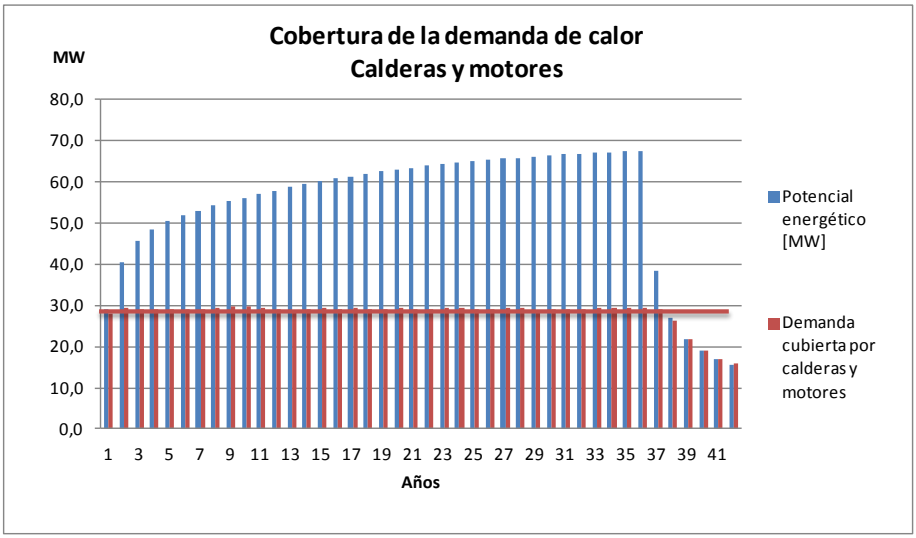

Ilustración 19 Cobertura de la demanda de calor para el tratamiento de lixiviados.

Se observa que se cubre totalmente la demanda de calor para el tratamiento de los lixiviados, cabe mencionar que los residuos generados en el proceso de secado se dispondrán adecuadamente en un deposito especial clase III.

4.1.1 **Red de tuberías y captación**

La zona de captación del biogás se considera abarcando la totalidad de la superficie del vertedero, como un gran rectángulo, sería lógico pensar que la red de captación y extracción se extiende por uno de los lados más largos de dicho rectángulo con tomas de unión en cada una de las 6 secciones, para finalmente llegar al equipo aspirador.

En este sentido y como se ha planteado un escenario hipotético, tanto el numero de pozos como su configuración no serán especificados, sino que los cálculos se harán para un caudal aspirado, permitiendo así hacer una estimación de las potencias requeridas por la unidad de aspiración.

Considerando un caudal de referencia que no se encuentre muy cerca de los límites del máximo, un valor que resulta dentro de los márgenes de manejo podría ser de 9000 m³/h.

Para el cálculo de las potencias requeridas del conjunto de sopladores que permitiría llevar a cabo la elección de los conjuntos, es necesario considerar los equipos como maquinas hidráulicas teniendo en cuanta que se establecen condiciones de presión y temperatura tanto en el pozo de extracción como en el motor alternativo, la expresión que permitiría obtener el valor de la potencia es:

$$P_S = \frac{1}{\eta_S} * \dot{V} * \Delta P$$

Ecuación 29 Calculo de potencia para el conjunto de soplantes

Donde

P_S : Potencia eléctrica absorbida por el soplador [kW]

η_S : Rendimiento global del equipo soplador

$\dot{V}$: Caudal volumétrico de cálculo [m³/h]

ΔP : Variación de presión entre el pozo de captación y la maquina térmica

Antes de llevar a cabo el cálculo se debe especificar el valor de las variables que se consideraran, pues cabe recordar que seguimos un escenario hipotético.

En el caso del rendimiento de la unidad propulsora o del soplador, según referencias bibliográficas para sopladores de aire el rendimiento se encuentra en el rango del 70 al 90 %, sin embargo para el movimiento de biogás se reportan rendimientos cercanos al 60%, por lo que se considera este valor.

El caudal volumétrico de cálculo se considera como la mitad del valor máximo estimado, es decir se hace para el valor medio de cada periodo en condiciones reales, es decir a una temperatura aproximada de 35 ºC y no 0 ºC como se considera para las condiciones normales.

La variación de presiones se podría calcular de acuerdo por un lado al requerimiento de la maquina térmica, que en el caso del motor alternativo varia en el rango de 0,07 a 3 bar, para el ejemplo de cálculo y como se indicara más adelante en la elección del motor y calderas, se considerara una presión de operación de 1,5 bar; mientras que en la presión en el pozo se estima en un valor de -100 mbar (manométricos), así entonces la variación de presiones desde el pozo de captación hasta la cámara de combustión como para la entrada en caldera es aproximadamente 150000 – 91325 Pa, es decir 58675 Pa (se usa el sistema internacional de medidas para obtener el valor en kW).

En el caso del consumo eléctrico, este se calcula tomando en cuenta la potencia requerida para el periodo durante el tiempo de utilización, antes se ha mencionado que el año se considera como 8000 h, pues entonces la siguiente tabla resume los valores obtenidos para los distintos periodos.

Periodos de 9 años	Caudal 8000h **[Nm³/h año]**	Caudal de calculo **[Nm³/h]**	Caudal de calculo **[m³/h]**	Potencia electrica soplantes [KW]	Consumo electrico [MWh/año]
1 a 6	7617,55	3808,8	4296,8	116,8	934,2
6 a 12	9555,0	4777,5	5389,7	146,5	1171,8
12 a 18	10377,7	5188,8	5853,7	159,1	1272,6
18 a 24	10927,9	5464,0	6164,1	167,5	1340,1
24 a 30	11296,8	5648,4	6372,1	173,2	1385,4
30 a 36	11539,2	5769,6	6508,9	176,9	1415,1

Tabla 34 Consumos eléctricos respectivos al conjunto de soplantes

La unidad de succión entonces podría estar compuesta por 5 equipos de potencia unitaria 40 kW, así entonces se comenzaría el periodo de explotación con la configuración que permita superar el caudal de cálculo a ser extraído (de esta forma se satisface la necesidad de extracción), el caudal unitario por soplador es de 2000 m³/h.

4.1.2 **Control de variables**

Ya se han llevado a cabo los cálculos generales que permitirían una extracción del biogás sin mayores problemas, se han utilizado criterios de cálculo reservados, entre los cuales figuran la reducción del caudal disponible, llamándolo ahora caudal de cálculo; además se ha dimensionado la unidad de soplado y el numero de sopladores para que se cuente con una potencia eléctrica de soplado siempre superior a lo requerido.

Se ha indicado que la presión relativa del biogás en el interior del pozo es negativa, y de acuerdo a esta premisa, es necesario tener en cuenta el control de esta y otras variables, para así evitar imprevistos.

Ya se ha mencionado la importancia de la composición del biogás, en los próximos apartados se mencionaran equipos de medida que permitirían mantener un monitoreo de esta, además de la temperatura, presión y caudal del biogás extraído.

Existe una amplia gama de instrumentación que permite el monitoreo de estas variables y con muy buena precisión, con los registros de estos datos se podrían modelar condiciones y características del

vertedero para mejorar el conocimiento que se tiene del proceso de extracción que hasta ahora no se han incluido, tales como la antigüedad de un sitio especifico y su tasa de extracción o tal vez dirigidos a una mejor instalación de los pozos (profundidad, separación, sellos, etc).

4.1.3 **Presiones**

Los manómetros utilizados en la toma de datos generalmente son instrumentos robustos desde conceptos tan simples como los en forma de "U" (de los más utilizados por la buena relación de fiabilidad/coste), hasta complejos equipos multiparametros o incluso extractores de muestra.

Se debe tener en cuenta que la generación continua de biogás y la instalación de un equipo extractor generan una depresión al contrario del caso en que no se lleva a cabo la extracción, así entonces se debe tener cuidado de no exceder la depresión, pues se debe evitar la entrada de aire para no perjudicar la composición del biogás y evitar que se puedan producir accidentes. Así entonces Straka *et al.*, 1995 menciona que las depresiones aumentan aguas arriba, en los aspiradores hasta los – 100 mbar, lo que corresponde al calculo que se ha llevado a cabo para conocer las potencias del conjunto aspirador, luego, referente a las medidas de las presiones, se puede establecer un rango de medida entre:

-20 mbar y 20 mbar, con una precisión del 0,001%

El sistema de medida idealmente seria portátil y robusto para trabajar en ambientes expuestos, la toma de muestra se puede hacer en el cabezal de la línea de conducción, generalmente se cuenta con sistemas adaptados para su inserción.

4.1.4 **Temperatura**

Las distintas razones que hacen necesaria la medida de la temperatura consideran entre las más importantes el hecho de que se produzcan condensados en la línea de extracción del biogás camino del compresor, la medida de esta variable dentro del pozo de captación involucraría tener sensores de temperatura dentro de los mismos, lo que no permitiría recambios, calibraciones, etc. por lo que no se considera la mejor opción. En este caso se consideran medidas correctivas y entre la más utilizada se encuentra la trampa de condensados, específicamente en los puntos bajos de la línea, cuando la legislación lo permite, los condensados son devueltos al vertedero y cuando no, estos podrían ser almacenados en cámaras subterráneas para luego ser bombeados a la superficie y ser tratados antes de su disposición, la siguiente figura ilustra un dispositivo que cuenta con una trampa que devuelve el condensado al vertedero.

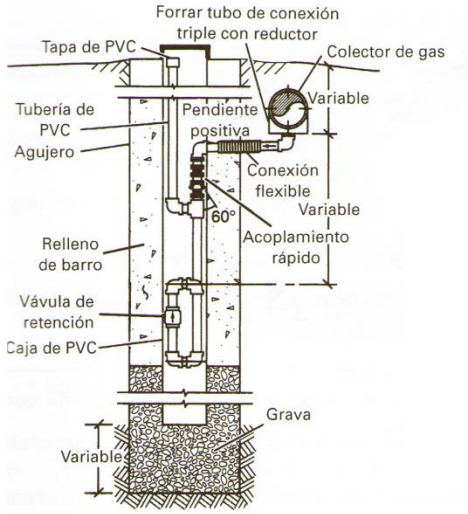

Ilustración 20 Esquema que representa una trampa de condensados

Otro punto importante donde medir la temperatura es en las chimeneas de seguridad, pues independiente de que se gestione la explotación del biogás, existe una fracción que será incinerada en chimeneas de control, otro sería el caso si se considerara la destrucción térmica de todo el biogás (sería necesaria una estación de destrucción térmica),y en las chimeneas de control se debe garantizar que se obtiene la total destrucción de COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) y de otros compuestos que puedan estar presentes en el biogás, un requisito típico considera una temperatura de incineración mínima de 850 °C y un tiempo de residencia de 0,3 a 0,5 s.

4.1.5 **Caudal**

En el caso del caudal lo adecuado es contar con sondas instaladas, por eso es necesario instalar algunas tal como si fueran las mismas tuberías de extracción, sin embargo y aunque existen variadas tecnologías que permitirían la cuantificación del caudal, no son totalmente representativas ya que no se generan las mismas condiciones de extracción con las que trabajan los distintos puntos de succión, es así entonces que se deben considerar como la mejor alternativa caudalimetros que se incluyen en la línea de transporte como si fueran válvulas permitiendo así conocer de forma precisa e instantánea el flujo de trabajo que pasa por la tubería, este sistema no cuenta con la autonomía y disponibilidad para hacer pruebas en todas las secciones por lo que debería ser instalado en sectores representativos tales como conductos principales.

Existen dispositivos que se han desarrollado en el último tiempo que poseen la capacidad de ser transportados a distintos puntos de control y que entregan lecturas precisas no solo del caudal sino que también de la composición y humedad de este, todo mediante su principio ultrasónico (existen también equipos portátiles que mediante tecnología infrarroja también son capaces de composición, la capacidad del infrarrojo es que se puede utilizar a distancia). Estos tipos de dispositivos han reemplazado a los sistemas extractores portátiles utilizados años atrás, básicamente por la simplicidad y confiabilidad del método. Además se puede obtener bastante información de las medidas, que

permitirían conocer la calidad del biogás ya sea conociendo la concentración de metano como el contenido de aire (altos niveles de O_2 ~5%, representan un nivel alto de aire que ha entrado).

En conjunto las medidas ya sea de caudal instantáneo, como de contenido de metano y oxigeno proporcionan los datos que permitirán establecer el optimo de extracción, y más específicamente la depresión que debería generar el equipo soplador, este tipo de procedimiento se puede llevar a cabo con la frecuencia que se desee y realizar las variaciones de extracción que resulten convenientes, de acuerdo a estas acciones se podrá verificar si los modelos y cálculos de dimensionamiento son correctos y como se podrían mejorar.

4.1.6 Concentraciones

Como se ha comentado anteriormente de forma superficial en la medición de caudales, actualmente se pueden encontrar en el mercado instrumentos que son capaces de medir in situ distintas variables, incluyendo las concentraciones del metano presente en el biogás que se extrae.

Se ha mencionado también la importancia de llevar el control de la relación de concentraciones de metano y oxigeno, básicamente porque se podrían tener episodios de extracción en que el biogás no posea la calidad deseada u optima. La mezcla del biogás con el aire disminuye la concentración de metano y como consecuencia su poder calorífico, además superado el 10% de concentración de O_2 se corre el riesgo de una formación explosiva en la línea de conducción y por último la entrada de aire y específicamente de O_2 afecta los procesos de degradación anaerobia.

En el caso de las fugas, las mediciones superficiales se consideran un mecanismo correctivo que permitiría remediar las posteriores coberturas de las secciones a llenar además de dar a conocer una condición quizás de sobrepresión en el vertedero y que posiblemente podría ser solucionado sin excederse mediante una variación de los equipos de succión.

Hace tiempo y dada la dificultad para llevar a cabo este ensayo, básicamente porque visualmente las fugas son imperceptibles, solo se pueden detectar por el olor y al observarse un charco de agua burbujeante. Actualmente se cuenta con equipos que como se ha mencionado antes, mediante tecnología infrarroja son capaces de detectar y cuantificar fugas, el principio de funcionamiento está basado en la absorción del laser del detector en una nube de metano, así entonces se absorbe una parte especifica de la luz infrarroja permitiendo la detección de la fuga a una distancia segura (información de equipos SEWERIN).

4.1.7 Sistema de extracción y manejo del biogás

El sistema de extracción se debe plantear siguiendo la lógica de generación y movilidad del biogás, es decir, pensando que el flujo de gas tiende a salir por las zonas de mayor permeabilidad, que la mayoría de las veces suele ser la superficie. Al instalar tuberías de captación se otorga una vía de escape al flujo de gas, la idea, y como se ha mencionado antes es aprovechar el biogás y por ende la alternativa es crear la depresión suficiente para su extracción y transporte hasta los equipos térmicos.

Son varios los factores que influyen en la mejor opción de diseño de un conjunto de pozos de captación y de acuerdo a ello se calcula en detalle la depresión óptima, antes y como se ha hecho en este trabajo se pueden plantear cálculos que direccionan la mejor opción. El detalle consiste en afinar ese direccionamiento para un mayor aprovechamiento energético (contenido de metano) que ya se ha mezclado con aire permanezca lo más estable posible, para no afectar ni posterior metanización ni al poder calorífico del biogás extraído.

Las hipótesis más utilizadas para modelar el volumen de control de donde se pretende extraer el biogás consideran la forma de un cilindro, y de acuerdo a esto se obtiene un radio de control, el límite de este radio de control se considera como una posible vía de escape ya que no se podría asegurar su captura y la razón podría asumirse como puntos de sobrepresión.

Según Genderbien *et al.*, 1992 el diseño de captación se puede llevar a cabo una vez acotada la depresión optima, y ajustar la ubicación de los pozos luego de los correspondientes ensayos, así el diseño de la red seria inmediato, los pozos se ordenan de tal forma que sus centros constituyen los lados de un triangulo equilátero y forman una malla con iguales medidas de separación, así entonces el radio de influencia corresponde a la distancia entre un vértice del triangulo equilátero y su centro geométrico, tal como lo muestra la siguiente figura.

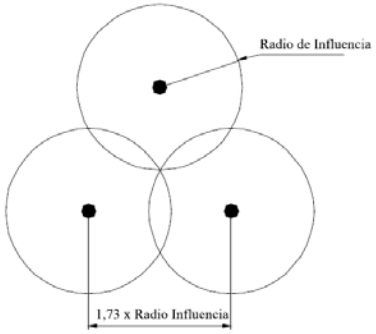

Ilustración 21 Radio de influencia de los pozos de extracción

Aunque como se ha mencionado antes, en los bordes del cilindro escogido como volumen de control no existe la depresión necesaria que produce el arrastre y posterior extracción del biogás, por lo tanto lo más lógico sería pensar en un arrastre que siga una trayectoria cónica, lo que se intenta esquematizar con la siguiente figura.

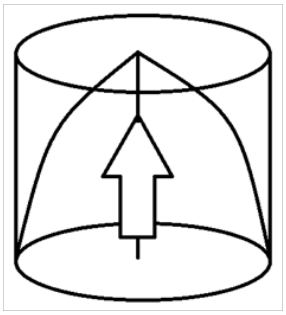

Ilustración 22 Representación de la trayectoria de arrastre del biogás

La influencia que pueda tener un pozo sobre sus vecinos, sigue una tendencia cilíndrica, así entonces para la mejor elección del espaciado entre pozos lo más adecuado es llevar a cabo los ensayo de caudales y medición de concentraciones (también se recomiendan cuando el vertedero no ha sido diseñado para el aprovechamiento energético del biogás), muchos autores reportan valores de espaciado entre 16 y 60 m como regla general (Gendebien *et al.,*1992), sin embargo un radio de influencia de 20 m se considera habitual (Tomasini, 1986; Uriarte *et al.,*1992b; Brown y Maunder, 1994).

La configuración que se recomienda sigue una estructura como la que se muestra en la siguiente figura.

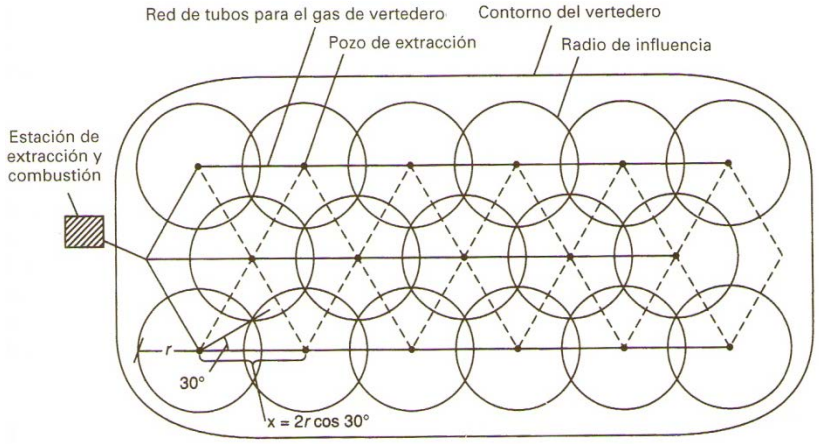

Ilustración 23 Configuración recomendada de los pozos de extracción

A modo de ejemplo se muestra a continuación una chimenea de extracción típica, se especifica que es a modo de ejemplo por que en el escenario hipotético que se ha desarrollado este trabajo no existen dimensiones determinadas (solo se ha comparado la superficie para vertederos de carga similar, con un valor de 30 ha), el cálculo tendría que formar parte de la ingeniería de ejecución de un proyecto de este tipo.

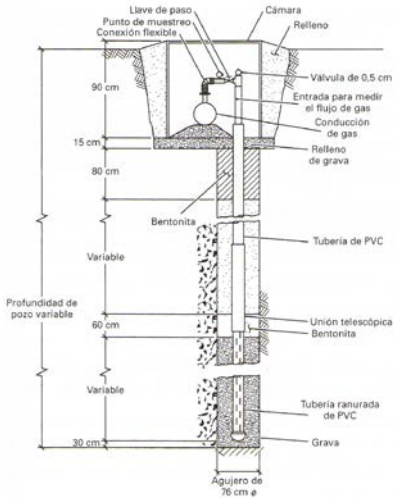

Ilustración 24 Ejemplo de chimenea de extracción típica

Una visión más amplia de cómo se proyecta un vertedero con los correspondientes pozos de captación, redes de transporte y unidades destinadas a la producción de electricidad se podría esquematizar por la siguiente representación.

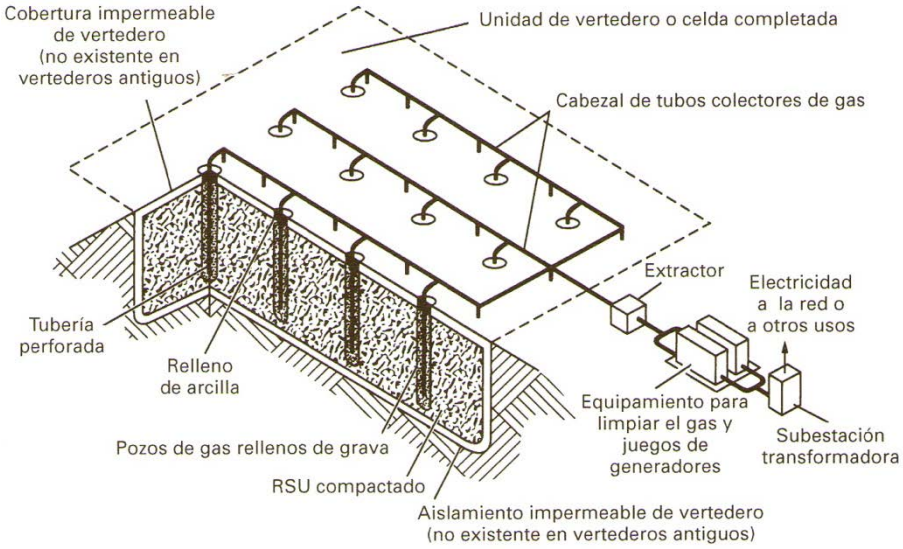

Ilustración 25 Ejemplo de las configuraciones de pozos, redes de captación y distribución de un vertedero hipotético

Lo que se ha mencionado anteriormente acerca de buscar la depresión optima en algunos casos y como el volumen de gas producido disminuye con el tiempo, se traduce en las opciones de algunos diseñadores optando por la variación de la depresión de cada zona de extracción ajustando la válvula ubicada en la cabecera de los tubos colectores, esta variación se puede llevar a cabo por actuadores automatizados.

Además de la configuración con tubos verticales, existe una configuración que posiciona las redes de extracción de forma horizontal, de manera que a medida que se completa el llenado de las distintas secciones y capas, se adicionan o interconectan los tubos colectores hasta los tubos de extracción principales, tal como se muestra en la siguiente figura.

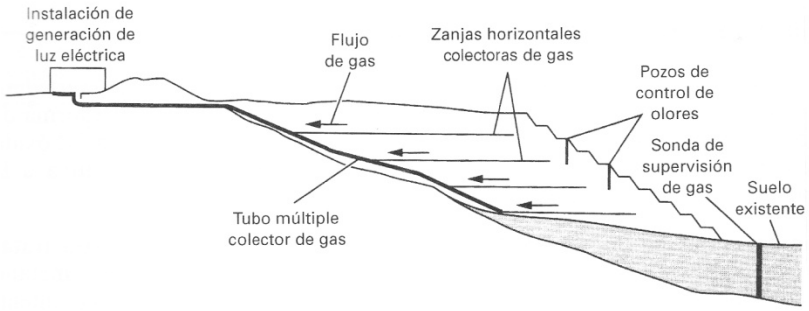

Ilustración 26 Esquema de sistema de extracción de forma horizontal

Para tener una noción de lo que significa mover el volumen de lixiviados, se podría establecer la potencia necesaria del conjunto de bombeo para un desplazamiento hipotético, con una altura

hipotética de 100 mca, por ejemplo, este valor se ha tomado ya que según la bibliografía consultada una capa de relleno podría considerar una altura máxima de elevación de 120 m para el nivel de vertido que se ha supuesto, entonces la expresión que permitiría obtener la potencia de bombeo es:

$$P_B = \frac{\dot{V}_{lix} \cdot (\rho \cdot g \cdot H)}{\eta_B}$$

Ecuación 30 Calculo de la potencia de bombeo de lixiviados

Donde,

$\dot{V}_{lix}$ = Caudal 0,0095 m^3/s (en un año)

ρ = Densidad del agua, 1000 kg/m^3

g = Gravedad, 9,807 m/s^2

H = Altura de cálculo, 100 m

η_B = Rendimiento global típico de bombas, 0,6

Según los valores calculados anteriormente la potencia obtenida es:

$$P_B = 15463{,}05W \approx 15{,}5kW$$

Como la producción de lixiviados se mantiene casi invariable, se podría estimar que para cada periodo de 6 años la potencia requerida seria, aproximadamente

$$15{,}5kW \; x \; 6 \; = 93 \; kW$$

Ya se ha mencionado que no se considera como una opción la recirculación de los lixiviados en el vertedero, por lo que será necesario hacer el cálculo del calor necesario para evaporar la totalidad de los lixiviados generados.

Primero se estimara el caudal de aire necesario para la evaporación, como el producto de la capacidad de evaporación especifica por el caudal de lixiviado a evaporar:

$$\dot{V}_{aire} = C_e \cdot \dot{V}_{lix}$$

Ecuación 31 Calculo del caudal de aire necesario para la evaporación

Donde,

$\dot{V}_{aire}$ = Caudal de aire para la evaporación, kg_{aire}/h

C_e = Capacidad de evaporación especifica, 77 kg_{aire}/kg_{agua}

Entonces,

$$\dot{V}_{aire} \; = 77 \left(\frac{kg_{aire}}{kg_{agua}}\right) \cdot 34227 \; \left(\frac{kg}{h}\right) = 2635482 \left(\frac{kg_{aire}}{h}\right)$$

Por las condiciones del aire (T 55°C y aproximadamente 1 at), el caudal másico podría aproximarse al caudal volumétrico, es decir, 2635479 m^3/h.

Por lo tanto se debe incluir un conjunto de soplado para el proceso de evaporación de lixiviados, cuyos requerimientos son:

$$P_{sopl} = \frac{1}{\eta_{sopl}} \cdot \dot{V}_{aire} \cdot \Delta P = \frac{1}{0{,}6} \cdot \frac{2635479}{3600} \left(\frac{m^3}{s}\right) \cdot 200 \left(\frac{N}{m^2}\right) = 244{,}02\ kW$$

Ecuación 32 Calculo de potencia para el conjunto de soplado para la evaporación de lixiviados

Se asume al igual que para el conjunto soplador de biogás un rendimiento del 60%, además de un diferencial de presión igual a 0,02 bar, es decir 2000 Pa o 2000 J/m^3.

El cálculo de la potencia térmica del intercambiador de calor se podría obtener usando la expresión para un intercambiador de calor a contracorriente, donde el agua caliente del circuito de refrigeración de los motores (interior de los tubos) calienta el aire que circula por la carcasa del intercambiador, según la expresión.

$$\dot{Q}_w = \dot{V}_{aire} \cdot c_{aire} \cdot \Delta T = 2635479 \left(\frac{kg}{h}\right) \cdot 0{,}24 \left(\frac{kcal}{kg\ °C}\right) \cdot (55 - 15) = 25{,}3\ MW$$

Ecuación 33 Calculo de la potencia térmica del intercambiador

Luego para calcular la potencia de bombeo del agua que ingresa al circuito refrigerante es necesario primero conocer la masa de agua que transportara el calor, para ello se supone un ΔT =10°C, entonces el caudal de agua es:

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{Q}_{wa}}{c_w \cdot \Delta T} = \frac{25300\ kW \cdot 860(kcal/kWh)}{1(kcal/kg\ °C) \cdot 10°C} = 2175800 \left(\frac{kg}{h}\right) \approx 2176\ \frac{m^3}{h}$$

Ecuación 34 Calculo de la potencia de bombeo del circuito refrigerante

Para el cálculo de la potencia de la bomba se podría suponer una caída de presión que considere perdidas por rozamiento, piping y levantamiento de columna de agua aproximada de 1 bar, así entonces, la potencia se calcula como:

$$P_w = \frac{1}{\eta_w} \cdot \dot{V}_w \cdot \Delta P = \frac{1}{0{,}6} \cdot \frac{2176}{3600} \left(\frac{m^3}{s}\right) \cdot 100000(Pa) \approx 100\ kW$$

Ecuación 35 Calculo de potencia considerando las perdidas

4.1.8 **Potencias brutas y netas instaladas. Balance energético**

La importancia de hacer un balance energético se basa en la importancia de saber qué cantidad de energía se consume y se produce, lo que permitirá conocer si es posible cumplir las expectativas de producir energía suficiente para los consumos internos (electricidad y calor) del vertedero y además ser un generador de energía y su potencia exportación a la red.

Lo primero será conocer las potencias eléctricas instaladas que se pudieran tener en la instalación y luego contrastar los consumos con la energía que se podría obtener de un sistema de cogeneración.

Anteriormente se han calculado tanto las potencias eléctricas que se podrían obtener del biogás así como los posibles consumos de los procesos fundamentales, en los siguientes párrafos se presentara un resumen de dichas potencias.

Se incluye un concepto denominado como “extras”, será determinado por los requerimientos que se podrían encontrar en las instalaciones que se tengan en el recinto, en la mayoría de vertederos se tiene en consideración la presencia de

- Bodegas
- Laboratorio de análisis
- Estacionamientos e iluminación
- Oficinas de administración y reuniones
- Taller de mantenimiento
- Taller de pruebas de equipos
- Instalaciones sanitarias

En este sentido se ha estimado en 100 kW la potencia instalada que podrá soportar este conjunto de consumos, así entonces un cuadro que resume los cálculos llevados a cabo antes se presenta a continuación.

Procesos	Periodos					
	1 a 6	6 a 12	12 a 18	18 a 24	24 a 30	30 a 36
Soplantes biogás [KW]	116,8	146,5	159,1	167,5	173,2	176,9
Bomba lixiviados [KW]	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0
Soplantes intercambiador [KW]	244,0	244,0	244,0	244,0	244,0	244,0
Bomba cto. Refrigeración [KW]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Consumos extras [KW]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Totales [KW]	700,8	730,5	743,1	751,5	757,2	760,9

Tabla 35 Resumen de consumos propios de la instalación

En este capítulo solo se analizara la factibilidad técnica para conseguir la configuración que permita obtener el calor necesario para llevar a cabo el tratamiento de los lixiviados a la vez que se genera electricidad tanto para cubrir las necesidades de la instalación como para su comercialización, todo mediante un sistema de cogeneración apoyado por calderas auxiliares, en el siguiente capítulo se analizara a modo de ejemplo los ingresos que se podrían percibir por la venta de la electricidad además de mencionar los beneficios que supone el ahorro de combustibles primarios y su eventual reducción de GEI.

Para el caso de los requerimientos de energía térmica, básicamente se debe tener en cuenta el calor requerido en el proceso de evaporación de los lixiviados calculado en el capitulo anterior, es decir, se necesitaría un potencial energético aproximado de 25 MW, y si bien la instalación para depósitos y suministro de agua caliente sanitaria no se había mencionado se podría considerar además de un circuito de calefacción para los meses de invierno, en conjunto se podría estimar un potencial térmico requerido de $\approx$26 MW.

Los requerimientos térmicos se detallan en el siguiente cuadro.

		Evaporación	
Mes	Horas	E [MWh/año]	Q [MWh/año]
Enero	730	178,1	18980,0
Febrero	730	178,1	18980,0
Marzo	730	178,1	18980,0
Abril	730	178,1	18980,0
Mayo	730	178,1	18980,0
Junio	730	178,1	18980,0
Julio	730	178,1	18980,0
Agosto	730	178,1	18980,0
Septiembre	730	178,1	18980,0
Octubre	730	178,1	18980,0
Noviembre	730	178,1	18980,0
Diciembre	730	178,1	18980,0
Total anual	8760	2137,44	227760,0

Tabla 36 Requerimientos térmicos de la instalación

Como se comentaba anteriormente, la búsqueda de la configuración que permita obtener el calor necesario y la energía suficiente para los consumos propios de la explotación así como la posibilidad de venta, se lleva a cabo haciendo una distribución del potencial energético, entre calderas y motores.

En este sentido se han seleccionado 2 calderas de biogás, cada una para proporcionar un máximo de 14 MW, la eficiencia de estos equipos se encuentra en el rango de 92 a 95%, sin embargo para mantener un criterio conservador en los cálculos se utiliza un valor del 90%.

Entre las calderas que podría adecuarse a los requerimientos de la explotación existe un amplio abanico de fabricadores, sin embargo en este trabajo la escogida corresponde a la gama de gas capaz de cubrir potencias hasta 19,5 MW.

Tamaño de la caldera		**7**	**8**	**9**	**A**	**B**	**C**	**D**
Potencia térmica nominal	**MW**	**7,8**	**9,3**	**11,2*1**	**13,8*1**	**15,0*1**	**16,5*1**	**19,5*1**
Carga térmica nominal	MW	8,48	10,11	12,17	14,99	16,30	17,93	21,20
Homologación CE		véase página 10						
Temperatura de impulsión admisible*2	°C	véase página 10						
Presión adm. de servicio	bar	6 o 10	6 o 10	6 o 10	6 o 10	6 o 10	6 o 10	6 o 10
Pérdida de carga en pasos de humos (sobrepresión)	Pa mbar	1750 17,5	1950 19,5	1500 15,0	1550 15,5	1600 16,0	1500 15,0	1750 17,5
Dimensiones de transporte								
Longitud total	m	6,7	6,8	7,1	8,2	8,5	8,9	9,6
Anchura total	m	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,4	3,5
Altura total	m	3,3	3,4	3,5	3,7	3,8	3,8	4,0
Bancada								
Longitud	m	6,1	6,2	6,3	7,6	8,0	5,0	5,4
Anchura	m	2,1	2,1	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0
Peso total*3								
Caldera con aislamiento térmico para una presión de servicio adm. de:								
– 6 bar	t	16,2	17,9	20,5	28,9	32,5	35,0	39,5
– 10 bar	t	18,7	19,5	22,3	33,3	37,4	38,5	46,5
Capacidad de agua de la caldera	m^3	14,2	19,5	21,0	25,4	28,5	28,5	33,5
Conexiones								
Impulsión y retorno de caldera	PN 16 DN	250	300	300	400	400	400	400
Toma de seguridad (válvula de seguridad) para una presión de servicio admisible de:								
– 6 bar	PN 16 DN	100	125	150	150	2 x 100	2 x 100	2 x 100
– 10 bar	PN 16 DN	80	100	100	125	125	125	125
Conexión de vaciado	PN 16 DN	50	50	50	50	50	50	50
Índices de humos*4								
Temperatura (con una temperatura de caldera de 80/60 °C)								
– Con potencia térmica nominal	°C	185	185	185	185	185	185	185
– Con carga parcial	°C	130	130	130	130	130	130	130
Caudal másico								
– con gas natural	kg/h	1,50 x carga térmica nominal en kW						
– Con gasóleo C	kg/h	1,52 x carga térmica nominal en kW						
Tiro necesario	Pa/mbar	0	0	0	0	0	0	0
Conexión de humos (interior)	∅mm	900	900	1000	1100	1200	1000	1100
Volumen de gas	m^3	13,18	14,84	17,63	22,04	26,36	27,90	34,60
Cámara de combustión y pasos de humos								

Tabla 37 Hoja de datos técnicos de las calderas seleccionadas

En el caso de los motores, a continuación se detalla la hoja técnica de los que se han escogido.

datos técnicos

Configuración	V 60°
Taladro (mm)	190
Carrera (mm)	220
Cilindrada/cilindro (lit)	6,24
Velocidad nominal (rpm)	1.500 (50 Hz) 1.500 con caja de cambio (60 Hz)
Velocidad media del pistón (m/s)	11 (1.500 rpm)
Alcance de suministro	Gen-Set, módulo de cogeneración
Tipos de gases utilizables	Gas natural, flare-gas, biogás, gas de vertedero, gas de depuradora. Gases especiales (p. ej., grisú, gas de coque, gas de madera, gas de pirolisis)

Tipo de motor	J612 GS	J616 GS	J620 GS	J624 GS
N° de cilindros	12	16	20	24
Cilindrada total (lit)	74,9	99,8	124,8	149,7

Dimensiones l x an x al (mm)[1]

Soluciones en contenedor	J612 - J620	15.000 x 6.000 x 7.300
Gen-Set	J612 GS	7.600 x 2.200 x 2.800
	J616 GS	8.300 x 2.200 x 2.800
	J620 GS	8.900 x 2.200 x 2.800
	J624 GS	12.100 x 2.200 x 2.900
Módulo de cogeneración	J612 GS	7.600 x 2.200 x 2.800
	J616 GS	8.300 x 2.200 x 2.800
	J620 GS	8.900 x 2.100 x 2.800
	J624 GS	12.100 x 2.200 x 2.900

Peso seco (kg)[1]

	J612 GS	J616 GS	J620 GS	J624 GS
Gen-Set	20.600	26.000	30.700	41.400
Módulo de cogeneración	21.100	26.500	31.300	42.000

1) Dimensiones y pesos válidos para aplicaciones de 50 Hz.

potencias y rendimientos

Gas natural — 1.500 rpm | 50 Hz — 1.500 rpm | 60 Hz

NOx <	Tipo	Pel (kW)[2]	ηel (%)	Pter (kW)	ηter (%)	ηtot (%)	Pel (kW)[2]	ηel (%)	Pter (kW)[2]	ηter (%)	ηtot (%)
500 mg/m³ₙ	612	2.002	45,1	1.850	41,6	86,7	1.990	44,8	1.861	41,9	86,6
	616	2.679	45,5	2.439	41,4	87,0	2.664	45,3	2.453	41,7	87,0
	620	3.352	45,6	3.048	41,4	87,0	3.344	45,4	3.048	41,4	86,9
	624	4.029	45,6	3.635	41,2	86,8	4.008	45,4	3.652	41,4	86,8
250 mg/m³ₙ	612	2.002	43,5	1.932	42,0	85,5	1.990	43,2	1.943	42,2	85,4
	616	2.679	43,6	2.575	41,9	85,6	2.664	43,4	2.589	42,2	85,6
	620	3.352	43,7	3.219	42,0	85,6	3.332	43,4	3.233	42,1	85,5
	624	4.029	44,0	3.853	42,1	86,1	4.008	43,8	3.870	42,3	86,0

Tabla 38 Hoja de datos técnicos del motor seleccionado

Ya se han detallado las potencias instaladas fundamentales, por lo que el cálculo de los consumos eléctricos se llevara a cabo a continuación.

En el caso del bombeo de los lixiviados, tal como se hizo para el cálculo de los requerimientos térmicos, es decir para el tratamiento total, se proyecta el funcionamiento continuo del sistema de bombeo desde las lagunas de recogida hasta la unidad de evaporación, a continuación se presentan los resultados.

Bombeo lixiviados		
Mes	Horas	E [MWh/año]
Enero	730	67,89
Febrero	730	67,89
Marzo	730	67,89
Abril	730	67,89
Mayo	730	67,89
Junio	730	67,89
Julio	730	67,89
Agosto	730	67,89
Septiembre	730	67,89
Octubre	730	67,89
Noviembre	730	67,89
Diciembre	730	67,89
Total anual	8760	814,68

Tabla 39 Consumo eléctrico asociado al bombeo de lixiviados

Siguiendo con el cálculo de los consumos internos, a continuación se obtienen los consumos eléctricos por concepto de refrigeración, referidos específicamente para el bombeo de agua.

	Potencia	Horas anuales	E [MWh/año]
Bombas	100000	8000	800
Soplantes	244000	8000	1952
Total anual			2752

Tabla 40 Consumos eléctricos por concepto de refrigeración

La extracción y transporte del biogás generado se produce a través de los equipos soplantes, el resumen por periodos se presenta a continuación.

Periodos de 6 años	Consumo eléctrico [MWh/año]
1 a 6	934,2
6 a 12	1171,8
12 a 18	1272,6
18 a 24	1340,1
24 a 30	1385,4
30 a 36	1415,1

Tabla 41 Consumos eléctricos por concepto de extracción y transporte del biogás

Para el caso de los consumos "extras" se considera como se ha mencionado, una potencia instalada de 100 kW, con un consumo a plena carga por un periodo de 10 horas diarias considerando el día y la noche, por lo tanto se estima para un total de 3650 horas, lo que genera un consumo anual de 365 MWh.

El conjunto de consumos asociados a todas las variables descritas antes, se muestra como un conjunto en la siguiente tabla.

Periodos de 6 años	Consumo eléctrico **soplantes biogas** [MWh/año]	Consumo eléctrico **bombeo y soplantes refrigeración** [MWh/año]	Consumo eléctrico **bombeo lixiviados** [MWh/año]	Consumo eléctrico **extras** [MWh/año]	Consumo eléctrico **totales anuales** [MWh/año]
1 a 6	934,2	2752	814,7	365	4865,8
6 a 12	1171,8	2752	814,7	365	5103,4
12 a 18	1272,6	2752	814,7	365	5204,3
18 a 24	1340,1	2752	814,7	365	5271,8
24 a 30	1385,4	2752	814,7	365	5317,0
30 a 36	1415,1	2752	814,7	365	5346,8

Tabla 42 Conjunto de consumos asociados a todas las variables

La representación grafica de la tabla anterior se puede observar a continuación

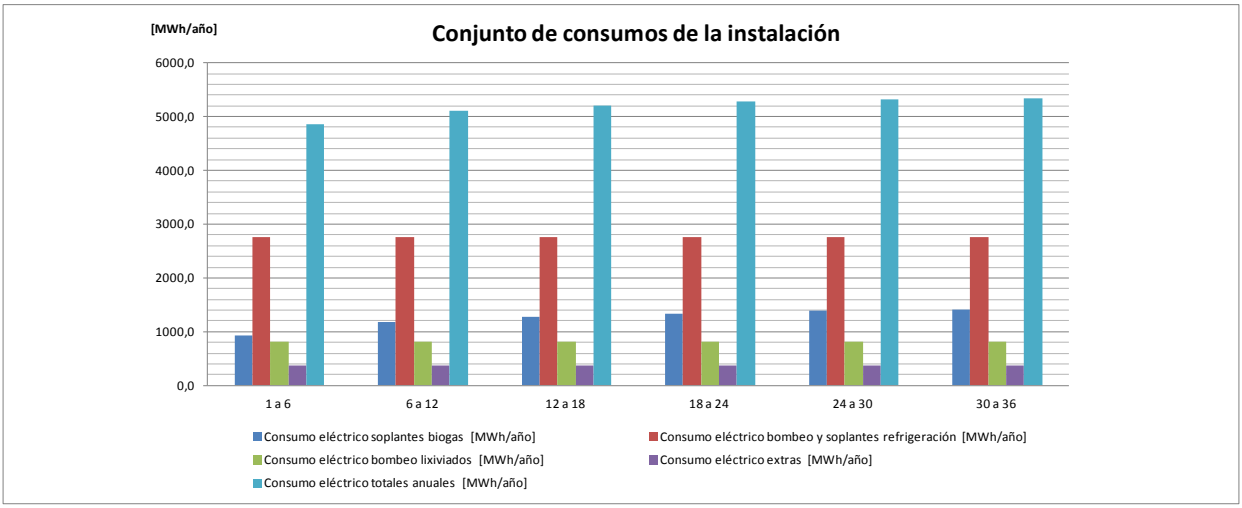

Ilustración 27 Representación grafica del conjunto de consumos

Como se ha mostrado antes el potencial energético del biogás que se pueda extraer y transformar en energía eléctrica y térmica, depende principalmente de la eficiencia de conversión y de las horas de explotación, además claro, de que los modelos de generación utilizados así como las eficiencias de capturas y fugas se encuentren en el rango de los valores reales.

Se muestra a continuación un balance general de la generación y consumos para los distintos periodos, considerando que una parte del potencial energético se destina a la producción de calor mediante las calderas auxiliares.

Periodos de 6 años	Energia eléctrica bruta [MWh/años]	Consumo eléctrico totales anuales [MWh/año]	Diferencia [MWh/año]	Posible exportación por interconexión (10% perdidas) [MWh/año]
1 a 6	72000	4865,8	67134,2	60420,7
6 a 12	128000	5103,4	122896,6	110606,9
12 a 18	144000	5204,3	138795,7	124916,1
18 a 24	164000	5271,8	158728,2	142855,4
24 a 30	168000	5317,0	162683,0	146414,7
30 a 36	168000	5346,8	162653,2	146387,9

Tabla 43 Balance general de generación y consumos de la instalación por periodos

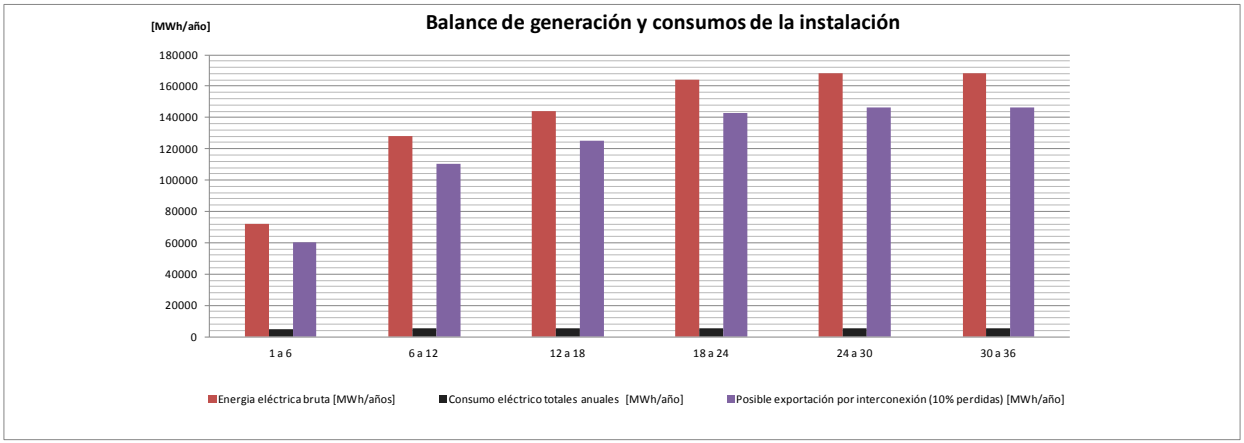

Ilustración 28 Grafica del balance general de generación y consumos de la instalación por periodos

Se han especificado las características de consumos y generación de electricidad, respecto a la obtención del calor aportado por las calderas y relativo al sistema de cogeneración a continuación se muestra gráficamente como se complementan ambos sistemas para satisfacer la demanda del tratamiento de lixiviados.

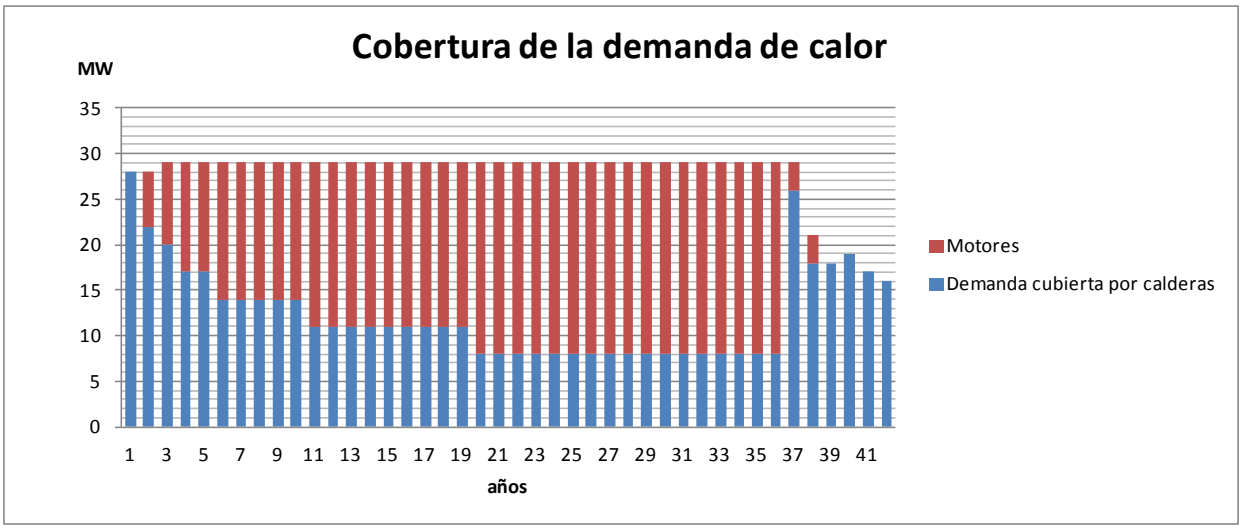

Ilustración 29 Balance y cobertura de la demanda de calor combinando calderas y cogeneración.

Como se ha mencionado antes, en este caso los datos referentes a la generación de calor a partir de luso de calderas auxiliares y al calor proveniente del sistema de cogeneración se presentan aproximadamente hasta el año 42, se puede apreciar que la demanda se cumple a cabalidad, e incluso existe un excedente que se plantea como una alternativa utilizable en las tareas de cierre del vertedero.

La configuración de la instalación posee un carácter modular, tanto para las calderas como para los motores, la distribución e incorporación a lo largo del periodo de explotación se detalla en la siguiente tabla.

años	Configuración de motores												
1													
2	1	2											
3	1	2	3										
4	1	2	3	4									
5	1	2	3	4									
6	1	2	3	4	5								
7	1	2	3	4	5								
8	1	2	3	4	5								
9	1	2	3	4	5								
10	1	2	3	4	5								
11	1	2	3	4	5	6							
12	1	2	3	4	5	6							
13	1	2	3	4	5	6							
14	1	2	3	4	5	6							
15	1	2	3	4	5	6							
16	1	2	3	4	5	6							
17	1	2	3	4	5	6							
18	1	2	3	4	5	6							
19	1	2	3	4	5	6							
20			3	4	5	6	7	8	9				
21				4	5	6	7	8	9	10			
22					5	6	7	8	9	10	11		
23					5	6	7	8	9	10	11		
24						6	7	8	9	10	11	12	
25						6	7	8	9	10	11	12	
26						6	7	8	9	10	11	12	
27						6	7	8	9	10	11	12	
28						6	7	8	9	10	11	12	
29							7	8	9	10	11	12	13
30							7	8	9	10	11	12	13
31							7	8	9	10	11	12	13
32							7	8	9	10	11	12	13
33							7	8	9	10	11	12	13
34							7	8	9	10	11	12	13
35							7	8	9	10	11	12	13

Tabla 44 Configuración de los motores de combustión

Se puede observar que gracias a la configuración planteada, combinando calderas y motores es posible satisfacer la demanda de calor para el proceso de evaporación de los lixiviados, en este ejercicio supuesto y al contrario que muchos de los diseños consultados, no se realiza la recirculación de los lixiviados.

Ya que como objetivo principal se planteo el aprovechamiento energético y valorización del biogás que se podría captar del vertedero hipotético, a continuación se comentaran los aspectos técnicos, económicos y legales de la posible venta de energía.

Se mencionaran algunos aspectos referentes a la estación elevadora, sistema e interconexión y por último al ahorro en emisiones que podría significar una instalación como la que se ha planteado en este trabajo.

En los cálculos anteriores ya se ha mencionado el hecho de considerar una pérdida del 10% de la energía eléctrica por concepto de transformación y transporte hasta el punto de interconexión, aunque es un supuesto y depende de que tan lejos se encuentre el punto de conexión, un 10% podría considerarse apropiado.

Se debe mencionar que para el manejo y transporte de la electricidad sería necesario elevar la tensión desde 3,6 kV hasta los 36 kV, así será posible conectar con la red de alta tensión. Se debe tener en cuenta además que los motores alternativos generaran la energía eléctrica que la instalación pudiera requerir. El tipo de motor alternativo escogido es capaz de generar 6,3 kV y a 50 Hz, tal como se observa en los resultados de generación y consumo de electricidad, en el primer año no se genera energía, por lo tanto la planta debe ser capaz de importar energía en su fase inicial y luego exportar los excedentes.

Para efectos legales, la interconexión debe ceñirse a los estándares que dicta el reglamento eléctrico, asegurando el control, seguridad y correcta sincronización de las señales.

El numero de transformadores al igual que los motores se piensa como unidades modulares, por lo que de acuerdo a las potencias que se obtengan luego de verificar la dinámica de explotación mediante los ensayos de campo correspondientes se podrán conectar en paralelo, no se deberían tener problemas para hacer la conexión de las unidades que se vayan sumando, tampoco de la reducción del rendimiento.

De acuerdo a los cálculos de generación y consumo, se puede comentar que de ajustarse correctamente los mecanismos de predicción de la generación del biogás, la producción de energía eléctrica significaría un ahorro considerable de energía primaria, en este sentido para hacer una comparativa se lleva a cabo el cálculo de las tep (Toneladas Equivalentes de Petróleo -unidad de medida internacional que permite realizar una equivalencia entre fuentes energéticas-).

Se han considerado distintos rendimientos de generación de instalaciones térmicas, desde la convencional de carbón con un rendimiento del 30%, así como una instalación de ciclo combinado simple de un 40% y una de ciclo combinado de última era con un rendimiento del 55%, el resumen de los ahorros se muestra a continuación.

	Ahorro [tep/años]
Convencionales η=0,30	40324
Ciclo combinado $_1$ η=0,40	30243
Ciclo combinado $_2$ η=0,55	24195

Tabla 45 Datos comparativos y equivalencias de los principales sistemas de generación

En general si se considera el mejor de los casos, es decir, el menor valor de tep's para la misma producción eléctrica, el ahorro alcanza el rango de las 24.000 tep/año.

En el caso de la producción de calor para el proceso de evaporación de los lixiviados además del calor que se ha proyectado para los consumos propios de la instalación, tal y como se muestra en la grafica

de la cobertura de la demanda, se puede apreciar que parte importante del calor se obtiene del proceso de generación eléctrica.

4.1.9 Equivalencias energéticas, aspectos normativos medioambientales y económicos

Cuando se ha considerado que podrían existir excedentes de energía eléctrica y la posibilidad de exportarla a la red, se deben tener en cuenta aspectos legales que determinan la evolución de la producción y la interconexión.

Así también para dar un marco de referencia que permita visualizar las dimensiones del potencial energético producido se presentan algunas equivalencias, que más adelante se utilizaran también para llevar a cabo las comparaciones y cuantificación de las emisiones evitadas, principalmente de los GEI (CO_2 y CH_4).

4.1.9.1 Equivalencias energéticas

Para otorgar una referencia de dimensiones, a continuación se mencionaran algunas equivalencias que podrían variar según la fuente, pero que en órdenes de magnitud son equiparables.

Por ejemplo

Mientras que 1 Nm^3 de biogás (50% CH_4) según los cálculos podría generar de 5 a 6 kWh, la equivalencia en otro tipo de combustibles, se aproxima a:

- 0,5 m^3 de Gas Natural
- 1,1 kg de Madera
- 0,5 l de Fuel-oil
- 0,2 kg de Carbón
- 0,9 l de Alcohol combustible
- 0,6 l de Gasolina

4.1.9.2 Marco legal de los aspectos medioambientales

Según el alcance de la normativa legal, recomendaciones y acuerdos, se debe tener en cuenta que existen clasificaciones a nivel europeo, estatal y autonómico, por lo que a continuación se reportaran las que influirían en un tipo de proyecto como el tratado en este trabajo.

Para tener en consideración el cumplimiento legal de la actividad relativa a la explotación y valorización del biogás de vertedero, es necesario tener en cuenta primero la regulación de los vertidos, en este caso especifico, entre los principales instrumentos legales se consideran:

a) **Directiva 2008/1/CE**, que somete a autorización la gestión de residuos como una medida de protección al medio ambiente, debiendo obtenerse una Autorización Ambiental Integrada (AAI) por concepto de Mejores Técnicas Disponibles (MTD), toda planta con una capacidad superior a 50 t/d requiere autorización.

b) **Directiva de Vertederos 99/31/CE**, incentivando el desvío de residuos biodegradables de los vertederos hacia los centros de valorización.

c) La **Ley 10/1998 de Residuos**, aunque tiene por objetivo prevenir la producción de residuos también se incluye establecer el régimen que permitiría su valorización con el objetivo de proteger la salud de las personas y el medioambiente. Corresponde a las comunidades autónomas la elaboración de los planes autonómicos de residuos y la autorización, vigilancia, inspección y sanción de las actividades de producción y gestión de residuos.

d) **Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR)** para el periodo de 2008 a 2015, este plan incluye los residuos domésticos y similares. Este Plan incluye además, la Estrategia de Reducción de Vertido de Residuos Biodegradables, que cumpliendo con una obligación legal, contribuye a alargar la vida de los vertederos, a disminuir su impacto sobre el entorno y de forma especial a la reducción de GEI.

e) **Real Decreto 1481/2001 de Vertederos,** se regula la eliminación de residuos en vertederos. Se limita el porcentaje máximo de Residuos Urbanos Biodegradables que se podrán depositar en un vertederos en el periodo 2006 – 2016, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos biodegradables destinados a vertedero no superará el 35 % de la cantidad total de residuos urbanos biodegradables generados en 1995, se indican en la siguiente tabla.

En el caso de las fracciones que no son materia orgánica y de las cuales es necesario llevar a cabo procesos de separación la legislación vigente considera la **Ley 10 /1998** (Residuos) antes citada y la **Ley 11/1997** (Envases y Residuos de Envases) como un complemento al RD.

Año	Porcentaje (%)	Cantidad (t)
2006	75	8.724.750
2009	50	5.816.500
2016	35	4.071.550

Tabla 46 Plan de reducciones según Normativa

Respecto a los lixiviados que se podrían generar y su tratamiento, cabe mencionar que como marco normativo se considera el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales 2001-2006.

En un contexto de protección al medioambiente, se deberá tener en consideración el cambio climático y la reducción de GEI, donde el principal documento con un alcance global es el Protocolo de Kioto, obligaciones para las naciones de la Unión Europea, 1997. Donde,

Se estableció un compromiso para ejecutar un conjunto de medidas para reducir los GEI, concretamente dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

Los gobiernos signatarios de dichos países pactaron reducir en al menos un 5% en promedio las emisiones contaminantes entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990. La Unión Europea, como agente especialmente activo en la concreción del Protocolo, se comprometió a reducir sus emisiones totales medias durante el periodo 2008-2012 en un 8% respecto de las de 1990.

En función de las distintas variables económicas de los países de la Unión Europea se otorgaron márgenes distintos de cumplimiento, lo que para España fue fijado en un +15% para países como Alemania o Luxemburgo se fijo un valor de -21% y -28% respectivamente, y para Portugal y Grecia se fijo un +27% y 25% respectivamente.

Otros instrumentos como el Dictamen del Comité Económico y Social Europeo. "El Cambio climático y la Agricultura en Europa", pretende incentivar empleos que luchen contra el cambio climático, donde la producción de bioenergía, específicamente el biogás de residuos, forma parte.

En España, el año 2005 las emisiones totales de GEI alcanzaron las 440,6 Mt de CO_2-equivalente. Esta cifra supone un 52,2% de aumento respecto a las emisiones del año base, o lo que es lo mismo, casi 37,2 puntos porcentuales de exceso sobre el compromiso adquirido en el Protocolo de Kioto, de 1997.

En relación a los derechos de emisión, el Plan Nacional de Asignación (PNA) se fija como objetivo que las emisiones globales en España no superen en más de un 37% las del año base en promedio anual en el periodo 2008 – 2012, como la suma del objetivo Kioto (15%), sumideros (2%) y la adquisición de créditos de bonos de carbono (20%). Con esto, el marco de actuación del gobierno Español se define para las Administraciones Publicas a través del documento **"Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia (Horizonte 2007-2012-2020)"** además se incluye un plan de emergencia que contiene la mayor parte de las medidas contenidas en la estrategia.

En el caso de no valorizar el biogás, la presencia del CO_2 generaría costos adicionales por concepto de eliminación, a continuación se mencionan los principales procesos ordenados en cuanto a coste y eficiencia.

- Lavado con agua del CO_2
- Lavado con disolventes orgánicos
- Filtración en carbón activo (el gas circula por el carbón activo, donde se retiene el CO_2)
- Separación por membranas (proceso de alta efectividad)
- Separación criogénica de las materias según el punto de ebullición (proceso que en la actualidad se encuentra en desarrollo).

En el desarrollo de la cogeneración la **Directiva 2004/8/CE** del Parlamento Europeo y en el Concejo, de febrero de 2004, estipulan que se podría evitar la emisión de 258 millones de toneladas de CO_2, por ello el fomento de este tipo de proceso.

4.1.9.3 Marco legal de los aspectos económicos

De acuerdo al tipo de aprovechamiento que se hace del biogás obtenido, se debe tener en cuenta el marco legal y los instrumentos legales que determinan su uso y explotación.

Existen políticas europeas que fijan objetivos para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, lo que ha dado lugar a los distintos incentivos económicos para llevar a cabo este tipo de proyectos, la generación eléctrica a partir de biogás se incluye en un mecanismo que se basa en el sistema de cuotas vía certificados verdes y en los sistemas de precios mínimos.

Los mecanismos verdes, obtienen de la generación a partir de fuentes renovables dos clasificaciones, por una parte la energía eléctrica generada y por otra su "calidad verde", esta calidad es certificada por las autoridades públicas, ambos "productos" pueden ser comercializados por separado. Al productor de electricidad a partir de fuentes renovables se le compensa por su más alto coste de producción vía certificado verde. El sistema de promoción de las renovables vía cuota es en esencia el precio del certificado, el cual se destina al productor de energía a partir de fuentes renovables y se añade al precio que obtiene en el mercado eléctrico.

El segundo mecanismo garantiza, durante un período de tiempo determinado, una tarifa fija por energía eléctrica procedente de fuentes renovables e introducida en la red, obliga además a las empresas y a los operadores de la red eléctrica a comprar la electricidad procedente de fuentes renovables. En algunos países como Alemania y España, existe además una retribución complementaria a esta tarifa fija (por ejemplo, en Alemania existe el bono tecnológico por uso del calor, o en España, una mayor prima por venta de la energía eléctrica cuando en la cogeneración se aprovecha el calor).

Los diferentes factores que se tienen en cuenta para la prima son:

- El nivel de tensión de entrega de la energía a la red
- La contribución a la mejora del medio ambiente
- La eficiencia energética
- El ahorro de energía primaria
- Los costes de inversión

Los países que utilizan los certificados verdes son:

- Bélgica
- Reino unido
- Italia (además de la tarifa fija)
- Polonia
- Rumania
- Suecia

Los países que aplican la tarifa fija/prima son:

- Austria
- Chipre

- Republica Checa
- Estonia
- Dinamarca
- Francia
- Alemania
- Grecia
- Hungría
- Irlanda
- Lituania
- Luxemburgo
- Países Bajos
- Portugal
- Eslovaquia
- Eslovenia
- España
- Letonia
- Bulgaria

En materia de acceso a redes y funcionamiento de las mismas, así como la facilidad de la conexión a red eléctrica y la inyección en redes de gas natural, se cuenta con la **Directiva 2009/28/CE**, que otorgaría facilidades para la modificación de infraestructura existente de redes de gas.

4.1.9.4 Venta de energía y marco legal

Como parte del objetivo principal de este trabajo considera la exportación de la energía eléctrica excedente, en los siguientes párrafos se estructura el marco legal que orientara hacia la mejor alternativa de comercialización de la energía, todo esto guiado por los objetivos del **Plan de Energías Renovables en España (2005-2010)**, que tenía la meta de llegar como mínimo al 12% de cobertura de la demanda energética primaria con energías renovables.

Así entonces, como principal herramienta a consultar se tiene el RD 661/2007, por el cual se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, que incluye además una retribución especial por venta de la electricidad cuando el calor se vende en España, pero sólo para el caso de la cogeneración (CHP, alta eficiencia).

En el citado RD 661/2007 se incluyen las características de clasificación para las denominadas en el Régimen Especial de producción, en el caso de una potencia instalada menor a 50 MW y también tendrá la consideración de producción en régimen especial la producción de energía eléctrica desde instalaciones de tratamiento y reducción de los residuos de los sectores agrícola, ganadero y de servicios, con una potencia instalada igual 0 inferior a 25 Mw cuando supongan un alto rendimiento energético.

Según el ámbito de aplicación el RD661/2007 clasifica en distintas categorías, grupos y subgrupos a las instalaciones que se acogen al régimen especial, en función de las energías primarias utilizadas, de las tecnologías de producción empleadas y de los rendimientos energéticos obtenidos, para el caso de este trabajo se mencionara la categoría, grupo y subgrupo que corresponde además de las tarifas que el mismo instrumento legal regula y estipula.

(Según la última actualización, publicada el 28/01/2012 y en vigor a partir del mismo día).

Categoría a): Productores que utilicen la cogeneración u otras formas de producción de electricidad a partir de energías residuales.

Tienen la consideración de productores cogeneradores aquellas personas físicas o jurídicas que desarrollen las actividades destinadas a la generación de energía térmica útil y energía eléctrica y/o mecánica mediante cogeneración, tanto para su propio uso como para la venta total o parcial de las mismas. Entendiéndose como energía eléctrica la producción en barras de central o generación neta, de acuerdo con los artículos 16.7 y 30.2 de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre.

Se entiende por energía térmica útil la producida en un proceso de cogeneración para satisfacer, sin superarla, una demanda económicamente justificable de calor y/o refrigeración y, por tanto, que sería satisfecha en condiciones de mercado mediante otros procesos, de no recurrirse a la cogeneración.

Esta categoría a) se clasifica a su vez en dos grupos, donde el grupo seleccionado es:

Grupo a.1. Instalaciones que incluyan una central de cogeneración siempre que supongan un alto rendimiento energético y satisfagan los requisitos que se determinan en el anexo I.

Dicho grupo se divide en cuatro subgrupos, donde el subgrupo que corresponde es:

Subgrupo a.1.3. Cogeneraciones que utilicen como combustible principal biomasa y/o biogás, en los términos que figuran en el anexo II, y siempre que ésta suponga al menos el 90 por ciento de la energía primaria utilizada, medida por el poder calorífico inferior.

La alternativa a las clasificaciones que se han mencionado seria:

(Según la última actualización, publicada el 28/01/2012 y en vigor a partir del mismo día).

Cambiando de categoría también se podría considerar un caso

Categoría b): Instalaciones que utilicen como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa, o cualquier tipo de biocarburante, siempre y cuando su titular no realice actividades de producción en el régimen ordinario.

Grupo b.7. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de estiércoles, biocombustibles o biogás procedente de la digestión anaerobia de residuos agrícolas y ganaderos, de residuos biodegradables de instalaciones industriales o de lodos de depuración de aguas residuales, así como el recuperado en los vertederos controlados, en los términos que figuran en el anexo II.

Subgrupo b.7.1. Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás de vertederos.

Cambiando de categoría también se podría considerar un caso

Categoría c): instalaciones que utilicen como energía primaria residuos con valorización energética no contemplados en la categoría

Grupo c.1. Centrales que utilicen como combustible principal residuos sólidos urbanos.

Para una mejor compresión de lo que se ha mencionado, se ha diseñado un esquema con las 3 posibilidades, más adelante se mencionaran los conceptos económicos de cada opción.

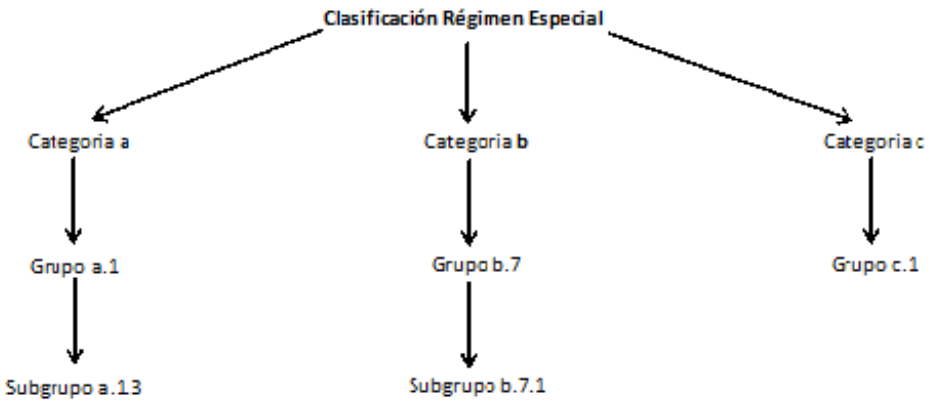

Ilustración 30 Esquema de categorías del sistema tarifario

4.1.9.5 Sistema tarifario

El conjunto de variables que determinara la incidencia económica que significa la producción de energía eléctrica y su exportación a la red, mediante un sistema de tarifa regulada se menciona a continuación.

Lo llamados mecanismos de retribución de electricidad producida en régimen especial, ya sea para vender total o parcialmente la energía eléctrica, otorgan la posibilidad de elegir que opción de venta se prefiere, esto es:

a) Ceder la electricidad al sistema a través de la red de transporte o distribución, percibiendo por ella una tarifa regulada, única para todos los períodos de programación, expresada en céntimos de euro por kilovatio-hora.

b) Vender la electricidad en el mercado de producción de energía eléctrica. En este caso, el precio de venta de la electricidad será el precio que resulte en el mercado organizado o el precio libremente negociado por el titular o el representante de la instalación, complementado, en su caso, por una prima en céntimos de euro por kilovatio-hora.

Los titulares de instalaciones a los que resulte de aplicación este real decreto podrán elegir, por períodos no inferiores a un año, la opción de venta de su energía que más les convenga, lo que comunicarán a la empresa distribuidora y a la Comisión Nacional de Energía, con una antelación mínima de un mes, referido a la fecha del cambio de opción. Dicha fecha será el primer día del primer mes en que el cambio de opción vaya a ser efectivo y deberá quedar referida explícitamente en la comunicación.

Ya se han mencionado las categorías, grupos y subgrupos a los que un proyecto como el que se trata en este trabajo podría acogerse.

Otro concepto a tener en cuenta se refiere a la discriminación horaria en el caso de ceder la energía eléctrica al sistema a través de la red de transporte y distribución, y según la opción de categoría se puede acoger:

a) Para las instalaciones de la categoría a):

Punta	Valle
Periodos tarifarios 1 a 5	Periodo tarifario 6.

Tabla 47 Opción tarifaria de la categoría A

b) Para las instalaciones de los grupos b.4, b.5, b.6, b.7 y b.8:

Invierno		Verano	
Punta	Valle	Punta	Valle
11-21 h	21-24 h y 0-11 h	12-22h	22-24 h y 0-12 h

Tabla 48 Opción tarifaria de las categorías b4, b5, b6, b7 y b8

Siendo cambios de horario de invierno a verano o viceversa coincidentes con la fecha de cambio oficial de hora.

La tarifa regulada a percibir en este caso, se calculará como el producto de la tarifa que le corresponda por su grupo, subgrupo, antigüedad y rango de potencia, multiplicada, para el periodo punta, por 1,37 para las instalaciones de la categoría a) o 1,0462 para las de los grupos b.4, b.5, b.6, b.7 y b.8, y para el periodo valle, por 0,64 para las instalaciones de la categoría a) o 0,9670 para las de los grupos b.4, b.5, b.6, b.7 y b.8.

En el caso de optar por la opción que involucra una prima, es decir, una cantidad adicional al precio que resulte en el mercado organizado o el precio libremente negociado por el titular o el representante de la instalación. Se deberán tener en cuenta algunos aspectos como:

- Para ciertos tipos de instalaciones pertenecientes a la categoría b), se establece una prima variable, en función del precio del mercado de referencia.

Se establece una prima de referencia y unos límites superior e inferior para la suma del precio del mercado de referencia y la prima de referencia. Para el caso de venta de energía a través del sistema de ofertas gestionado por el operador de mercado, así como para los contratos de adquisición entre los titulares de las instalaciones y los comercializadores cuya energía es vendida en el sistema de ofertas, el precio del mercado de referencia será el precio horario del mercado diario. Para el resto de posibilidades contempladas en la opción b) del artículo 24.1, el precio del mercado de referencia será el precio que resulte de acuerdo a la aplicación del sistema de subastas regulado en la Orden ITC/400/2007, de 26 de febrero, por la que se regulan los contratos bilaterales que firmen las empresas distribuidoras para el suministro a tarifa en el territorio peninsular.

i. Para valores del precio del mercado de referencia más la prima de referencia comprendidos entre el límite superior e inferior establecidos para un determinado grupo y subgrupo, el valor a percibir será la prima de referencia para ese grupo o subgrupo, en esa hora.
ii. Para valores del precio del mercado de referencia más la prima de referencia inferior o igual al límite inferior, el valor de la prima a percibir será la diferencia entre el límite inferior y el precio horario del mercado diario en esa hora.
iii. Para valores del precio del mercado de referencia comprendidos entre el límite superior menos la prima de referencia y el límite superior, el valor de la prima a percibir será la diferencia entre el límite superior y el precio del mercado de referencia en esa hora.
iv. Para valores del precio del mercado de referencia superiores o iguales al límite superior, el valor de la prima a percibir será cero en esa hora.

Existe también un factor que se denomina como un complemento por eficiencia, a tener en cuenta si la planta de cogeneración se encuentra en el rango de potencias de 50 a 100 MW, se tendrá en cuenta el rendimiento eléctrico equivalente mínimo exigido así como el acreditado por la instalación y el coste de la materia prima calculado de acuerdo a una formulación que se especifica en el artículo 8 de la Orden ITC/1660/2009.

Existe también, independiente de la opción de venta escogida, un complemento o penalización, según corresponda, por energía reactiva por el mantenimiento de unos determinados valores de factor de potencia. Este complemento se fija como un porcentaje del valor de 8,2954 c€/kWh, en función del factor de potencia con el que se entregue la energía, que será revisado anualmente por el Ministro de Industria, Turismo y Comercio. Dicho porcentaje, se establece en el anexo V del presente real decreto.

Sin perjuicio de lo anterior, las instalaciones que opten por vender su energía en el mercado, según el artículo 24.1.b), y cumplan los requisitos para ser proveedor del servicio de control de tensiones de la red de transporte, podrán renunciar al complemento por energía reactiva establecido en este artículo, y podrán participar voluntariamente en el procedimiento de operación de control de tensión vigente, aplicando sus mecanismos de retribución.

Respecto a la forma o sistema de liquidación de las tarifas, primas y complementos, las instalaciones que hayan elegido la opción a) del artículo 24.1 liquidarán con la Comisión Nacional de Energía, bien directamente, o bien a través de su representante, la cuantía correspondiente, a la diferencia entre la energía neta efectivamente producida, valorada al precio de la tarifa regulada que le corresponda y la liquidación realizada por el operador del mercado y el operador del sistema, así como los complementos correspondientes, sin perjuicio de lo establecido en el artículo 34 de este real decreto (RD661/2007).

Las instalaciones que hayan elegido la opción b) del artículo 24.1 recibirán de la Comisión Nacional de Energía, bien directamente, o bien a través de su representante, la cuantía correspondiente a las primas y complementos que le sean de aplicación.

Como requisito esencial se debe adquirir la condición de sujeto del mercado de producción, el titular de la instalación o quien le represente deberá cumplir las condiciones establecidas en el Real Decreto 2019/1997, de 26 de diciembre, por el que se organiza y regula el mercado de producción de energía eléctrica. Una vez adquirida dicha condición, o cuando se produzca cualquier modificación de ésta, el operador del sistema lo comunicará en el plazo de dos semanas a la Dirección General de Política Energética y Minas y a la Comisión Nacional de Energía.

No se considera tampoco el IH (Impuesto a Hidrocarburos), se establece un tipo cero en el impuesto sobre hidrocarburos para el biogás destinado al uso como carburante en motores estacionarios. Este tipo cero en el IH para el biogás queda establecido en el epígrafe 2.13 de la tarifa segunda del artículo 50.1 de la Ley 38/1992 (exenciones en el artículo 51), de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales (LIIEE) – BOE de 29 de diciembre –, modificado por el artículo 73 de la Ley 51/2007.

4.1.9.6 Tarifas y primas

Como se ha mencionado antes, según la categoría, grupo y subgrupo que se ha escogido como opción de comercialización, el ente regulador a fijado los valores la tarifa regulada y la prima que corresponda, a continuación se muestra la información referente a las clasificaciones mencionadas en los párrafos anteriores a los que sería posible optar en un proyecto como el que se ha desarrollado en este trabajo.

De las opciones que se mencionaron antes, para las instalaciones de la categoría a.1.3 la retribución será la establecida en la tabla 2 siguiente, incrementada con los porcentajes que se establecen en la tabla 2 siguiente, siempre que se cumpla el rendimiento eléctrico equivalente exigido, de acuerdo con el anexo I, sin perjuicio de lo establecido en la sección 5. ª del capítulo IV del presente real decreto.

Categoría a	Categoría b
Grupo a.1	Grupo b.7
Subgrupo a.1.3	Subgrupo b.7.2

Subgrupo	Combustible	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh
	b.6.1	P≤2 MW	primeros 15 años	17,2917	13,0780
			a partir de entonces	12,8343	0,0000
		2 MW < P	primeros 15 años	15,8313	11,3885
			a partir de entonces	13,3344	0,0000
	b.6.2	P≤2 MW	primeros 15 años	13,8233	9,6258
			a partir de entonces	9,3195	0,0000
		2 MW < P	primeros 15 años	11,6140	7,1712
			a partir de entonces	8,7110	0,0000
	b.6.3	P≤2 MW	primeros 15 años	13,8233	9,6258
			a partir de entonces	9,3195	0,0000
		2 MW < P	primeros 15 años	12,7754	8,3333
			a partir de entonces	8,7110	0,0000
	b.7.1		primeros 15 años	8,8884	4,8897
			a partir de entonces	7,2402	0,0000
a.1.3	b.7.2	P≤500 kW	primeros 15 años	14,4147	11,3753
			a partir de entonces	7,1803	0,0000
		500 kW < P	primeros 15 años	10,7563	7,0735
			a partir de entonces	7,2337	0,0000
	b.7.3		primeros 15 años	5,7887	3,8158
			a partir de entonces	5,7887	0,0000
	b.8.1	P≤2 MW	primeros 15 años	13,8233	9,6258
			a partir de entonces	9,3195	0,0000
		2 MW < P	primeros 15 años	11,8253	7,3772
			a partir de entonces	8,8695	0,0000
	b.8.2	P≤2 MW	primeros 15 años	10,2385	6,0564
			a partir de entonces	7,1824	0,0000
		2 MW < P	primeros 15 años	7,7053	3,7202
			a partir de entonces	7,7053	0,0000
	b.8.3	P≤2 MW	primeros 15 años	10,2385	6,3374
			a partir de entonces	7,1824	0,0000
		2 MW < P	primeros 15 años	10,0437	5,8398
			a partir de entonces	8,1705	0,0000
a.1.3 dentro de la disp.transitoria 10.ª				14,2825	9,8426

Tabla 49 Detalle tarifa regulada para la categoría a.1.3

La mencionada decima disposición transitoria, se refiere específicamente a instalaciones que utilicen la cogeneración para el secado de los subproductos de la producción de aceite de oliva, por lo que no tiene relación con el tipo de proyecto de este trabajo.

Un factor a tener en cuenta es el hecho de considerar los complementos comentados, por ejemplo de forma general, el complemento por energía reactiva (CER).

Se considerarán para todas las unidades de régimen especial los siguientes valores del factor de potencia y los correspondientes valores porcentuales de bonificación/penalización:

Rango del factor de potencia	Bonificación por cumplimiento %	Penalización por incumplimiento %
Obligatorio	0,00	3,00
Entre 0,995 inductivo y 0,995 capacitivo	4,00	0,00

Tabla 50 Detalle del denominado complemento por energía reactiva

Se establece el rango del factor de potencia obligatorio de referencia, entre 0,98 capacitivo y 0,98 inductivo.

Esto quiere decir que se bonifica la generación de reactiva en horas punta y en horas valle bonifica la absorción de reactiva. Son aspectos a considerar cuando al ajustar el Fp se podría llegar a conseguir lo que se estipula, y para una tarifa de 10,75 c€/kWh supondría 0,43 c€/kWh de CER, lo que por ejemplo, para una potencia instalada de 5 MWe (7000 h de funcionamiento anual) equivaldría a mas de 150.000 €/año.

Según los valores de referencias para la categoría b, a continuación se presentan los valores a utilizar

Grupo	Subgrupo	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh	Límite Superior c€/kWh	Límite Inferior c€/kWh
b.1	b.1.1	P≤100 kW	primeros 28 años	47,5597			
		100 kW<P≤10 MW	primeros 28 años	45,0886			
		10<P≤50 MW	primeros 28 años	24,8138			
	b.1.2		primeros 25 años	29,0916	27,4312	37,1483	27,4353
			a partir de entonces	23,2731	21,9449		
b.2	b.2.1		primeros 20 años	7,9084	2,0142	9,1737	7,6975
			a partir de entonces	6,6094			
	b.2.2*				9,1041	17,7114	
b.3			primeros 20 años	7,4410	4,1519		
			a partir de entonces	7,0306	3,3047		
b.4			primeros 25 años	8,4237	2,7047	9,2014	7,0414
			a partir de entonces	7,5814	1,4519		
b.5			primeros 25 años	**	2,2727	8,6397	6,6094
			a partir de entonces	***	1,4519		
b.6	b.6.1	P≤2 MW	primeros 15 años	17,1596	12,9361	17,9599	16,6423
			a partir de entonces	12,7362			
		2 MW < P	primeros 15 años	15,8313	11,3885	16,2967	15,4111
			a partir de entonces	13,3344			
	b.6.2	P≤2 MW	primeros 15 años	13,5763	9,3528	14,3744	13,0568
			a partir de entonces	9,1530			
		2 MW < P	primeros 15 años	11,6140	7,1712	12,0849	11,2090
			a partir de entonces	8,7111			
	b.6.3	P≤2 MW	primeros 15 años	13,5763	9,3528	14,3744	13,0568
			a partir de entonces	9,1530			
		2 MW < P	primeros 15 años	12,7754	8,3333	13,2404	12,3548
			a partir de entonces	8,7111			
b.7	b.7.1		primeros 15 años	8,6311	4,5652	9,6766	8,0350
			a partir de entonces	7,0306			
	b.7.2	P≤500 kW	primeros 15 años	14,1141	11,0355	16,5559	13,3376
			a partir de entonces	7,0306			
		500 kW < P	primeros 15 años	10,4541	6,7241	11,9121	10,3137
			a partir de entonces	7,0306			
	b.7.3		primeros 15 años	5,7887	3,8158	8,9961	5,5078
			a partir de entonces	5,7887			
b.8	b.8.1	P≤2 MW	primeros 15 años	13,5763	9,3528	14,3744	13,0568
			a partir de entonces	9,1530			
		2 MW < P	primeros 15 años	11,6140	7,1712	12,0849	11,2090
			a partir de entonces	8,7111			
	b.8.2	P≤2 MW	primeros 15 años	10,0221	5,7997	10,8213	9,4929
			a partir de entonces	7,0306			
		2 MW < P	primeros 15 años	7,0284	2,5856	7,4950	6,6094
			a partir de entonces	7,0284			
	b.8.3	P≤2 MW	primeros 15 años	10,0221	6,0677	10,8213	9,4929
			a partir de entonces	7,0306			
		2 MW < P	primeros 15 años	8,6397	3,9621	9,7197	8,0998
			a partir de entonces	7,0284			

Tabla 51 Tabla 47 Detalle tarifa regulada para la categoría b.7

En el caso de la Categoría c grupo c.1, a continuación se presenta la información que determina las tarifas y primas.

Grupo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh
c.1	5,8026	2,9758
c.3	4,1463	2,9758
c.4	7,5669	3,1851

Tabla 52 Tabla 47 Detalle tarifa regulada para la categoría c.1

Aunque en algún momento (entre 1995 y 2007), la tendencia de la variación de retribución económica de la tarifa y la prima fueron en aumento, actualmente estos valores se han reducido claramente a fecha del 2010.

Al día de hoy, dada la crisis económica y la situación del sistema eléctrico, que arrastra un elevado y creciente déficit de tarifa que amenaza su sostenibilidad, el Consejo de Ministros aprobó el 27 de enero un Real Decreto Ley para suspender temporalmente los procedimientos de pre asignación de retribución renovable y suprimir, también con carácter temporal, los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable, residuos y cogeneración.

Los objetivos de potencia para el año 2020 recogidos en el recientemente aprobado Plan de Energías Renovables permiten al Gobierno disponer de un holgado margen de maniobra en la fijación de la senda de implantación de las instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables desde el momento actual.

Este hecho, unido a que la capacidad de generación instalada actual es suficiente para asegurar la cobertura de la demanda prevista, hacen que esta medida no afecte a la seguridad de suministro ni a los compromisos de España para con la Unión Europea en materia de producción renovable de cara a 2020.

4.1.9.7 Ahorro de emisiones de GEI y su potencial económico

Como se ha comentado anteriormente dentro de los objetivos de este trabajo además de considerar la posibilidad de vender la energía eléctrica y utilizar el calor producido, se incluye poder cuantificar los ahorros de las emisiones de GEI, contabilizarlas y considerar la opción de generar certificados verdes o bonos de carbono.

Ya se mencionaron aspectos normativos respecto a la protección del medio ambiente y es justamente ahí donde se plantean los retos que tiene el sector productor de reducir sus emisiones, ya sea a nivel global como local. Entre los elementos que se pretende reducir para cumplir con los objetivos del Protocolo de Kioto, y que están directamente relacionados con este trabajo son el dióxido de carbono (CO_2) y gas metano (CH_4), principalmente este ultimo que tiene un potencial de efecto invernadero 21 veces mayor al dióxido de carbono.

Se ha propuesto una reducción significativa para el periodo 2008-2012 (~290 $MMtCO_2$ – II Plan Nacional de Asignación-), es decir que el único instrumento legalmente vinculante para la reducción de GEI

expira ha expirado, lo que se ha resuelto con un conjunto de acuerdos alcanzados en la XVII Cumbre del Cambio Climático (COP17) o mejor llamada como "La Plataforma Durban".

En este escenario y considerando que los cálculos en este trabajo reportan una producción total para el periodo de 36 años (en un escenario conservador de explotación) de 141 GWhe/año, la estimación del ahorro en toneladas de petróleo equivalente se aproxima a las 24.000 tep/año.

Para tener entonces una comparación directa con el ahorro de emisiones de CO_2, se puede considerar que:

1 kWhe producido por biogás evita 3,4 kg CO_2

Por lo que en el periodo de funcionamiento previsto el total de emisiones evitadas es aproximadamente de 480.000 t CO_2/año.

El citado Plan Nacional de Asignación, es el instrumento mediante el cual los estados miembros determinan la cantidad total de derechos a asignar durante un periodo, existen 3 tipos de actividades sujetas al cumplimiento de las obligaciones.

- Instalaciones de combustión con potencia térmica superior a 20 MW
- Instalaciones de producción de energía eléctrica con potencia superior a 20 MW
- Refinerías, coquerías, cemento, cal, cerámica, vidrio, siderúrgica, papel y cartón

La directiva de la Unión Europea sobre Comercio de Emisiones (2003/87/CE) establece que, durante los dos primeros periodos de asignación de derechos de emisión (2005-7, por un lado, y 2008-12, por otro), un determinado porcentaje de derechos de emisión será asignado de forma gratuita entre las instalaciones que emiten CO_2. En concreto, las instalaciones deben recibir gratuitamente al menos un 95% del total de los derechos asignados en el periodo 2005-2007 y un 90% en el periodo 2008-2012.

La decisión de entregar derechos de emisión a los generadores de forma gratuita durante los periodos 2005-7 y 2008-12 fue una decisión política sobre cómo distribuir entre productores y consumidores la renta que genera la asignación inicial de derechos de emisión. A partir del año 2013, los derechos de emisión podrán asignarse de acuerdo con otros métodos, como las subastas (de hecho la propuesta de la nueva Directiva establece la subasta como única herramienta para el sector eléctrico).

Se tienen entonces, 2 métodos para la asignación de los derechos de emisión, tal como se muestra a continuación.

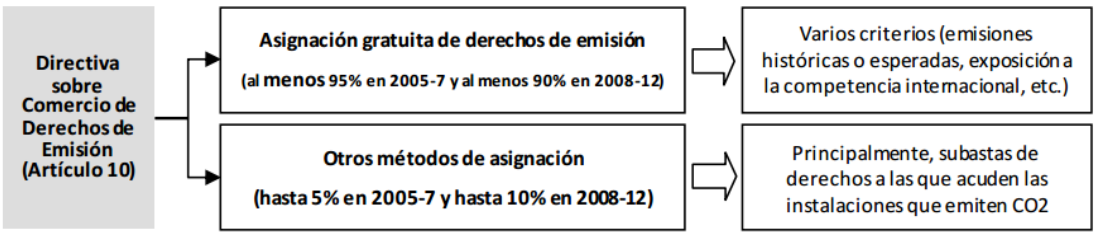

Ilustración 31 Modalidad de asignación derechos de emisión

El Plan Nacional de Asignación de derechos de emisiones español se aprobó en el RD 1402/2007 de 29 de octubre. En él se establecieron para el periodo 2008-2012, la cantidad total de derechos que se asignan a las instalaciones afectadas (Instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero), el procedimiento o metodología de cálculo de la asignación y la reserva de derechos para nuevos entrantes.

La evolución de asignaciones ha ido en disminución, considerando las emisiones asignadas en el PNA I y el PNA II, un resumen por sectores se adjunta en la siguiente tabla.

	Emisiones medias en 2000-5	Asignación PNA 2005-7	Asignación PNA 2008-12	Variación en la asignación entre los dos PNAs
	Mill. t CO_2/año (A)	Mill. t CO_2/año (B)	Mill. t CO_2/año (C)	% (D)
Instalaciones de generación de electricidad (potencia térmica> 20 MW)	91,30	85,40	54,42	-36,28%
Instalaciones de cogeneración	10,03	13,00	12,04	-7,41%
Otras instalaciones con potencia térmica > 20 MW	6,41	10,14	5,63	-44,45%
Refinerías de hidrocarburos	15,14	15,25	16,13	+5,79%
Coquerías, producción de acero, sintetización de minerales	10,86	11,23	12,21	+8,74%
Cemento y cal	28,27	29,99	31,25	+4,19%
Vidrio y fritas	2,61	2,93	2,83	-3,24%
Ladrillos, tejas y azulejos	6,01	5,65	5,80	+2,62%
Papel y cartón	4,31	5,30	5,48	+3,49%
Reserva para nuevos entrantes	--	3,29	6,28	+90,56%
Total	**174,94**	**182,18**	**152,25**	**-16,43%**

Tabla 53 Evolución de las asignaciones de derechos de emisión

La Unión Europea plantea la obligatoriedad de subastar derechos de emisión, en lugar de realizar una asignación gratuita, a partir del año 2013. Algunos Estados Miembros la UE pusieron en práctica estas subastas para cantidades pequeñas (porcentaje inferior o igual a los derechos de emisión no gratuitos) durante el PNA I, como Lituania, Hungría, Irlanda y Dinamarca.

Se consideran importantes de tener en cuenta, las siguientes diferencias de ambos planes.

- Se mantiene el criterio de mayor exigencia para el sector eléctrico por ser éste el que puede evolucionar más fácilmente y con menor coste hacia una producción con tecnologías limpias. Asimismo, es el sector menos expuesto al comercio internacional y, por lo tanto, tiene mayor posibilidad de internalizar el coste de reducir el CO_2 en el precio final.
- La posibilidad de cumplir con las obligaciones de reducción de emisiones a través de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) y de Unidades de Reducción de Emisiones (URE) se reduce, en el sector eléctrico, de un 70% a un 42%, y, en el resto de la industria, de un 20% a un 7,9% del total de las emisiones.
- El monto de RCE's y URE's obtenidos deben ser utilizados anualmente y no en cualquier momento del periodo 2008-2012, aunque la fracción no utilizada puede acumularse para periodos posteriores.

Para entrar en detalle de los beneficios económicos que podrían considerar el coste de los derechos de emisión como un coste de oportunidad para los generadores eléctricos, se detallaran a continuación los aspectos a considerar.

El uso de los derechos de emisión de dióxido de carbono (CO_2) asignados a las instalaciones de generación de electricidad (y, en general, para cualquier instalación sujeta a la Directiva sobre Comercio de Derechos de Emisión) implica una elección entre dos alternativas:

a) Utilizarlo para generar electricidad y evitar una penalización

b) Venderlo en el mercado de derechos de emisión.

En el caso de la generación de electricidad que podría acogerse al régimen especial, no tendría lugar evitar penalizaciones, por lo que, el enfoque se direccionara hacia el mercado de emisiones.

En dicho mercado se nota una influencia del coste de los derechos de emisión sobre el precio de la electricidad en el mercado, como un coste de generación adicional al coste de combustible, a los costes de operación y mantenimiento de las instalaciones y a otros costes.

Al incrementar el coste de generación, el coste de los derechos de emisión tiene influencia a la hora de construir las ofertas de venta de energía en el mercado por parte de los generadores. El impacto cuantitativo del precio de los derechos de emisión sobre las ofertas de venta de energía será mayor cuanto más contaminante sea la tecnología de generación (es decir, cuanto mayor sea su factor de emisión de CO_2).

Así entonces la oferta de venta de electricidad debe considerar la internalización del coste de los derechos de emisión para hacer el balance y/o comparación, entre los beneficios obtenidos cuando se genera y se usa el derecho o cuando no se genera y se vende el derecho.

a) Se genera y se usa el derecho, se debe tener en cuenta el precio esperado por la electricidad (€/MWh) menos los costes variables de generación, obteniéndose así el valor de oferta.
b) No se genera y se vende el derecho, se debe tener en cuenta el factor de emisión (t CO_2/MWh) además de el precio de los derechos de emisión (€/t CO_2)

Con ambos escenarios el productor podrá decidir la opción a considerar, tambien la incorporación (o, en términos económicos, internalización) del precio del CO2 en las ofertas de venta de los generadores modificando la curva de oferta del mercado, lo que en último término lleva a modificar el precio de la electricidad.

A continuación se mostrara información referente a una serie histórica de los precios de los derechos de emisión (€/t CO_2), de acuerdo a la información reportada por el Sistema Electrónico de Negociación de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono (SENDECO$_2$), se incluye la variación del precio de la bolsa Europea de derechos de emisión (EUA's) y Créditos de Carbono (CER's).

Las graficas representan valores de (€/t CO_2) para el periodo 2008 – 2012, donde se observa una clara baja de los valores, desde valores en torno a los 20 (€/t CO_2) hasta el día de hoy con valores en torno a los 6 (€/t CO_2).

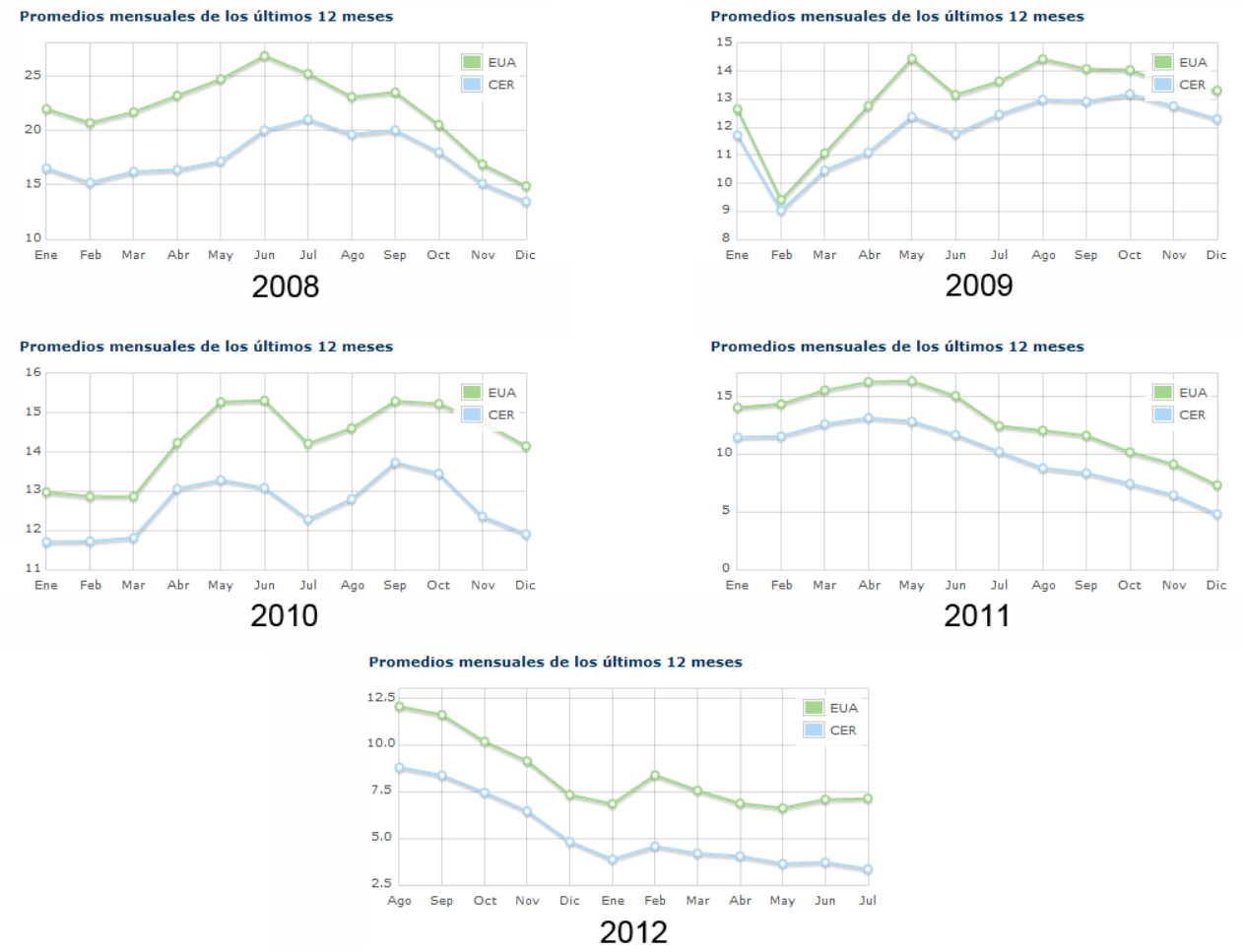

Ilustración 32 Evolución del coste de la tonelada de CO_2

En este escenario y comprendiendo que el objetivo de las reducciones de emisiones de GEI mas que a un negosio deben obedecer a cumplir con los objetivos propuestos, además de generar y fomentar sistemas y conductas que pretendan proteger al medioambiente, resulta atractiva la idea de obtener beneficios económicos a través de estos instrumentos.

Asi entonces considerando que los cálculos antes llevados a cabo reportaban un ahorro de emisiones de aproximadamente 480.000 t CO_2/año y considerando un precio de derechos de emisión de 6 €/t CO_2, los ahorros de CO_2 se podrían capitalizar 2.880.000 € / año, claramente con una tendencia a la baja.

Conclusiones

Aunque se pueda considerar que no son momentos económicos para invertir en grandes instalaciones como las que se presentan en este trabajo, en las que se podría considerar, que para una potencia instalada de 1MW, se requeriría una inversión aproximada de 1 M€, el tipo de tecnología y proceso de valorización del residuo se considera dentro de las alternativas que mejor adaptabilidad entrega, esto referido a que siempre sería posible la extracción y valorización del biogás generado, sin descartar que la generación de residuos es un hecho real y en crecimiento, que requiere acciones de prevención y corrección.

El modelo propuesto permite llevar a cabo un dimensionamiento acorde a los requerimientos del diseño, en este trabajo se pensó en una gran población como la del Valles Occidental, para obtener las dimensiones del potencial energético asociado a una comarca de Catalunya que aun cuenta con gran espacio rural rodeado de centros urbanos y sectores industriales, dando lugar a la posibilidad territorial de llevar a cabo un proyecto como este, donde podrían haber consumidores potenciales de energía y calor en los alrededores.

Respecto al proceso de generación del biogás, se han comparado estudios de diferentes autores, y aunque existen variaciones en los modelos y variables, se podría considerar como un modelo simple pero que se aproxima bastante a los valores obtenidos reportados por modelos más complejos para condiciones muy similares, estos modelos principalmente consideran la cinética de las variables que en este caso se han establecido como relativamente estables.

Relativo a la explotación y sus mejoras, se proponen las membranas de separación como una alternativa que podría generar mejoras en los procesos además de incrementar los tiempos de retorno de la inversión, estas permiten obtener un biogás de mayor concentración de metano.

Respecto a la capacidad de generar gran cantidad de calor ya sea por el uso de calderas o por la cogeneración en un escenario donde los complementos económicos se han inactivado, se pueden incluir en el presente y futuro de las distintas líneas de desarrollos, por ejemplo trabajando en conceptos como el district heating o la canalización a redes como el gas natural e incluso para la obtención de H_2 en pilas de combustibles y procesos de trigeneración.

Parte importante del trabajo que se ha desarrollado considera la obtención del calor necesario para tratar la totalidad de los lixiviados generados, a diferencia de muchas instalaciones donde se practica la recirculación, en este sentido el tratamiento de los lixiviados considera un plus a la gestión medioambiental del vertedero.

Un inconveniente que generalmente se podría encontrar al momento de pensar en una instalación de este tipo es el tema social, pues nadie quiere tener un vertedero cerca, más que nada por desconocimiento de las instalaciones ya que con la suficiente distancia entre el centro activo de la instalación y los limites con el exterior, además de las estrictas técnicas de vertido, compactado y sellado son acciones suficientes para mantener buenas condiciones de convivencia, también se debe

tener en cuenta que podrían existir beneficios para los vecinos (centros urbanos o industriales) tanto en tarifas eléctricas como el posible uso del calor.

El principal aprovechamiento del biogás en España es la producción de energía eléctrica. En términos de energía eléctrica vertida a la red, la procedente de biogás de vertedero y depuradoras supone aproximadamente el 90%, mientras que el biogás agroindustrial se encuentra en torno al 9%, pero incrementando.

Se ha explicado en los apartados de la venta de la energía que se encuentran suspendidos los mecanismos que priman la producción eléctrica en el denominado régimen especial, sin embargo en caso de una reactivación de este tipo de incentivos, se debe tener en cuenta que una buena gestión de la comercialización y combinación de acciones podría generar un margen de ganancias a considerar, por ejemplo, la elección de la categoría, la acogida a generar y vender la energía por tramos horarios, mejorar la eficiencia de la instalación, tener en cuenta el consumo y generación de la energía reactiva, etc. En estos momentos solo se podría vender la energía a una tarifa única sin poder contar con las primas antes existentes.

Aunque la legislación tiene como objetivo la reducción progresiva de los residuos biodegradables que se depositan en vertederos, fijando el objetivo de que en 2016 la cantidad de residuos biodegradables en vertedero sea, como máximo, el 35% de la cantidad de residuos biodegradables generados en 1995, aun se cuenta con mucho potencial en los residuos.

Respecto a los ahorros de las emisiones y el cumplimiento de los objetivos planteado en el Protocolo de Kioto, aun falta mejorar los mecanismos y las disposiciones legales para que las reducciones y los incentivos no sean solo parte de un acuerdo (que grandes generadores de GEI, pueden o no acogerse) y que se considere como una puerta de acceso a beneficios tecnológicos, transferencias de información y a un acuerdo mundial por mejorar las condiciones de nuestro medioambiente.

Aunque las fechas ya se cumplen, existe también la disposición de seguir generando en la agenda acciones y medidas que sigan con el camino comenzado por el Protocolo de Kioto.

El hecho de tener en consideración los últimos informes como La Estrategia Española de Cambio Climático, el Plan Nacional de Asignaciones, el Plan de Energías Renovables, etc. genera a menudo buenas expectativas en un marco futuro que al parecer está más lejano de lo que se piensa, pues aunque es sabido y aunque lo que debería primar es generar y producir con una conciencia ambiental sin interés, son los momentos económicos y los márgenes de ganancias los que discriminan las acciones.

Aunque no sea parte de la finalidad de los distintos acuerdos por mejorar las condiciones del medioambiente, los instrumentos económicos tales como lo son los derechos de emisión proporcionan una vía para “querer hacer las cosas”, generar menos GEI podría ser rentable o por lo menos podría generar ingresos.

En general, si no se permite a los generadores percibir los ingresos derivados de la internalización del coste de los derechos de emisión, las empresas eléctricas tendrán dificultad para recuperar sus inversiones en centrales de generación existentes y pospondrán o anularán las decisiones de inversión en nuevas centrales, afectando a medio y largo plazo a la Seguridad de Suministro del sistema e incrementando los costes que pagan los consumidores.

Bibliografía

A. Lobo, J. Herrero, O. Montero, I. Tejero, M. Fantelli, Modelling for environmental assessment of municipal solid waste landfills, Waste Manage Res 2002: 20: 198–210.

H.-C. Shin et al., Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model, Energy Policy 33 (2005) 1261–1270.

Informe complementario sobre el estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura, en el marco del proyecto de cooperación transfronteriza España-Portugal Altercexa, para el apoyo al cambio climático a través del fomento de las energías renovables en Extremadura, Alentejo y Centro. Diciembre 2010.

J.-W. Park, H.-C. Shin, Surface emission of landfill gas from solid waste landfill, Atmospheric Environment 35 (2001) 3445–3451.

Jung, Y. Imhoff, P.T., Augenstein, R., and R. Yazdani (2011), Mitigating Methane Emissions and Air Intrusion in Heterogeneous Landfills with a High Permeability Layer, Waste Management, vol. 31, no. 5, pp. 1049-1058.

Kjeldsen P. and Fischer V.E. (1995). Landfill Gas Migration-Field Investigation at Skellingsted Landfill, Denmark, Waste Management and Research, 13, 467-484.

L.P. G¨uereca et al., Life cycle assessment of two biowaste management systems for Barcelona, Spain, Resources, Conservation and Recycling 49 (2006) 32–48.

Landfill biogas quick scans and future utilization, Versos ’10: II Congreso Internacional sobre Mejores Tecnologias Disponibles en Vertederos, Gastreatment Services BV, Noviembre 2010.

Landfill Methane Collection and Combustion, CLIMATE LEADERS GREENHOUSE GAS INVENTORY PROTOCOL OFFSET PROJECT METHODOLOGY, August 2008.

LEY 54/1997, de 27 noviembre. del Sector Eıectrico. Boletin Oficial del Estado.

Lobo Garcı´a de Corta´ zar, I. Tejero Monzo´n, MODUELO 2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills, Environmental Modelling & Software 22 (2007) 59e72.

Los mercados de carbon en España 2011, Series CO_2, Factor CO_2 trading.

M. Nastev et al., Gas production and migration in landfill and geological materials, Journal of Contaminant Hydrology 52 (2001) 187 – 211.

M.H. Schroth et al., Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil, Waste Management xxx (2011) xxx–xxx.

Manual de recogida selective puerta a puerta, Assosiacio de municipis catalans per a la recollida porta a porta, Septiembre de 2010.

Massoud Kayhanian and George Tchobanoglous, Biomass Conversion Processes For Energy Recovery, Handbook of Energy Conservation and Renewable Energy.

Mercados de Carbono , Huella de Carbono y Gestion de Emisiones, Informe Ambientum.

Orden ITC/3353/2010, Boletin Oficial del Estado.

P.S. Calabrò, Greenhouse gases emission from municipal waste management: The role of separate collection,Waste Management 29 (2009) 2178–2187 2179.

Plan de Energías Renovables 2011 – 2020. Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

Real Decreto 661/2012. Boletin Oficial del Estado.

S. Martin G., Produccion y recuperacion del biogás de vertederos controlados de residuos solidos urbanos: Analisis de variables y modelización, Universidad de Oviedo, 1997.

S. Martin, E. Marañon, H Sastre, Landfill gas extraction technology: study, simulation and manually controlledextraction, Bioresource Technology 62, (1997) 47-54.

Situacion y Potencial de Generacion de Biogas, Estudio Tecnico, PER 2011-2020, Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

T. Katsumi et al., Performance-based design of landfill liner, Engineering Geology 60 (2001) 139 – 148.

Tchobanoglous, George, Gestión integral de residuos sólido.

U. Hegde et al., Methane and carbon dioxide emissions from Shan-Chu-Ku landfill site in northern Taiwan, Chemosphere 52 (2003) 1275–1285.

Y. Jung et al., Mitigating methane emissions and air intrusion in heterogeneous landfills with a high permeability layer, Waste Management 31 (2011) 1049‑1058.