

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Facultad de Ciencias Agrarias

Universidad Nacional de Cuyo

Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

REYNOSO, Martín Alejandro

Tesina en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo

Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

REYNOSO, Martín Alejandro

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables – FCA – UNCUYO

**Tesina de grado para aspirar a la obtención del título Ingeniero en
Recursos Naturales Renovables**

Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

Tesista: Martín Alejandro Reynoso

Directora: Ing. Natalia Vanin Especialista en Ing. Ambiental

Co-directora: Dra. Rosa Medina de Díaz

Mendoza, República Argentina

Año 2017

Tesina en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo

Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

REYNOSO, Martín Alejandro

RESUMEN

El trabajo de tesina pretende por un lado lograr una aproximación al proceso de diseño básico de ingeniería de una planta de biodigestión anaeróbica seca, con aprovechamiento del biogás y del lodo generado; y por otro, evaluar económicamente una propuesta tecnológica que brinde una solución para el tratamiento de la fracción mayoritaria de los RSU.

La tendencia mundial, en materia de Gestión de Residuos Sólidos es la de promover y facilitar una mayor participación de la ciudadanía en tareas de clasificación en origen, reciclaje, re-uso, reparación y en general la reducción o minimización de los residuos sólidos.

Dentro de los Residuos Sólidos Urbanos Domiciliarios, la Fracción Orgánica (FORSU_D) o fracción fermentable, comúnmente conocida como restos de comida, toma un valor que ronda el 50 %. Es pertinente mencionar que la disposición no controlada de dicha fracción orgánica trae aparejada problemas ambientales; como la lixiviación de compuestos tóxicos, la emisión de gases de efecto invernadero (el metano es un GEI con un potencial 23 veces mayor que el CO₂, en relación a su masa) y problemas de zoonosis entre otros; que repercuten en la salud y bienestar general de las personas.

La aplicación de la digestión anaerobia al tratamiento de los FORSU_D a escala industrial tiene una trayectoria de unos 24 años en Europa, pero el crecimiento en el número de instalaciones y capacidad de estas ha mostrado un crecimiento casi exponencial, siendo en estos momentos una alternativa competitiva y con futuro.

El estudio efectuado de la tecnología de biodigestión anaeróbica para el tratamiento de la FORSU_D y los resultados preliminares presentados en el presente documento darían cuenta de que se trataría de una opción factible de aplicar a un Sistema Integrado de Gestión de RSU en nuestra Provincia; lo que no quiere decir que sea la única ni la mejor de todas, sino que preliminarmente valdría la pena hacer una evaluación más profunda.

Tesina en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo

Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

REYNOSO, Martín Alejandro

AGRADECIMIENTOS

- *A mi compañera de vida Ariela Gómez, sin cuyo amor y apoyo no hubiera podido concretar esta etapa, y a nuestra hija Francisca, que es la luz de nuestra vida desde el primer día que supimos que llegaría a este mundo.*

- *A mis padres queridos; que son mi referencia de trabajo, esfuerzo y perseverancia.*

- *Al Ing. Alejandro Drovandi, al Dr. Peter Thomas y la Dra. Rosa Medina de Díaz; quienes me permitieron conocer y trabajar en la temática, pudiendo así afrontar de forma temprana los problemas propios de la ingeniería práctica.*

- *A mi Directora de Tesina y Compañera de Trabajo, Ing. Natalia Vanin, y a mi Co-directora, Dra. Rosa Medina de Díaz, quienes con su apoyo hicieron que fuera posible avanzar en esta etapa de formación profesional y personal.*

- *Al Ing. Victor Goicoa, del Centro INTI San Luis, y al Ing. Ariel Ravelli, consultor privado en Ing. Ambiental, ambos especializados en proyectos de biodigestión anaeróbica a escala industrial; quienes revisaron los capítulos técnicos de este escrito y me brindaron amablemente sus recomendaciones para mejorarlo.*

- *Al Instituto Nacional de Tecnología Industrial, que me brindó la posibilidad de formar parte de su plantel técnico y allí seguir trabajando en el desarrollo de ingeniería e investigación aplicada.*

- *Al sistema de educación pública y gratuita de nuestro país; al cual estaré siempre agradecido y que defenderé en pos de promover el desarrollo nacional y la igualdad de oportunidades para todos los habitantes de nuestro territorio.*

- *A la Gran Fuerza Creadora que todo lo provee.*

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Composición de los residuos domiciliarios del Área Metropolitana de Mendoza (Fuente: Plan de Gestión de RSU para los Municipios del Área Metropolitana Mendoza - UTN Facultad Regional Mendoza, 2006)	24
Gráfico 2: Capacidad instalada total y promedio, por país. (Fuente: De Bare y Mattheeuws, 2015)	52
Gráfico 3: Capacidad instalada por millón de habitantes y por país. (Fuente: De Bare y Mattheeuws, 2015)	52
Gráfico 4: Incremento en la capacidad instalada, por millón de habitantes y por país. (Fuente: De Bare y Mattheeuws, 2015).....	53
Gráfico 5: Evolución del “factor de incentivo” de ajuste de precio, de acuerdo a los años calendario transcurridos de inicio del 2017 hasta fines del 2038. (Fuente: Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina, https://www.minem.gob.ar/servicios/archivos/6548/AS_14695676441.pdf)	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Regionalización propuesta en el Plan Provincial de GIRSU. (Fuente: Evaluación de la situación de la ENGIRSU, año 2012- Mendoza)	23
Figura 2: Fases de la fermentación anaeróbica y grupos tróficos involucrados. (Adaptado de Wellinger y col., 2013)	28
Figura 3: Valor de la constante de Henry para distintos gases presentes en el biogás, en función de la temperatura.	40
Figura 4: Características básicas de proceso de diferentes tecnologías de metanización. (Adaptado de PROBIOGAS, 2015)	45
Figura 5: Esquema de la tecnología tMETHAR® (Túneles de Metanización de Residuos Orgánicos), propiedad de la empresa METHANUM. (Fuente: página web de la empresa)	49
Figura 6: Tabla de características típicas de diversos sustratos. (Imagen extraída de Wellinger y col., 2013)	63
Figura 7: Diagrama simplificado del proceso de metanización propuesto para el tratamiento de la FORSU _D	64
Figura 8: Esquema de movimiento de materiales en un digestor seco continuo vertical.	73
Figura 9: Esquema de gasómetro externo (Tipo SATTLER DMGS) (Fuente: http://www.manantial.cl/dinamicos/descargas/biogas-catalogo-1.pdf)	84
Figura 10: Esquema de recuperación de calor de un sistema CHP alimentado con biogás (Fuente: Wellinger y col, 2013)	90
Figura 11: Layout de planta (predio de aprox. 1,7 ha)	92
Figura 13: Evolución del factor de ajuste de precio, de acuerdo a los años transcurridos de operación/producción. (Fuente: Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina, https://www.minem.gob.ar/servicios/archivos/6548/AS_14695676441.pdf)	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estequiometría e interacción bacteriana en el caso de la degradación del etanol. (Fuente: Wellinger et al, 2013)	31
Tabla 2: Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC (valores empíricos proporcionados por DEULA-Nienburg). (Fuente: Informe técnico de HACH LANGE)	34
Tabla 3: Efectos fisiológicos humanos de distintas concentraciones de SH ₂ en el aire.	38
Tabla 4: Resumen de las tecnologías de metanización de segunda generación: Dranco, Valorga y Kompogas. (Fuente: elaboración propia. Esquemas extraídos de PROBIOGAS, 2015)	46
Tabla 5: Tipo de tecnologías de metanización en operación en el año 2014. Porcentaje instalado acumulado, en función de los parámetros más importantes de proceso. (Fuente: adaptado de De Bare y Mattheeuws, 2015).....	54
Tabla 6: Opciones tecnológicas para el proceso. (Adaptado de Wellinger y col., 2013)	67
Tabla 7: Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías.	68
Tabla 8: Relación de parámetros para la selección de tuberías. (Adaptado de Wellinger et al, 2013) ..	85
Tabla 9: Comparación de sistemas estacionarios de generación de energía con biogás (Adaptado de Wellinger y col., 2013)	89
Tabla 10: Comparación en tiempo de decaimiento T ₉₀ (tiempo para la destrucción del 90 % de los patógenos) de algunas bacterias patogénicas en un sistema de biodigestión anaeróbica y en un sistema de estiércol líquido no tratado. (Adaptado de Wellinger y col, 2013)	91
Tabla 11: Indicadores de resultado, del flujo de fondo base.	101
Tabla 12: Indicadores de resultado, con un precio menor de venta de energía eléctrica; de 118,00 us\$/MWh.	101
Tabla 13: Indicadores de resultado, con un menor factor de planta o de capacidad; del 75 % y del 80 %.	102
Tabla 14: Indicadores de resultado, con una variación de la tasa de interés por el financiamiento de la inversión; del 3,5 % y del 5 %.....	102
Tabla 15: Indicadores de resultado, con una reducción en el plazo de devolución del crédito por el financiamiento de la inversión; plazo de 15 años.	102
Tabla 16: Indicadores de resultado, con una tasa del 3 % por el financiamiento de la inversión, plazo de 18 años y un precio de venta de la energía de 105,00 us\$/MWh.	102

Contenido

1. CAPÍTULO 1: Justificación y Objetivos.....	15
1.1. Definiciones.....	15
1.2. Antecedentes y justificación	15
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general.....	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
2. CAPÍTULO 2: Alcance del estudio	18
2.1. Metodología	18
2.2. Aspectos generales de la zona de influencia.....	18
2.3. Aspectos clave de un Sistema de Gestión de los RSU	19
2.4. Estado actual del Sistema de Gestión de Residuos del Gran Mendoza	20
3. CAPÍTULO 3: Marco teórico.....	25
3.1. Biogás	25
3.2. Historia de la biodigestión anaeróbica.....	27
3.3. Microbiología y ambiente microbiano	27
3.3.1. Bacterias acidogénicas	28
3.3.2. Bacterias acetogénicas.....	29
3.3.3. Bacterias homoacetogénicas	29
3.3.4. Bacterias metanógenicas	29
3.3.5. Estequiometría de la interacción bacteriana	31
3.4. Parámetros ambientales y operacionales del proceso	31
3.4.1. Efecto Reductor.....	31
3.4.2. Ácidos grasos volátiles y bicarbonatos.....	32
3.4.3. Nutrientes, elementos traza e inhibición.....	35
3.4.3.1. Macronutrientes.....	35
3.4.3.2. Micronutrientes.....	35
3.4.3.3. Inhibición y toxicidad	35
3.4.4. Molienda	36
3.4.5. Temperatura.....	37
3.4.6. Agitación/mezclado.....	37
3.4.7. Desulfurización del biogás generado	38
3.4.7.1. Desulfurización biológica	39

3.4.7.2.	Desulfurización físico-química.....	40
3.4.7.3.	Desulfurización química	41
3.5.	Caracterización del sustrato de alimentación para la producción de biogás	42
3.6.	Tipos de sistemas de biodigestión anaeróbica aplicables al FORSU _D	44
3.7.	Estado del arte del tratamiento del FORSU _D , a través de la metanización, en Europa, y su perspectiva.....	50
4.	CAPÍTULO 4: Estudio técnico.....	56
4.1.	Diseño e ingeniería conceptual de planta.....	56
4.1.1.	Sustrato y cálculo de potencial	56
4.1.1.1.	Cálculo de proporción de metano y dióxido de carbono mediante ecuación de Buswell	58
4.1.1.2.	Cálculo de producción de biogás mediante ecuación de Dulong modificada (basada en la destrucción de los SV)	60
4.1.1.3.	Producción de biogás y aprovechamiento energético.....	60
4.1.2.	Diagrama simplificado de procesos	63
4.1.3.	Almacenamiento y pre-tratamiento del sustrato	65
4.1.3.1.	Recepción	65
4.1.3.2.	Reducción y homogeneización de tamaño	65
4.1.3.3.	Separación de cuerpos extraños	66
4.1.4.	Unidad de digestión	66
4.1.4.1.	Sistema de alimentación	67
4.1.4.2.	Cálculo del caudal de carga y tubería de transporte.....	68
4.1.4.3.	Bomba de carga del digestor.....	70
4.1.4.4.	Reactor	73
4.1.4.4.1.	Volumen del reactor.....	74
4.1.4.4.2.	Material del reactor	75
4.1.4.4.3.	Dimensiones del reactor	76
4.1.4.4.4.	Temperatura de operación, aislamiento y demanda térmica.....	78
4.1.5.	Almacenamiento de biogás.....	83
4.1.6.	Tuberías y válvulas	85
4.1.7.	Sistema de acondicionamiento del biogás.....	86
4.1.7.1.	Material particulado.....	87
4.1.7.2.	Sulfuro de hidrógeno.....	87

4.1.7.3.	Disminución del contenido de agua.....	88
4.1.8.	Sistema de aprovechamiento térmico-eléctrico.....	88
4.1.9.	Tratamiento del digestato y posibles usos.....	90
4.2.	Layout de planta.....	92
5.	CAPÍTULO 5: Estudio económico-financiero	93
5.1.	Postulados para el estudio financiero base	93
5.1.1.	Inversión.....	93
5.1.2.	Período de estudio	94
5.1.3.	Costos operacionales y de mantenimiento.....	94
5.1.4.	Costos de adquisición de sustrato de alimentación.....	95
5.1.5.	Costos por disposición final del descarte.....	95
5.1.6.	Ingresos	95
5.1.7.	Estructura de financiamiento.....	98
5.1.8.	Depreciaciones	99
5.1.9.	Tasa de descuento.....	100
5.1.10.	Beneficios programa RenovAr.....	100
5.1.11.	Indicadores de resultado.....	101
5.2.	Resultado del flujo de fondos base	101
5.3.	Sensibilización de variables.....	101
5.4.	Aspectos económicos del proyecto.....	103
6.	COMENTARIOS FINALES	104
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	105
	ANEXOS	107
	ANEXO: Cálculo de potencia térmica demandada por el reactor.....	107
	ANEXO: Catálogo de caños y tuberías de conducción normalizadas.....	111
	ANEXO: Catálogo gasómetros de membrana	112
	ANEXO: Datos históricos (2007-2016) de temperatura de la Est. Met. Rousell	113
	ANEXO: Informe práctico. Analítica de Laboratorio Valoración FOS/TAC	115
	ANEXO: Oferta Presupuestaria Instalación Dranco para el tratamiento de 30.000 toneladas de residuos biomásicos al año	119
	ANEXO: Procedimientos de estimación de productividad teórica de biogás	129
	ANEXO: Resumen de métodos para la caracterización analítica de sustratos para biogás.....	136

Tesina en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo

Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

REYNOSO, Martín Alejandro

1. CAPÍTULO 1: Justificación y Objetivos

1.1. Definiciones

$FORSU_D$ = Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos Domiciliarios. Es la fracción fermentable de los RSU conocida como restos de comidas o desechos alimenticios; la cual a su vez representa la fracción (w/w) mayoritaria de los RSU

GIRSU = Gestión Integrada de Residuos Sólidos Urbanos, término que surge de los años '70 y que se destaca por la visión de sostenibilidad de los recursos naturales, mediante la disminución de la generación de residuos y de su máximo aprovechamiento. Involucra tanto aspectos de gestión como tecnológicos, con la premisa de la reducción, reutilización y reciclaje o valorización.

RSU = Residuos Sólidos Urbanos, aquellos generados por la población en sus actividades habituales, y generalmente están conformados por material degradable (papel, cartón, textiles, restos de alimentos, residuos de jardinería), parcialmente degradable (madera, pañales descartables) y no degradable (plásticos, metales, vidrio). El porcentaje de cada tipo varía según el lugar y las costumbres de vida.

RSU_D = Residuos Sólidos Urbanos Domiciliarios, que es la fracción de los RSU que no contempla los residuos sólidos de construcción y los producidos por la poda y mantenimiento del arbolado público.

1.2. Antecedentes y justificación

Según datos expuestos en el reporte *Evaluación de la situación de la ENGIRSU, año 2012- Mendoza*, documento oficial de avance de la ENGIRSU (Estrategia Nacional de Gestión Integrada de Residuos Sólidos Urbanos), los siete departamentos que componen el Área Metropolitana de la Provincia (Capital, Guaymallén, Godoy Cruz, Las Heras, Luján, Maipú y Llavalle), con una población de 1.123.371 habitantes (según datos del censo 2010), genera 1.078 t diarias de Residuos Sólidos Urbanos Domiciliarios (RSU_D).

Dentro de los Domiciliarios, la fracción orgánica ($FORSU_D$) o fracción fermentable, comúnmente conocida como restos de comida, toma un valor que ronda el 50 %. Es pertinente mencionar que la disposición no controlada de dicha fracción orgánica trae aparejada problemas ambientales; como la lixiviación de compuestos tóxicos, la emisión de gases de efecto invernadero (el metano es un GEI con un potencial 23 veces mayor que el CO_2 , en relación a su masa) y problemas de zoonosis entre otros; que repercuten en la salud y bienestar general de las personas.

En la mayoría de los Municipios la Gestión de Residuos está lejos de los estándares mínimos de protección ambiental.

La recolección representa el primer tratamiento al que es sometido el residuo municipal, y tiene una influencia decisiva en las características del material, en la configuración de las etapas de tratamiento posteriores y en su eficiencia.

La disposición final se lleva a cabo en espacios donde sólo se remiten, en el mejor de los casos, a tapar los residuos y, en algunos vertederos a cielo abierto, permitir la extracción de materiales reciclables mediante procedimientos rudimentarios, lejos de las normas de Higiene y Seguridad.

El reciclaje se realiza de manera incipiente utilizando la recolección y separación informal (cirujeo) y vendiendo los materiales a algunos acopiadores (principalmente papel, cartón, latas de aluminio y plástico) que comercializan estos materiales para ser reciclados.

Los precios de mercado para los materiales reciclados y el costo asociado para una separación formal no estimulan su separación y reciclaje. La falta de conciencia ambiental y la ausencia de una educación ambiental organizada y permanente en el tiempo, forma ciudadanos que no respetan el ambiente en que vivimos y una parte de los residuos que generamos terminan en la vía pública. (Fundación Universidad Tecnológica Regional Mendoza y Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2004)

Es en este contexto que se puede comprender la importancia que tiene el trabajar sobre una alternativa para el tratamiento de una de las fracciones mayoritarias de este RSU, el FORSU_D; brindando entonces una solución que abarque tanto los aspectos ambientales como socio-económicos del problema.

La tendencia mundial, en materia de gestión de residuos sólidos es la de promover y facilitar una mayor participación de la ciudadanía en tareas de clasificación en origen, reciclaje, re-uso, reparación y en general la reducción o minimización de los residuos sólidos.

La aplicación de la digestión anaerobia al tratamiento de los FORSU_D a escala industrial tiene una trayectoria de unos 24 años en Europa, pero el crecimiento en el número de instalaciones y capacidad de estas ha mostrado un crecimiento casi exponencial, siendo en estos momentos una alternativa competitiva y con futuro.

El biogás es producido por un consorcio microbiano anaeróbico que degrada la materia orgánica en cuatro pasos: hidrólisis, acidificación, producción de ácido acético y producción de metano. El producto de ese proceso de digestión, biogás crudo, consiste

en una mezcla de 50-70% metano, 25-50% CO₂ y 2-8% de otros gases tales como nitrógeno, oxígeno y trazas (Ej.: SH₂, NH₃ e H₂). Antes de que el biogás pueda ser transformado en energía eléctrica, mediante moto-generadores instalados en su lugar de generación, debe ser sometido a un proceso de limpieza; en el cual el biogás saturado en vapor de agua es desulfurizado y secado. (Wellinger y col., 2013)

Como Welliner y col. también mencionan, ciertas condiciones básicas deben ser alcanzadas para permitir la degradación eficiente del sustrato por parte del consorcio microbiano. Estas son: 1) ausencia de aire (atmósfera anaeróbica); 2) temperatura constante; 3) abastecimiento óptimo de nutrientes; 4) pH óptimo y uniforme. El equipamiento de una planta de biogás entonces debe promover estas condiciones. Además, el diseñador de una planta de biogás debe conocer desde el principio con qué tipo de sustrato esta se alimentará, de manera de poder seleccionar el sistema y equipos necesarios para una producción eficiente.

Para que el tratamiento del FORSU_D sea operativo a escala industrial (municipal) será preciso implantar una recolección selectiva en origen de esta fracción. (Castells, 2005)

El trabajo de tesina pretende por un lado lograr una aproximación al proceso de diseño básico de ingeniería de una planta de biodigestión anaeróbica seca, con aprovechamiento del biogás y del lodo generado; y por otro, evaluar económicamente una propuesta tecnológica que brinde una solución para el tratamiento de la fracción mayoritaria de los RSU.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar una alternativa tecnológica para el tratamiento de la fracción orgánica húmeda de los RSU, considerando un caso de aplicación potencial en el Oasis Norte de la provincia de Mendoza.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar la información existente sobre composición y variabilidad de los RSU generados en el Gran Mendoza.
- Estudiar las distintas alternativas tecnológicas disponibles para el tratamiento anaeróbico de la fracción orgánica de los RSU y optar por una de ellas para el desarrollo de un diseño básico de ingeniería para un hipotético proyecto de aplicación.
- Estimar la factibilidad de aplicación del tratamiento elegido.

2. CAPÍTULO 2: Alcance del estudio

2.1. Metodología

La metodología empleada consiste en una revisión bibliográfica exhaustiva con el objeto de generar un marco teórico acorde al nivel de estudio, para llegar luego a los parámetros generales que se tienen en cuenta al momento de realizar un diseño básico de ingeniería de un sistema de tratamiento de materiales orgánicos húmedos (contenido de humedad mayor al 60 % w/w en base húmeda) mediante tecnología de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento de biogás.

Para la evaluación de la tecnología de tratamiento, se trabaja a partir de supuestos relacionados con una determinada tasa de generación del FORSU_D, planteando un caso hipotético de un sistema ya instaurado de separación en origen de la corriente mencionada y tomando también valores medios de caracterización físico-química del material. Con esto se realiza el ejercicio de diseño básico de ingeniería del sistema, para luego finalizar con una evaluación económica del proyecto, a nivel de pre-factibilidad.

Los resultados de cálculo de diseño se validan mediante la contrastación con fichas técnicas de plantas de tratamiento ya existentes en otras partes del mundo y a través de la consulta a técnicos expertos en la temática.

Se plantea un escenario base para el estudio de viabilidad económico-financiero del proyecto y se evalúa su comportamiento mediante una sensibilización de variables, en base a distintos escenarios probables.

2.2. Aspectos generales de la zona de influencia

La Provincia de Mendoza se localiza en el centro-oeste de la República Argentina en la diagonal árida sudamericana, entre los 32° y 37° 35' de latitud sur y los 66° 30'y 70° 35' de longitud oeste. En los cordones montañosos del oeste se originan los ríos de la provincia, a partir de la fusión de las nieves y los glaciares, que luego transitan por el llano. El Oasis Norte, donde se centra este estudio, es el más extenso de la Provincia y uno de los más importantes del país. Posee una especialización agrícola, donde prevalece el cultivo de vid, combinado con la horticultura y frutales, especialmente hacia el este. El área urbana del Gran Mendoza ocupa 16.700 km² sobre el Oasis Norte, extendiéndose de forma casi regular hacia el Noreste, Este y Sur, mientras que las estribaciones de la Cordillera, impiden el crecimiento en las direcciones Norte y Oeste. Se trata de la cuarta aglomeración del país con 1.230.000 habitantes, siendo la más importante fuera de la Pampa Húmeda. El centro urbano se ubica en una zona

árida a semiárida, de precipitaciones bajas (120-400 mm anuales), principalmente en meses de verano. La cercanía a la Cordillera de Los Andes tiene una fuerte influencia en la meteorología y en la calidad de aire locales, debido a la circulación típica valle-montaña de variación diaria. La velocidad del viento media anual es alrededor de 2,6 m/s con un 26% de calmas. Las direcciones predominantes son S, S-SW, E-SE y E. El área presenta baja humedad relativa (50%), baja incidencia de niebla y pocos días cubiertos (65-75 días /año). (Puliafito y col., 2013)

2.3. Aspectos clave de un Sistema de Gestión de los RSU

La recogida representa el primer tratamiento al que es sometido el residuo municipal (Cecchi et al., 2003), y tiene una influencia decisiva en las características del material, en la configuración de las etapas de tratamiento posteriores y en su eficiencia.

En todo el proceso de toma de decisiones relativas a la implantación del sistema de recogida, segregación de flujos y adopción de la tecnología apropiada a cada flujo, con toda la complejidad que este proceso comporta, el subconjunto de decisiones limitantes que afectan a toda la configuración posterior del esquema de gestión se realiza dentro del volumen de control definido por cada domicilio particular. La eficiencia en la clasificación y separación de residuos orgánicos en el seno de una cocina, por parte de un ciudadano en su domicilio particular, es muy superior a la de cualquier sistema de alta tecnología que deba realizar esta separación a partir de residuos mezclados o de fracción resto.

Las diferentes características de la fracción orgánica en función de su origen o método de recogida y selección afectan a su contenido en materia orgánica biodegradable, potencial de producción de biogás y contenido en materiales impropios. Estas características afectan al balance económico de las instalaciones de gestión de residuos orgánicos en tres aspectos, a grandes rasgos:

- Costos de inversión, siendo más elevados conforme más etapas de pretratamiento se han de aplicar para obtener una fracción orgánica con el mínimo de materiales impropios posible. Las etapas de pretratamiento y separación mecánica de fracción orgánica inciden a su vez en los costos por consumo de energía y de operación en general; es decir, en sus costos operativos u OPEX.
- Ingresos por venta de energía obtenida a partir del biogás producido durante el proceso de digestión anaerobia, los cuales afectan a los costos netos de operación.
- Ingresos o costos debidos a la gestión del compost producido, el cual dependerá en gran manera del aspecto y contenido de materiales impropios.

Debe tenerse en cuenta que no es el total de los residuos generados lo que llega a los vertederos oficiales de los cuales se tiene información. Según el IPCC¹, para América del Sur, sólo un 54% llega a sitios controlados, mientras que el resto se destina a vertederos clandestinos no controlados, de los cuales no se tiene ninguna información. De los residuos que llegan a estos sitios, hay una porción compuesta por papel; cartón; vidrio y metales, que es separada por trabajadores informales para su reuso. De lo que resta, una parte es quemada de forma accidental, o a veces intencionalmente con el objeto de reducir volumen y evitar fuentes de infección, en un porcentaje del 60%. La quema se realiza de forma abierta, sin el uso de equipos adecuados ni control alguno sobre las emisiones. (Allende y col., 2015)

La máxima valorización material, con reciclaje de nutrientes, y energética, mediante digestión anaerobia, se consigue con residuo orgánico segregado en origen y recogido de forma diferenciada. La calidad de esta fracción depende básicamente de la participación ciudadana, de manera que pueden ser más limitantes para el éxito de los programas de gestión de residuos los aspectos organizativos y de participación ciudadana que las inversiones en tecnología para su manipulación y tratamiento. Una alta calidad de los materiales puede permitir, para el caso de valorización a través de la tecnología de biodigestión anaeróbica, la codigestión con otros residuos orgánicos susceptible de uso agrario, posibilitando que las plantas de digestión y compostaje sean centros de gestión integral de residuos orgánicos en su zona geográfica de influencia. Para estos objetivos, la educación ambiental y la concienciación ciudadana juegan un papel determinante, y las plantas de tratamiento de residuos han de convertirse en centros implicados en esta formación y en la generación de información que permita ir avanzando en el paradigma del desarrollo sostenible, y particularmente en los aspectos de minimización en la producción de residuos y en las practicas de segregación.

2.4. Estado actual del Sistema de Gestión de Residuos del Gran Mendoza

La Gestión de Residuos en Argentina se encuentra regulada por la Ley de Presupuestos Mínimos Nº 25.916 (2004), resultando la misma de cumplimiento obligatorio para provincias y municipios, a cargo de su implementación en el territorio.

La Ley Provincial de Residuos Urbanos de Mendoza, nº 5970 del año 1992, ordena en su Art. primero la erradicación de todos los basurales a cielo abierto y los microbasurales en terrenos baldíos. No obstante esto, luego de casi 25 años, el

¹ Panel Intergubernamental para el Cambio Climático: "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories," Hayama, Kanagawa JAPAN, 2006.

mandato resulta casi una expresión de deseo, ya que según datos oficiales del estado de situación del Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos de la Provincia en prácticamente la totalidad de los Departamentos que la conforman se registran aún basurales a cielo abierto; corroborado esto por estudios técnicos efectuados por institutos de investigación provinciales vinculados con la temática, tales como el Grupo GEAA-UTN² y el CEIRS-UNCUYO³.

Esta misma ley provincial habilita a los municipios a emplear procesos de estabilización biológica con o sin selección de materiales, de incineración de residuos sanitarios con tratamiento de gases o cualquier otro sistema que cumpla con las normas vigentes de protección ambiental y sanitaria.

La quema de Residuos Sólidos Urbanos en vertederos descentralizados sin tratamiento es una práctica común en zonas con población de bajo acceso a los recursos económicos. Los vertederos son manejados tradicionalmente por las municipalidades y a menudos se proporciona el acceso libre e informal a personas independientes que recuperan materiales valiosos como botellas de vidrio, metales o materiales plásticos. Esta facilidad de acceso provoca quemadas abiertas intencionales y también no intencionales de los RSU, que en algunos casos incluyen fracciones de residuos peligrosos, como pinturas, solventes, equipos electrónicos y cubiertas de automóviles. Los productos de la combustión representan emisiones de gases y partículas que implican un gran riesgo para la salud pública y para el ambiente en general. (Allende y Benítez, 2016)

A nivel Nacional debe hacerse especial mención a la Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU), la cual fue implementada en todo el país en el año 2005, y cuenta con un horizonte temporal establecido en veinte años (2005-2025). Dicha Estrategia se implementa en fases de corto, mediano y largo plazo, y se basa en el criterio de integralidad (Reducción en origen, Segregación Domiciliaria, Recolección y transporte, transferencia y regionalización, procesamiento - reciclado de inorgánicos, compostaje de orgánico y otros -, y Centros de Disposición Final (CDF).

Sus principios fundamentales son:

- Preservación de la salud pública.
- Preservación ambiental.

² <http://geaa.frm.utn.edu.ar/>

³ <http://fing.uncu.edu.ar/Investigacion/institutos/ima/ceirs/centro-de-estudios-de-ingenieria-de-residuos-solidos>

- Disminución significativa de residuos a generar y disponer con la aplicación de procesos de minimización y valorización, a través de las 4R, (Reducción de los RSU generados en origen, asociada a la Producción Limpia, Envases, Ciclo de Vida y Consumo Sustentable de productos y servicios; Reuso; Reciclado, y Recompra de los materiales procesados para su reuso y el reciclado).
- Disposición final de los RSU en forma sostenible y erradicación y posterior clausura de los basurales a cielo abierto.

Sus cinco objetivos específicos son:

1. Reducción y Valorización de RSU.
2. Implementación de la GIRSU.
3. Clausura de Basurales a Cielo Abierto (BCA).
4. Recopilación, procesamiento y difusión de Información.
5. Comunicación y Participación.

Sus fases de revisión y actualización son:

Fase 1 *2006/2007 Revisión y actualización 2007*

Fase 2 *2007/2010 Revisión y actualización 2012*

Fase 3 *2015/2025 Revisión y actualización según requerimientos*

En el año 2010 se realizó una revisión y actualización parcial de la ENGIRSU. En el año 2012 se entregó el Reporte final sobre la Gestión, Generación y Calidad de los Residuos Sólidos Urbanos en la República Argentina, el cual se basó en una base muestral con inferencias estadísticas.

Se hace referencia a esta revisión del año 2010 ya que el Reporte presentado en el 2012 constituye el documento oficial más actualizado al respecto del estado de situación del Sistema de Gestión de Residuos de nuestra provincia. A continuación se presentan los datos más relevantes extraídos del mencionado documento⁴.

- Año de Elaboración del Plan: 2007.
- Población Provincial según censo INDEC 2010: 1.738.929 habitantes.
- Lineamientos generales del Plan Provincial:

⁴ Ver *Evaluación de la situación de la ENGIRSU, año 2012- Mendoza* (<http://ambiente.gob.ar/gestion-integral-de-residuos/la-estrategia-nacional-para-la-gestion-integral-de-residuos-solidos-urbanos/>; junio de 2017)

- Establece la necesidad de regionalización y la conformación de consorcios regionales para GIRSU.
- Establece la necesidad de remediación, cierre y rehabilitación de los basurales a cielo abierto.
- Establece la necesidad de implantación de plantas de separación, reciclaje y tratamiento biológico de residuos; así como la disposición final de los rechazos en rellenos sanitarios.
- Establece la necesidad de promover la inclusión social de los recuperadores urbanos dentro del sistema formal de GIRSU.
- La regionalización de los planes municipales toma la configuración que se muestra en la Figura 1.

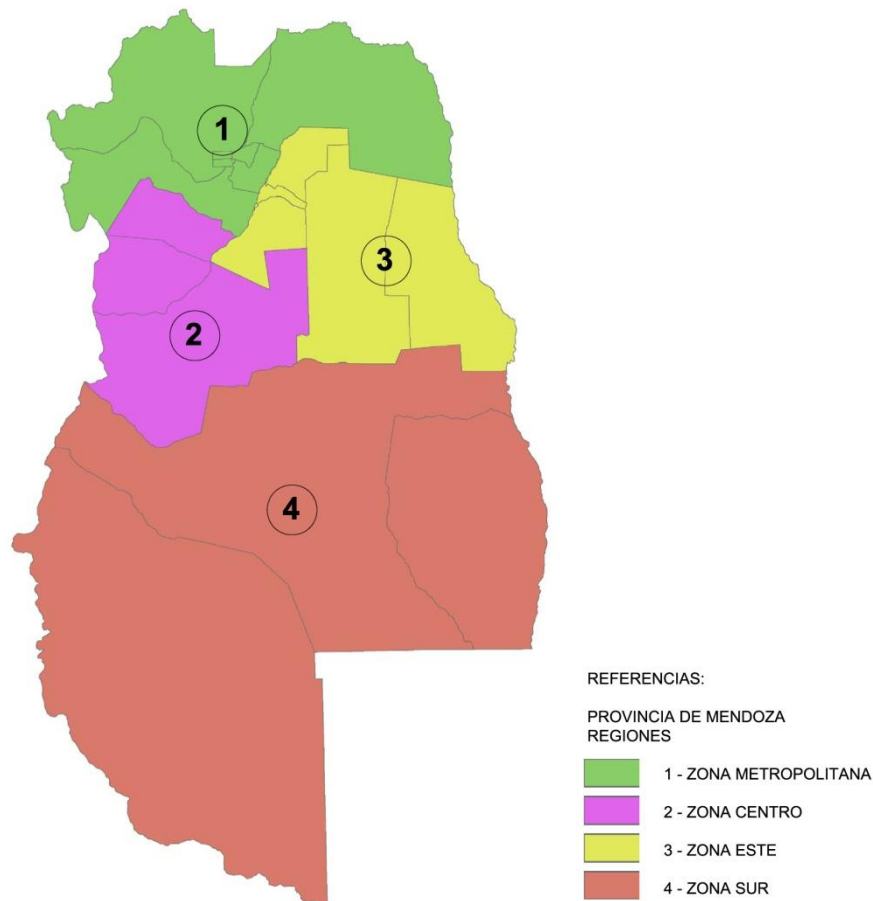


Figura 1: Regionalización propuesta en el Plan Provincial de GIRSU. (Fuente: Evaluación de la situación de la ENGIRSU, año 2012- Mendoza)

- Generación per cápita de RSU en 2010: 1,003 kg/habitante*día (lo cual en su momento representaba un incremento en la generación del 0,53 % anual desde el 2005).
- La disposición final es realizada en basurales a cielo abierto en la mayor parte de la provincia. Existen vertederos controlados y rellenos sanitarios en los Departamentos de Las Heras, Maipú, Tunuyán, San Carlos y Tupungato.
- La proyección de la generación de RSU, con datos del año 2010, arroja como resultado un valor de 1711 t/día al 2015, 1983 t/día al 2020, 2263 t/día al 2025 y 2584 t/día al 2030.
- En la provincia existente 4 plantas de separación de RSU que están funcionando, estas son: Maipú, Malargüe, Gral. Alvear y Zona Este (Tunuyán, San Carlos y Tupungato).
- En cuanto a los aspectos institucionales, se resalta la “Falta de jerarquización de las actividades en relación a la gestión de RSU. Poca profesionalización de las actividades de los gestores de residuos sólidos, tanto técnicos como económicos”.
- Composición de los residuos en Gráfico 1.

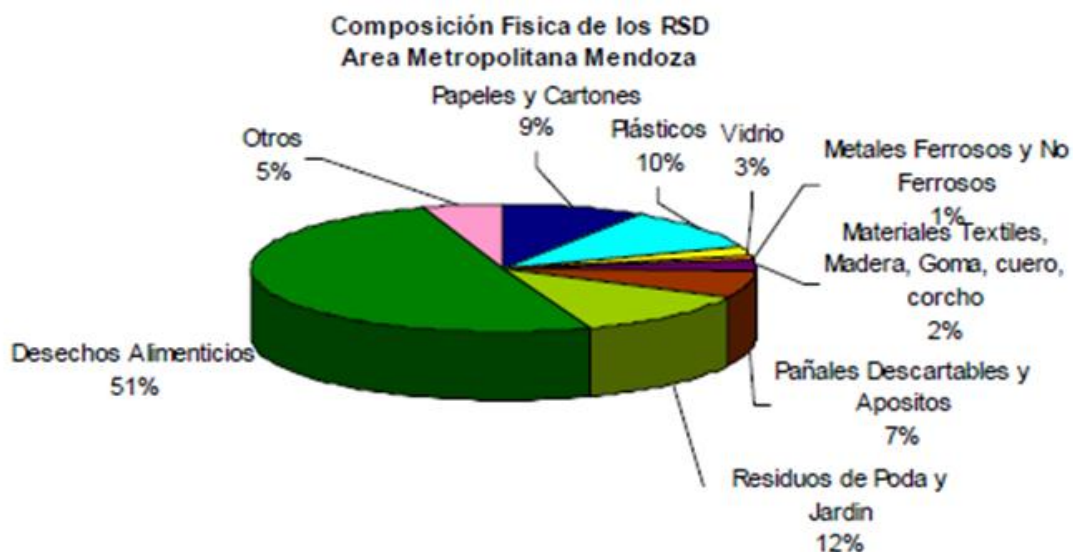


Gráfico 1: Composición de los residuos domiciliarios del Área Metropolitana de Mendoza (Fuente: Plan de Gestión de RSU para los Municipios del Área Metropolitana Mendoza - UTN Facultad Regional Mendoza, 2006)

- El mayor problema observado es la existencia de basurales a cielo abierto en todos los departamentos de la provincia.
- El sistema de recolección es ineficiente con frecuencias, coberturas y equipamientos obsoletos e inadecuados.
- Se destacan las principales recomendaciones, de acuerdo al diagnóstico efectuado en el documento:
 - Institucionales-Legales: Fortalecimiento institucional a nivel municipal y provincial para la implementación de una política de GRSU.

- Técnico-Operativas: Desarrollo de Estudios de Factibilidad y Proyectos Ejecutivos para obras de tratamiento y disposición final de RSU. Implementación de las obras.
- Económico-Financieros: Necesidad de implementación de mecanismos para que la GRSU sea sustentable en términos técnicos, socioambientales y económico-financieros.

A fines de diciembre de 2016 se firmó el proyecto GEF – PROBiogás, “Modelos de negocios sostenibles para la producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos orgánicos”. Este proyecto fue llevado adelante entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

El objetivo es demostrar que las plantas y los sistemas de generación y aprovechamiento de biogás que generan los residuos sólidos urbanos orgánicos, como son los rellenos sanitarios y los biodigestores, son sostenibles desde el punto de vista técnico, ambiental, institucional y económico financiero, de manera que se puedan incorporar a los proyectos de gestión integral de residuos sólidos urbanos (RSU) que se implementan y puedan ser operados adecuadamente por los municipios.⁵

Es en este marco contextual, que la propuesta técnica desarrollada en este documento toma especial relevancia.

3. CAPÍTULO 3: Marco teórico

3.1. Biogás

La descomposición anaeróbica (en ausencia total de oxígeno y nitratos) de la materia orgánica produce un gas combustible, por su elevado contenido de metano, denominado biogás. Lo anteriormente mencionado es un proceso natural que se

⁵ <http://ambiente.gob.ar/gestion-integral-de-residuos/programa-probiogas/> (junio de 2017)

manifiesta en cualquier sitio en donde se puedan dar las condiciones necesarias para que esto ocurra; ejemplo de esto son los pantanos, los estómagos de los rumiantes, cualquier cuerpo de agua estancado con carga orgánica y profundidad suficiente para limitar el ingreso vertical del oxígeno, etc.

El biogás es producido por un consorcio microbiano anaeróbico que degrada la materia orgánica en cuatro pasos: hidrólisis, acidificación, producción de ácido acético y producción de metano. El producto de ese proceso de digestión, biogás crudo, consiste en una mezcla de 50-70% metano, 25-50% CO₂ y 2-8% de otros gases tales como nitrógeno, oxígeno y trazas (Ej.: SH₂, NH₃ e H₂).

La concentración de metano en la atmósfera, ha sufrido en el último siglo, un incremento importante y sostenido (aproximadamente 1% por año), gran parte del cual tiene su origen en actividades humanas. En 1978 su concentración era de aproximadamente 1520 ppb, y en 1990, 1710 ppb, lo que muestra un aumento de alrededor del 16% en ese lapso.

La industria agrícola-ganadera, con su necesaria expansión, genera y libera este gas originado en la descomposición de la biomasa remanente y en el aumento de las poblaciones de ganado (rumiantes). Las industrias extractivas de carbón, petróleo y gas actúan como fuentes de liberación de metano a la atmósfera.

Sus propiedades físicas y químicas y su presencia en la atmósfera, lo incluyen dentro del grupo de *Gases de Efecto Invernadero (GEI)*, ocupando el tercer lugar de magnitud, detrás del dióxido de carbono y de los CFC, y contribuyendo en un 15 % al calentamiento global. Se ha observado, además, que el metano deteriora la capacidad autolimpiante de la atmósfera.⁶ Es necesario mencionar que el metano posee un potencial de efecto invernadero que es 21 veces mayor al del CO₂.

Las instalaciones especialmente diseñadas para optimizar el proceso de biodegradación de la materia orgánica, con captación y aprovechamiento del consecuente biogás generado, se designan como “digestores de metano”, “biodigestores” o “plantas de biogás”. El proceso tecnológico se conoce comúnmente como “metanización”.

Luego de un simple proceso de secado y desulfurizado, este biogás puede ser transformado en calor y electricidad en una unidad de cogeneración, o ser directamente quemado para producir calor; considerando que el poder calorífico del biogás es directamente proporcional a su contenido de metano⁷. Otra opción es someterlo también a un proceso de *upgrading* a biometano, donde se puede conseguir

⁶ <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Metano.htm>

⁷ Se considera que el metano puro tiene un PCI de 37,78 MJ/Nm³.

un producto final con un alto contenido en CH₄ (aproximadamente del 98 %); con lo cual se obtiene un gas con propiedades similares a la del gas natural. Ambos, biogás y biometano, son combustibles renovables que pueden ser almacenados, utilizados in situ o distribuidos mediante redes de transporte; esto los constituye en un recurso importante, en el marco del abastecimiento energético firme y sustentable.

3.2. Historia de la biodigestión anaeróbica

Este tipo de fermentación, anaeróbica con producción de metano, no es más que un tipo de fermentación catalizada por bacterias específicas y de la cual se tienen primeras noticias a través del científico italiano Volta (1776), quien descubrió la formación de un gas combustible sobre pantanos, lagos y aguas estancadas, y que relacionó con la cantidad de materia orgánica depositada en su fondo. No fue hasta 1868 en que se definió las reacciones como constituyentes de un proceso microbiológico.

En 1890 Donald Cameron diseñó una gran fosa séptica para la ciudad de Exeter, en Gran Bretaña, y con el gas obtenido alimentó la red de alumbrado público. Durante la Segunda Guerra Mundial, muchos granjeros de Inglaterra, Francia, e incluso Alemania, construyeron digestores para producir gas combustible y con él alimentar tractores y producir electricidad. Estas instalaciones cayeron en desuso a finales de los años 1950.

La primera instalación de la que se tienen noticias se construyó en Bombay, en 1859, y desde entonces en la India se ha promovido la construcción de pequeñas plantas, a escala familiar o local, tratando estiércol de ganado vacuno con el objetivo de producir gas para cocinar y obtener, a su vez, un producto fertilizante. A este nivel se encuentran multitud de pequeñas instalaciones también en Taiwan, Corea, Tailandia, Kenya, Sudáfrica y China, donde se han contabilizado miles de digestores en comunas y fábricas. Estas instalaciones suelen ser de carácter sencillo, sin tratamiento del gas producido.

3.3. Microbiología y ambiente microbiano

Cuatro diferentes grupos tróficos son reconocidos en el proceso anaeróbico (Figura 2). La actividad coordinada de estos asegura la estabilidad del sistema.

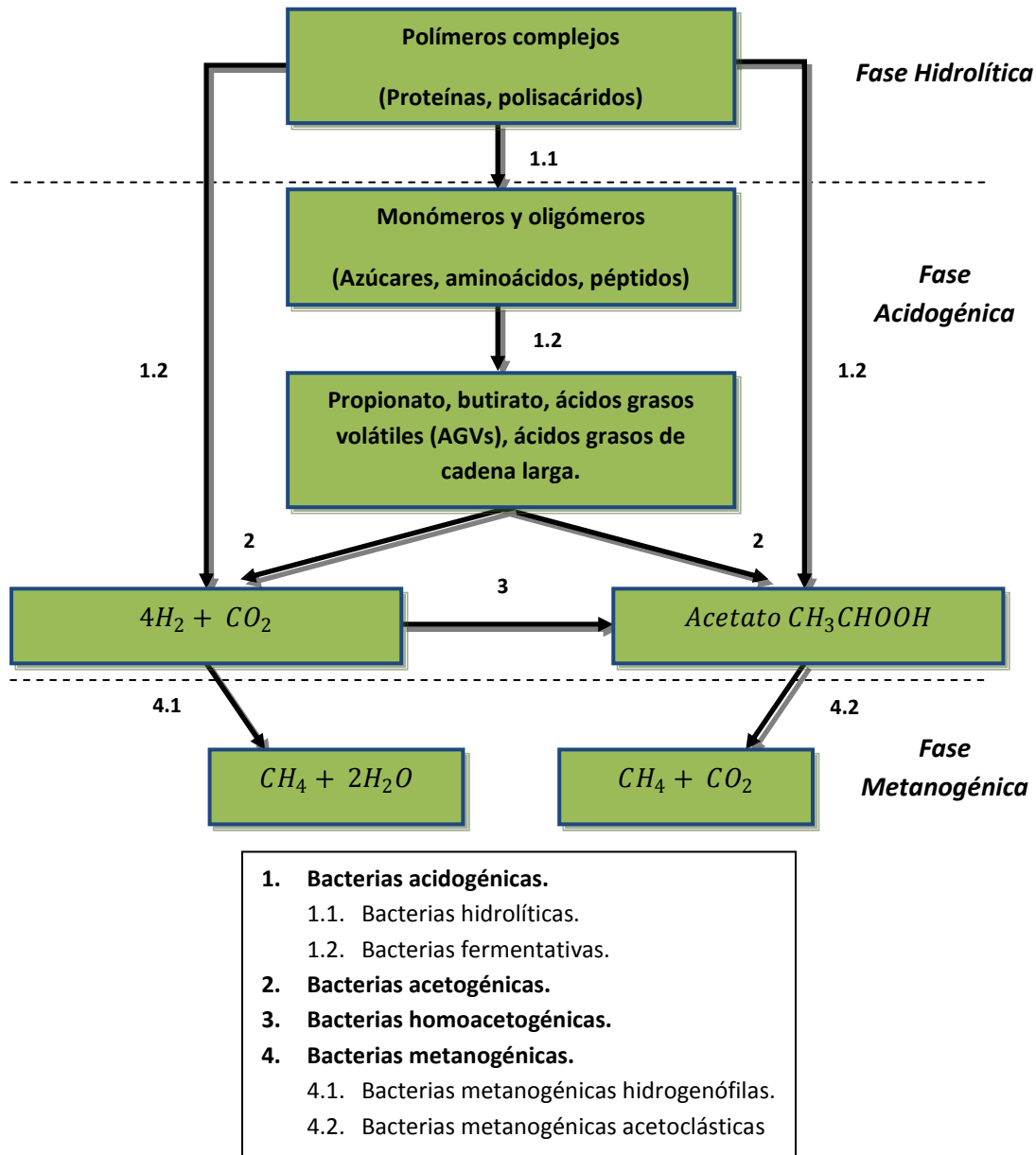


Figura 2: Fases de la fermentación anaeróbica y grupos tróficos involucrados. (Adaptado de Wellinger y col., 2013)

3.3.1. Bacterias acidogénicas

Este grupo está conformado por bacterias hidrolíticas y fermentativas. Las primeras rompen los polímeros orgánicos en monómeros y obtiene compuestos solubles partiendo de materiales particulados, y las segundas, obtienen un amplio rango de productos de fermentación a partir de los monómeros disponibles. Los productos finales de la etapa acidogénica incluyen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono;

aunque la mayoría son ácidos grasos volátiles de larga cadena, como propionato, butirato y alcoholes.

3.3.2. Bacterias acetogénicas

Las bacterias acetogénicas, protón-reductoras obligadas (OPR), son únicas debido a que se comportan como sintróficas obligadas; esto quiere decir que deben actuar en conjunto con bacterias de otro grupo trófico para poder digerir un sustrato. Su energía se deriva del mismo sustrato si la presión parcial de hidrógeno del medio es sostenida en un nivel muy bajo. Dicho hidrógeno es un producto de su propio metabolismo y resulta tóxico para ellas, por lo que necesitan la acción sintrófica de especies consumidoras de H_2 . Su rol es crucial para todo el proceso, ya que convierten los productos intermedios de la fermentación (AGVs) en sustratos metanogénicos: H_2 , CO_2 , ácido acético y compuestos monocarbonados.

3.3.3. Bacterias homoacetogénicas

Estas bacterias, acetogénicas consumidoras de H_2 , aparecen como competidoras de las metanogénicas por el acceso al mismo. El resultado de esto es el mantenimiento bajo de la presión parcial de H_2 y el incremento significativo del acetato como un precursor inmediato del metano.

3.3.4. Bacterias metanogénicas

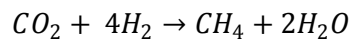
Si bien se ha referido a este grupo como “*bacterias metanogénicas*”, es necesario hacer la salvedad de que estos microorganismos en realidad pertenecen al dominio Archae; en el cual también encontramos a las *archaeobacterias* halofílicas extremas, las termo-acidofílicas y las termófilas extremas.

Las metanogénicas, como se mencionó anteriormente, se clasifican dentro del dominio Archae debido a que poseen características únicas que no se encuentran en las Eubacterias (“bacterias verdaderas”); entre las que se encuentran: 1) pared celular no rígida y membrana lipídica única, 2) degradan sustratos orgánicos con producción de metano residual, y 3) presencia de coenzimas específicas. La pared celular carece de ácido murámico y la membrana celular no posee un éter-lípido como su principal constituyente. Las coenzimas específicas son la coenzima M y las coenzimas niqueladas F_{420} y F_{430} . La coenzima M es empleada en la reducción del dióxido de carbono a metano, y las coenzimas niqueladas se constituyen como importantes carriers de hidrógeno.

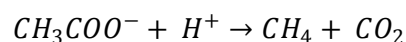
Como su nombre lo indica, todas las metanogénicas producen metano; lo que las diferencia de cualquier otro organismo. Las metanogénicas obtienen energía mediante

la reducción de compuestos simples o sustratos como dióxido de carbono y acetato. Algunas metanogénicas son capaces también de fijar nitrógeno molecular. Su crecimiento es en forma de consorcio microbiano, toleran altas concentraciones de sales y son anaeróbicas obligadas. (Gerardi, 2003)

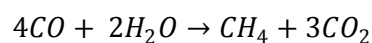
Este grupo está conformado a su vez por archaeobacterias metanogénicas hidrogenófilas y por archaeobacterias metanogénicas acetoclásticas. Las hidrogenófilas utilizan el H₂ que producen las acetogénicas OPR con una gran eficiencia producto de su alta afinidad (al nivel de ppm); lo que asegura el mantenimiento bajo de la presión parcial de H₂ en el medio. La relación entre las acetogénicas OPR y las metanogénicas hidrogenófilas son un excelente ejemplo de mutualismo sintrófico.



Sólo dos especies, de los géneros Methanosarcina y Methanotrix pueden producir metano a partir del ácido acético, estas son las llamadas acetoclásticas. Aproximadamente el 70 % del CH₄ producido proviene de estas. El dióxido de carbono, producto de la "partición" del acetato, puede ser empleado luego por las hidrogenófilas; como se explicó anteriormente.

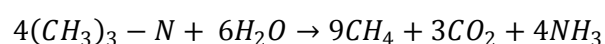
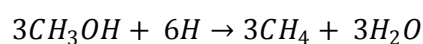


Algunas acetoclásticas emplean también al monóxido de carbono en la producción de metano.



Es usual encontrar en la literatura que las bacterias metanogénicas poseen un tiempo largo de duplicación, lo que no es del todo cierto: las metanogénicas hidrogenófilas son muy eficientes y poseen una relativamente alta tasa de reproducción. Lo que sucede es que las metanogénicas acetoclásticas, quienes son las más productivas en término de generación de metano, son relativamente ineficientes en el aprovechamiento del acetato, resultando en un prolongado tiempo de duplicación.

Un grupo que no se mencionó anteriormente es el de las metanogénicas metilotróficas, las cuales crecen en sustratos que contienen grupos metilo (-CH₃), produciendo metano directamente de ellos y no desde el dióxido de carbono o el hidrógeno. Ejemplos de estos sustratos incluyen al metanol (CH₃OH) y las metilaminas [(CH₃)₃-N]. (Gerardi, 2003)



3.3.5. Estequiometría de la interacción bacteriana

A continuación se ejemplifica la interacción bacteriana en el caso de la oxidación completa de un compuesto simple como el etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) a CO_2 , con la consecuente obtención de CH_4 , producto de la acción de tres especies distintas (Tabla 1)

Tabla 1: Estequiometría e interacción bacteriana en el caso de la degradación del etanol. (Fuente: Wellinger et al, 2013)

Especies	Reacciones	ΔG [kJ/reacción]
Especie 2	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} = \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+ 5,95
Especie 4.1	$2\text{H}_2 + 0,5\text{CO}_2 = 0,5\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-65,45
Especie 4.2	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ = \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-28,35
Resultado conjunto	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} = 1,5\text{CH}_4 + 0,5\text{CO}_2$	-87,85

- Especie 2: Bacterias acetogénicas OPR. La energía libre de reacción es negativa. Para que esta ocurra la presión parcial de hidrógeno debe ser baja. Esto se explica por el principio de Le Chatelier, desplazando el equilibrio de la reacción hacia el lado de los productos.
- Especie 4.1: Archaeobacterias metanogénicas hidrogenófilas. En este caso la energía libre es relativamente elevada (en dirección negativa), indicando la afinidad de este grupo bacteriano por el H_2 .
- Especie 4.2: Archaeobacterias metanogénicas acetoclásticas. La energía libre de la reacción, en este caso, es menos negativa debido a la baja afinidad de dichas bacterias por el acetato.

En la degradación teórica del etanol, puede observarse que 2/3 del metano proviene del acetato y 1/3 del H_2 .

La reacción resultante demuestra no solo que la descomposición anaeróbica del etanol es posible, sino además que la variación de la energía libre es lo suficientemente elevada como para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano.

3.4. Parámetros ambientales y operacionales del proceso

3.4.1. Efecto Reductor

Como su nombre lo dice, la biodigestión anaeróbica tiene lugar en ausencia de oxígeno molecular, cambiando el ambiente de un estado oxidante a uno reductor. En términos químicos, esto significa que para lograr el crecimiento microbiano debe encontrarse un aceptor de electrones alternativo al O_2 . Usualmente los átomos de carbono, asociados

a compuestos orgánicos, pueden volverse aceptores de electrones, reduciéndose en pos de la oxidación de otros a CO_2 y ácidos volátiles. Los productos resultantes de estas reacciones redox siguen conteniendo una gran cantidad de energía en forma de CH_4 . Es por lo anterior mencionado, que para que pueda sostenerse el crecimiento celular microbiano, una gran cantidad de sustrato debe ser procesado.

La producción bacteriana es mucho menor a la que se manifestaría en un medio aerobio. Esto puede ejemplificarse con el caso de la degradación de glucosa: 450 kg de masa seca microbiana puede ser obtenida por tonelada de DQO convertida, en condiciones aeróbicas; esto en comparación a los 45 kg de masa seca microbiana por tonelada de DQO convertida, en condiciones anaeróbicas (Wellinger et al, 2013).

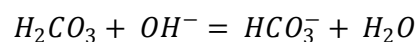
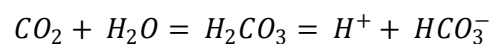
Cantidades mínimas como 0,1 mg/L de oxígeno disuelto pueden inhibir el crecimiento de las bacterias metanogénicas. La metanogénesis no solo puede verse inhibida por el O_2 , sino que la presencia de otros compuestos altamente oxidantes, como los nitritos, nitratos y sulfatos, pueden producir este efecto también. Las bacterias metanogénicas requieren potenciales redox inferiores a -300 mV (Castells, 2005).

3.4.2. Ácidos grasos volátiles y bicarbonatos

El control de pH en anaerobiosis se produce por el sistema carbonato ácido/básico. Si la concentración de ácidos volátiles aumenta, la alcalinidad del bicarbonato actuará neutralizando los mismos.

En los procesos anaerobios, los dos principales factores que afectan el pH son el ácido carbónico y los AGV. El pH y la capacidad tampón en un sistema anaerobio son completamente dependientes del equilibrio entre el gas carbónico (CO_2) y el ion bicarbonato que regula la concentración del ion hidrógeno.

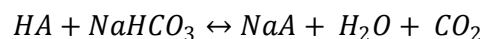
El dióxido de carbono, formado en anaerobiosis, escapa en parte a la fase gaseosa, pero otra queda presente o solubilizado en la fase acuosa. Este CO_2 en solución, reacciona con los aniones hidroxilos, para formar iones bicarbonato.



El crecimiento de las bacterias metanogénicas es inhibido a un valor de pH inferior a 6,6; mientras que las bacterias acidogénicas continuarán actuando, hasta alcanzar valores de 4,5 – 5. Esto resulta en una rápida acumulación de AGVs. Un indicador útil de falla en el proceso es la acumulación de acetato, seguida por el propionato.

Cuando las condiciones ambientales en el interior del sistema de tratamiento son favorables, las bacterias metanogénicas utilizan los ácidos intermediarios tan pronto como son formados, evitando su acumulación y garantizando que la alcalinidad natural del medio y el pH permanezcan en un rango favorable para las mismas. Si las condiciones son desfavorables, los AGV no serán consumidos a la misma tasa en que son producidos por las bacterias acidogénicas, ocasionando su acumulación en el sistema. Los ácidos libres que no logran neutralizarse ocasionan una rápida disminución de la alcalinidad disponible con el consecuente descenso del pH.

La inestabilidad del proceso puede estar relacionada con una sobrecarga orgánica, presencia de agentes inhibidores o tóxicos en el agua residual o variación de la temperatura. En cualquier caso, ocurre que la producción de los ácidos orgánicos en el reactor se hace superior al consumo de los mismos y en consecuencia, aumenta en el sistema la concentración de ácidos volátiles y disminuye la de bicarbonatos, que se descomponen en CO₂, con la respectiva formación de sales de ácidos volátiles como lo muestra la Ecuación 8, donde HA representa un ácido genérico que se disocia en H⁺ y A⁻.



Los AGVs son tóxicos para la metanogénesis solamente en la forma no ionizada. A un pH dado, existe un equilibrio entre las formas ionizadas (A⁻ + H⁺) y las no ionizadas (AH). A los valores de pH generalmente deseados en el tratamiento anaeróbico (entre 7 y 7,5), los ácidos orgánicos están mayoritariamente (> 99 %) en la forma ionizada (no tóxica). Cuando el pH disminuye, los AGVs están menos disociados (tóxicos). A un pH de 5, los AGVs están disociados en un 50 % aprox.

Durante cierto tiempo, las sustancias que ejercen un poder tampón impiden la caída del pH. Solamente cuando toda la alcalinidad del medio no es suficiente para la neutralización de los ácidos volátiles, ocurrirá la caída del pH. Por lo tanto, este parámetro se manifiesta muy tarde para poder corregir las fallas del proceso. Por ello, es importante evaluar simultáneamente los parámetros de pH, alcalinidad y ácidos grasos volátiles. (Pérez y Torres, 2008)

A bajas temperaturas, acorde a la ley de Henry, más CO₂ permanece en fase acuosa, promoviendo la formación de más iones bicarbonato, incrementando a su vez la capacidad buffer del sistema. Esto explica que la capacidad buffer sea mayor en los sistemas que funcionan a temperaturas mesofílicas, en lugar de los termofílicos.

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) desarrolló el análisis de FOS/TAC a partir de un test de valoración

(Método Nordmann) con el fin de determinar el cociente de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación.

FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/l. TAC significa Totales Anorganisches Carbonat, esto es, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina), y se mide en mg CaCO₃/l.⁸

La relación FOS/TAC está reconocida desde hace tiempo como valor guía para evaluar los procesos de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas del proceso, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente.

En la práctica, una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 es normal, aunque cada planta tiene su propio valor óptimo, el cual sólo puede determinarse mediante una observación a largo plazo y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato.

El punto en el que la planta opera más eficientemente, es decir, en el que la producción de gas es máxima y no existe peligro de que el proceso se colapse, solamente puede determinarse probando diversas posibilidades.

A los fines prácticos se puede tomar de referencia los valores expuestos en la Tabla 2, al igual que las recomendaciones de operación para cada caso.

Tabla 2: Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC (valores empíricos proporcionados por DEULA-Nienburg). (Fuente: Informe técnico de HACH LANGE)

Valor de la relación FOS/TAC	Antecedentes	Medida
> 0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la adición de biomasa
0,5 – 0,6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0,4 – 0,5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0,3 – 0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0,2 – 0,3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
< 0,2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa

Es por lo anteriormente mencionado, que el conocimiento de valores absolutos de alcalinidad o de concentración de ácidos, por separado, no aportan información adecuada para el correcto control del proceso.

⁸ Ver ANEXO: “Informe práctico. Análisis de Laboratorio Valoración FOS/TAC”.

3.4.3. Nutrientes, elementos traza e inhibición

En el medio a digerir debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. La composición de la biomasa microbiana anaeróbica puede ser estimada como 50 % C, 20 % O, 10 % H, 11 % N, 2 % P y 1 % S (Wellinger et al, 2013).

3.4.3.1. Macronutrientes

La relación C/N del sustrato debe estar comprendida entre 15:1 y 45:1, con un valor recomendable de 30:1. Valores muy inferiores disminuyen la velocidad de reacción. Para el fósforo la relación óptima es 150:1 (C/P) (Castells, 2005).

En general se asume que la mayoría de los sustratos para biogás contienen la suficiente cantidad de N y P disponible. La limitación por macronutrientes suele ocurrir solo en casos de monodigestión, donde solo un tipo de sustrato es usado.

3.4.3.2. Micronutrientes

Los elementos traza esenciales son Ni, Co, Mo, Fe, Se y Wo en el caso de las bacterias metanogénicas; y Zn, Cu y Mn para bacterias hidrolíticas. Al igual que con los macronutrientes, una limitación causada por micronutrientes es mucho más probable en los sistemas de monodigestión.

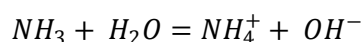
Es importante tener en cuenta que la sola presencia de estos micronutrientes, nada dice sobre la biodisponibilidad de los mismos. Por ejemplo, puede producirse una precipitación de los elementos traza a causa de la presencia de sulfuro de hidrógeno y de esa manera no estar disponibles para ser utilizados por los microorganismos.

3.4.3.3. Inhibición y toxicidad

Inhibición significa un decrecimiento o una cesación del crecimiento, mientras que la toxicidad de un compuesto provoca la muerte de los microorganismos.

Las formas no ionizadas de los ácidos grasos volátiles, así como el amoníaco libre o el ácido sulfhídrico son inhibidores de importancia de las bacterias metanogénicas. Estos compuestos presentan una inhibición de tipo reversible. Los metales pesados también son inhibidores o tóxicos a altas concentraciones.

Cuando los microorganismos degradan la proteína, generan al mismo tiempo una liberación de amoníaco al medio. Este amoníaco reacciona con agua para producir iones hidróxido.



En la práctica, sustratos con alto contenido de nitrógeno generan problemas de estabilidad en plantas de biogás. El amoníaco libre es el componente inhibitorio de estos sustratos ricos en nitrógeno. Las concentraciones de este compuesto, a partir de donde se considera un inhibidor, no se encuentran bien definidas. Esto se debe a la elevada capacidad de adaptación de la flora microbiana a las distintas concentraciones de amoníaco, y al hecho de que dicha concentración depende del pH y de la temperatura.

En líneas generales se habla de que, concentraciones de amoníaco libre en el rango de 1500 – 3000 mg/L, a niveles de pH superiores a 7,4 se considera tóxico; mientras que una concentración mayor a los 3000 mg/L se considera tóxico a cualquier nivel de pH (Wellinger et al, 2013).

El sulfuro de hidrógeno es producido por la degradación anaeróbica de los compuestos sulfurados orgánicos. Al igual que el amoníaco, la forma acuosa libre es conocida por su capacidad inhibitoria. Algunos estudios indican que una inhibición del 50 % se presenta en concentraciones de 60 – 240 mg H₂S/L. En la práctica, la experiencia muestra que el H₂S puede volverse problemático a concentraciones mucho más bajas, especialmente cuando se manifiesta el efecto sinérgico del amoníaco o de la baja concentración de hierro.

En cuanto a los iones metálicos, livianos y pesados, al igual que en todos los organismos biológicos, a bajas concentraciones resultan ser esenciales para el desarrollo microbiano, pero a medias y altas concentraciones resultan tóxicos. En algunos casos, una elevada concentración de estos iones es tolerada debido a la formación de precipitados no solubles al reaccionar con el sulfuro o el carbonato.

Obviamente la gran mayoría de los detergentes y compuestos químicos biocidas, se consideran inhibitorios y tóxicos, por lo que debe evitarse su incorporación a través del sustrato de alimentación del biodigestor.

3.4.4.Molienda

Esta etapa del proceso tiene la finalidad de incrementar la superficie específica del sustrato, y por lo tanto su bio-accesibilidad.

Existe un buen número de investigaciones donde se intenta evaluar el efecto de la molienda en relación a la producción de biogás. Menind y Novak (2010) encontraron, por ejemplo, un incremento en la generación de alrededor del 10 %, al pasar de una granulometría de 20-30 mm a otra de 0,5 mm. En este contexto, resulta fundamental la evaluación de la retribución energética lograda, a través del biogás, por unidad de incremento de la demanda energética, a causa de la molienda.

3.4.5. Temperatura

El proceso de biodigestión anaeróbica puede realizarse a tres rangos diferentes de temperatura:

- Psicrófilo: por debajo de los 20 °C.
- Mesófilo: entre los 30 y 40 °C.
- Termófilo: entre los 50 y 60 °C.

Con el aumento del rango de temperatura se produce un aumento en la tasa de hidrólisis, en la velocidad de crecimiento bacteriano y consecuentemente en la velocidad de producción de biogás. Lo anteriormente mencionado se manifiesta en una mayor capacidad de tratamiento de materiales, por unidad de tiempo, con lo cual se requiere de un menor Tiempo de Retención Hidráulico para el sistema, posibilitando así la construcción de digestores de menores dimensiones y por lo tanto bajando el nivel de inversión. También disminuye la viscosidad, lo que permite un menor consumo energético en el bombeo y en la agitación. Trabajando en el rango termófilo se asegura además la destrucción de patógenos, la eliminación de malas hierbas y de huevos y larvas de insectos, por lo cual presenta interés para el tratamiento de residuos que luego han de ser aplicados a suelos y cultivos, que requieran un cierto grado de higienización.

A pesar de las grandes ventajas de los sistemas termófilos, estos requieren de mayor control y seguimiento, debido a que a altas temperaturas el nitrógeno amoniacal se comporta como inhibidor, por Ley de Henry la capacidad buffer del sistema es menor y a que las reacciones en general se suceden con una mayor velocidad; posibilitando las condiciones para que el sistema derive a estados no deseados. Además hay que considerar que los sistemas termófilos tienen una mayor demanda energética térmica, sobretodo en época invernal, para lograr el mantenimiento de la temperatura de los reactores.

Independientemente del rango de temperatura en que se trabaje, es recomendable que no se manifiesten fluctuaciones de temperaturas mayores a 3 °C ya que esto tiene un efecto perturbador sobre la comunidad microbiana presente.

3.4.6. Agitación/mezclado

Las razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión son las siguientes:

- Lograr una correcta homogeneización del sustrato de alimentación con el que se encuentra en digestión.

- Alcanzar una distribución uniforme del calor, manteniendo las condiciones correctas de isoterma.
- Evitar la formación de espumas, sombreros de suspensión y sedimentación.
- Favorecer la transferencia controlada de gases, que podrían quedar atrapados en la estructura del sustrato.

La energía necesaria para cubrir la demanda de agitación varía en función del volumen, la forma del digestor y las características del sustrato en cuestión. Se encuentran valores comprendidos entre los 10 y 100 Wh/m³*día, pero usualmente se recomiendan valores superiores a los 30 Wh/m³*día (Castells, 2005).

Dicha agitación puede efectuarse de manera mecánica o neumática, pero en ningún caso ha de ser violenta; ya que esto podría destruir los flóculos o agregados bacterianos, necesarios para mantener un proceso estable.

3.4.7. Desulfurización del biogás generado

El SH₂ es formado por bacterias que tienen la habilidad de reducir el sulfato presente en el digestor. Estas bacterias compiten con las formadoras de metano por el mismo sustrato, empleando a los compuestos azufrados como aceptores de electrones en el proceso de oxidación de la materia orgánica. El SH₂ es un gas combustible, pero su presencia en motores o quemadores trae consecuencias negativas por los efectos corrosivos de su propia solución y de sus derivados oxidados, sin contar con la emisión de compuestos contaminantes atmosféricos (lluvia ácida). La presencia de SH₂ en motores de combustión interna produce también la necesidad de mayor recambio de aceite a causa de la acidificación del mismo.

Es fundamental tener en cuenta que el SH₂ es un gas incoloro, de olor característico a huevo podrido (dentro del umbral de concentración que permite su detección organoléptica), densidad de 1,46 kg/m³, soluble en agua y altamente tóxico; que trae aparejado serios riesgos para la salud (Tabla 3).

Tabla 3: Efectos fisiológicos humanos de distintas concentraciones de SH₂ en el aire.

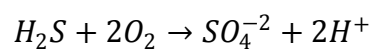
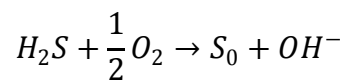
Concentración de SH ₂ en el aire [mg/m ³]	Efecto
0,15	Umbral de detección de olor.
12	Límite de tolerancia.
100	Olor desagradable.
100 – 200	Irritación de ojos y mucosas de las vías respiratorias.
300 – 425	Encima de esta concentración no es más percibido por el olfato. Causa dolores de cabeza y vértigo.

425 – 700	Cólicos, sudoración excesiva, falta de aire, perturbación del sentido de orientación.
1010	Concentración letal en 1 hora (DL50)
Por encima de 1200	Muerte instantánea.

Con respecto a las condiciones para el aprovechamiento del biogás, el SH₂ debe ser removido o al menos reducido a menos de 1000 ppmv (0,1 % en volumen) para prevenir corrosión en calderas o hasta 100 – 500 mg/Nm³ (0,01 – 0,05 % en volumen) para prevenir daños en la unidad de CHP y otros equipos (ej.: intercambiadores de calor y sistemas catalíticos). Para una operación libre de problemas, el SH₂ residual en el biogás tratado debería ser inferior a 20 mg/Nm³. (Wellinger y col., 2013)

3.4.7.1. Desulfurización biológica

Se produce por la inyección de aire (oxígeno) dentro del digestor, con cual el SH₂ reacciona y se oxida biológicamente a azufre elemental y a dióxido de azufre. Esta oxidación es catalizada por bacterias sulfoxidantes presentes normalmente en el digestor.



Suelen montarse estructuras dentro del mismo reactor, en la zona de atmósfera superior inmediata, para facilitar el soporte y crecimiento de las bacterias.

Debe tenerse en cuenta las siguientes consideraciones importantes:

- Este es el método más sencillo y económico de desulfurización.
- Los depósitos de azufre elemental en el reactor pueden aumentar las posibilidades de corrosión. Cada tanto se requiere de la apertura y limpieza de la estructura de soporte bacterial.
- El azufre elemental será eliminado conjuntamente con el digestato.
- Un exceso de oxígeno puede producir alteraciones en el proceso de metanización.
- El caudal de aire necesario para efectuar este proceso es del 2 – 8 % del caudal de biogás generado.
- Se alcanza una reducción del 80 – 90 %, pero en la mayoría de las aplicaciones es necesario complementar el tratamiento con un filtro de pulido final.
- Las trazas de O₂ y N₂ remanentes pueden ser un problema en el caso de que se opte por realizar un proceso posterior de upgrading a biometano.

- Una sobredosis de aire puede llevar a la formación de atmósfera explosiva, por lo que el proceso debe ser automatizado y cuidadosamente monitoreado.

El mismo fundamento empleado para la desulfurización interna (dentro del reactor) puede ser empleado de forma externa, mediante un dispositivo montado entre el filtro de material particulado y el deshidratador.

Los sistemas externos consisten generalmente en una columna rellena con un material de soporte inorgánico, con gran superficie de contacto, donde las bacterias pueden crecer y oxidar el SH₂ transportado por el biogás que pasa a través de ella. Una fase líquida debe ser continuamente inyectada a contra corriente para lograr el correcto suministro de nutrientes al biofilm y además poder controlar las condiciones de temperatura y pH óptimos del sistema. Este filtro debe ser limpiado periódicamente.

3.4.7.2. Desulfurización físico-química

Consiste fundamentalmente en el proceso de absorción del SH₂ en un líquido, manipulando las condiciones para un nivel óptimo de solubilidad del mismo. El agua es el solvente más utilizado generalmente, pero en nuestro caso se requiere de la utilización de una solución de NaOH, FeCl₂ y Fe(OH)₃ o peróxido de hidrógeno (H₂O₂), y del manejo de temperaturas para lograr buenos resultados. Conocido es el principio por el cual la solubilidad de un gas aumenta con la reducción de la temperatura del sistema solución-gas (Figura 3).

Valores de la constante de Henry para CH₄, CO₂ y H₂S

T (°C)	CH ₄			H ₂ S			CO ₂		
	K _H (mg/L.atm)	K _H (atm/fracción molar)	K _H C _{gás} / C _{aq}	K _H (mg/L.atm)	K _H (atm/fracción molar)	K _H C _{gás} / C _{aq}	K _H (mg/L.atm)	K _H (atm/fracción molar)	K _H C _{gás} / C _{aq}
0	41,1	21.636	17,38	6619,7	285	0,23	3371,7	725	0,58
5	35,5	25.020	19,73	5737,2	329	0,26	2794,6	875	0,69
10	31,2	28.528	22,10	5012,0	377	0,29	2347,3	1.041	0,81
15	27,7	32.105	24,44	4411,6	428	0,33	1996,4	1.224	0,93
20	24,9	35.695	26,71	3911,0	483	0,36	1718,0	1.423	1,06
25	22,7	39.243	28,87	3490,8	541	0,40	1494,9	1.635	1,20
30	20,8	42.694	30,89	3135,9	602	0,44	1314,4	1.860	1,35
35	19,3	45.999	32,74	2834,4	666	0,47	1167,0	2.095	1,49
40	18,1	49.114	34,40	2577,0	733	0,51	1045,8	2.337	1,64
45	17,1	52.002	35,85	2355,9	802	0,55	945,3	2.586	1,78
50	16,3	54.632	37,08	2165,3	872	0,59	861,6	2.837	1,93
55	15,6	56.980	38,09	2000,2	944	0,63	791,4	3.089	2,06
60	15,1	59.029	38,87	1856,6	1.017	0,67	732,3	3.338	2,20
65	14,6	60.770	39,42	1731,3	1.091	0,71	682,3	3.583	2,32
70	14,3	62.199	39,76	1621,6	1.165	0,74	639,9	3.820	2,44
75	14,0	63.317	39,89	1525,2	1.238	0,78	603,9	4.048	2,55
80	13,9	64.132	39,83	1440,4	1.311	0,81	573,3	4.264	2,65

Fuente: Adaptado de Coker (2006).

Figura 3: Valor de la constante de Henry para distintos gases presentes en el biogás, en función de la temperatura.

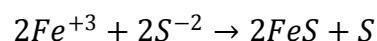
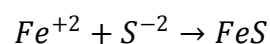
La fase líquida luego puede ser regenerada con ayuda de inyección de aire y el aumento de temperatura.

El SH₂ puede ser removido también por adsorción, empleando un lecho de material sólido con una gran área superficial. El sulfuro de hidrógeno es retenido en la superficie interna del adsorbente por fuerzas de Van der Waals, en tanto que el gas purificado pasa a través de él. La eficiencia del proceso está relacionada con la naturaleza del adsorbente, su área superficial, la presión y temperatura del flujo gaseoso. La matriz usualmente empleada es de carbón activado u otro sólido con alta porosidad (zeolitas, sílica-gel, alumina, etc.). Luego de un determinado tiempo de uso el material se satura y requiere de su regeneración/reposición. La eficiencia de la remoción puede ser incrementada utilizando carbones activados aditivados, con el consecuente aumento de costos.

Estos filtros de carbón activado no son aconsejables para altas concentraciones de SH₂, ya que se saturarían rápidamente. Se emplean usualmente como filtros de “pulido final”, donde se busca extraer parte de las trazas finales de contaminantes del biogás antes de ingresar en el sistema de aprovechamiento.

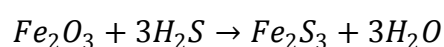
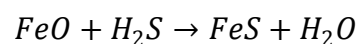
3.4.7.3. Desulfurización química

Consiste en la adición de iones de hierro (Fe²⁺, Fe³⁺) en el interior del digestor, en la forma de FeCl₂, FeCl₃, FeSO₄, Fe(OH)₂ ó Fe(OH)₃. Estos productos reaccionan con el ion sulfuro presente en el digestor, formando sólidos insolubles. Dichos sólidos insolubles luego dejan el digestor en forma conjunta con el digestato.

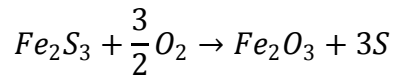
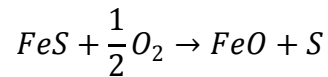


El sulfuro de hidrógeno puede ser removido también por este mismo principio fuera del digestor, en reacción con óxidos de hierro. El proceso opera en dos columnas, permitiendo la regeneración del óxido mediante su exposición al O₂. Este proceso de regeneración es altamente exotérmico.

Purificación:



Regeneración:



La reacción de regeneración es altamente exotérmica, por lo que debe tenerse especial cuidado en la operación para evitar accidentes por auto-ignición. Esta regeneración no es capaz de eliminar el azufre elemental, por lo cual el número de ciclos de regeneración es limitado y el material debe ser sustituido. El óxido de hierro es un subproducto industrial, cuya presentación suele ser generalmente en pellets o esponja. La condensación del agua debe ser evitada en este proceso, ya que quita rendimiento al proceso.

3.5. Caracterización del sustrato de alimentación para la producción de biogás

El diseño de cualquier sistema de tratamiento de residuos orgánicos mediante tecnología de metanización, requiere de una adecuada caracterización del material de alimentación, además de conocer cuál es su tasa de generación y su variación estacional. Para lo anteriormente mencionado es válido el criterio de medir mejor que calcular y calcular mejor que estimar (medir>calcular>estimar).

Al tratarse de un material especial como lo es el FORSU_D es necesario conocer adicionalmente características generales del sistema de recolección del residuo (si está diferenciado o no, saber cuál es el porcentaje de impropios estadísticamente obtenido, días de recolección, tipo de transporte a planta, volúmenes o cantidades medias transportadas/vehículo, etc.). Con respecto de su caracterización, deberá tenerse en cuenta, de forma adicional, su nivel de heterogeneidad (y la variación estacional de ésta), al igual que la comprobación de contenido de impropios. Se entiende como "impropios" a la porción de materiales no pertenecientes a la categoría de FORSU_D pero que se encuentran igualmente en el volumen de material, producto de desviaciones del sistema de separación en origen implementado o del sistema de clasificación de residuos en planta (posterior a su generación y recolección). Es importante tenerlos en cuenta ya que la tecnología en cuestión se supone que no constituye la opción adecuada para su valorización/tratamiento, sino además que puede en el mejor de los casos comportarse de forma neutral (disminuyendo aún por ello, el rendimiento del tratamiento) o incluso comportarse en menor o mayor medida en detrimento de la durabilidad mecánica de los equipos o incrementando el riesgo de inhibición del proceso.

La caracterización del material consiste básicamente en la determinación analítica de parámetros físico-químicos y su potencial para la generación de biogás.

Los parámetros físico-químicos son: granulometría del material, densidad aparente, pH de la solución acuosa, contenido de humedad, cenizas, sólidos volátiles (SV), materias volátiles (MV; empleado en la estimación del potencial máximo de generación de biogás), valor nutricional (como otra alternativa para la estimación del potencial de generación de biogás), viscosidad del material molido (útil para el cálculo hidráulico del sistema de carga del digestor mediante bombeo), demanda química de oxígeno (DQO; empleada también para la determinación del potencial de generación de biogás, especialmente para sustratos líquidos o de bajo contenido de sólidos) y nitrógeno total Kjeldahl (para conocer la relación C/N del sustrato y además tener un indicio del riesgo de inhibición por NH_3 (aq)).

Recordando el criterio de “medir>calcular>estimar” es de gran utilidad, para el desarrollo de la fase de ingeniería de detalle y factibilidad, el poder trabajar con datos de potencial de generación de biogás obtenidos a partir del desarrollo de ensayos de *biodigestión anaeróbica práctica* (bap; también conocidos como *test de potencial bioquímico de metano* – BMP-), ya sea en batch o en semi-continuo. Las bondades de estos ensayos es que permiten obtener datos relacionados con la degradabilidad del sustrato, generar las curvas de producción de biogás, determinar el TRH, la óptima relación de acides/alcalinidad y el riesgo de inhibición. Los contras se relacionan con la dificultad de acceso a laboratorios equipados y calificados, con la larga duración de los ensayos y con el alto costo de los mismos. Además se debe considerar que la heterogeneidad de este tipo de material puede dificultar la obtención de datos representativos del sistema real.

Al nivel de detalle que se requiere para la fase de diseño básico de ingeniería y de estudio de pre-factibilidad, es suficiente con realizar un cálculo del potencial máximo de generación, partiendo de datos del análisis último o elemental (contenido de humedad, cenizas; C, H, O, N y S, en base seca), o logrando una estimación a partir de valores del análisis próximo o inmediato (humedad, cenizas, MV, SV), para luego afectarlo con un coeficiente de degradabilidad aceptable; incluso podría trabajarse solo con valores de productividad de biogás extraídos de tabla, para sustratos conocidos.

Según Wellinger y col (2013), existe también un listado de ensayos adicionales, aplicables al proceso tecnológico en cuestión, pero que no suelen emplearse generalmente en la fase de caracterización del sustrato, salvo excepciones relacionadas con características especiales del mismo. Es aquí donde también se pone en juego el criterio del profesional encargado de desarrollar el proyecto:

- Análisis de elementos traza
- Contenido de sulfuro (toma mayor importancia su determinación si se sabe que el contenido de nitrógeno es elevado, ya que tiene efecto inhibidor sinérgico)
- Contenido de fósforo
- Carbono Orgánico Total
- Test de fermentación continua (ensayo de BMP en sistema continuo o semi-continuo)

En el ANEXO: *Resumen de métodos para la caracterización analítica de sustratos para biogás* se puede encontrar la referencia a las normas aplicables para poder llevar a cabo un correcto procedimiento de caracterización, incluyendo al procedimiento de muestreo propiamente dicho y al desarrollo de los ensayos de biodigestión anaeróbica práctica.

3.6. Tipos de sistemas de biodigestión anaeróbica aplicables al FORSU_D

Debido a que los sistemas de metanización se desarrollaron inicialmente para el tratamiento de efluentes líquidos y así operar como proceso húmedo, numerosas variantes técnicas y operativas han debido introducirse con intención de que la metanización se convierta en un proceso aplicable a residuos y a efluentes con características diferentes, obteniendo también una mayor eficiencia en el tratamiento.

El tratamiento de FORSU_D, en particular, introdujo condicionantes antes no experimentados con otros residuos o efluentes, fundamentalmente en función de sus particularidades (heterogeneidad, contenido de sólidos, alto contenido de materiales impropios, etc.), lo que resultó en el desarrollo y evolución de una línea tecnológica enfocada exclusivamente en este tipo de material. (PROBIOGÁS, 2015)

Según Austermann y col. (2007), las tecnologías de metanización de RSU pueden ser diferenciadas en relación con algunas características básicas de proceso:

- Rango de temperatura de proceso: mesófilo o termófilo.
- El sistema de operación, fundamentalmente referido al proceso de alimentación/descarga de sustrato; pudiendo constituirse en un proceso continuo, semi-continuo o uno discontinuo (batch).
- Contenido de sólidos totales (ST); operando entonces en vía húmeda, seca o extra-seca.
- Según la digestión se produzca en una o más etapas.

La Figura 4 muestra lo anteriormente mencionado.

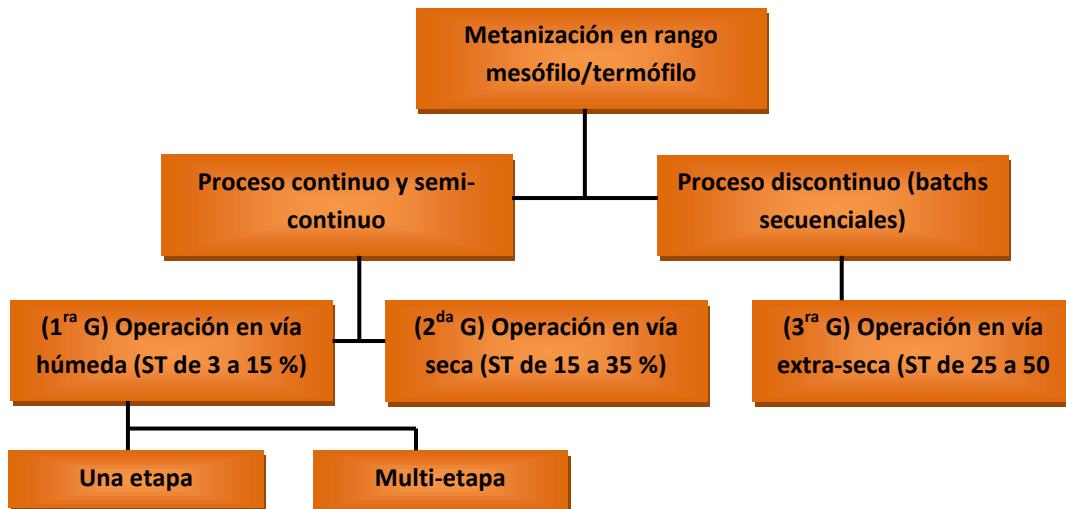


Figura 4: Características básicas de proceso de diferentes tecnologías de metanización. (Adaptado de PROBIOGAS, 2015)

En los reactores de una sola etapa, toda la secuencia bioquímica del proceso de digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) se produce de manera simultánea en un solo tanque de reacción, del tipo mezcla completa. Sin embargo, debido a que las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios en el medio ambiente y a que poseen necesidades metabólicas específicas, así como una tasa de crecimiento menor que las otras, los reactores deben ser administrados con el fin de proporcionar las condiciones óptimas para este grupo de microorganismos. Debido a la tasa de crecimiento más rápida de otros microorganismos implicados en el proceso y a la alta productividad que pueden alcanzar, derivando en una posible inhibición ácida del sistema; con el fin de optimizar cada paso del proceso de metanización se han desarrollado sistemas que operan en la modalidad que se conoce como etapas múltiples o multi-etapa (Austermann et al., 2007).

Los sistemas de etapas múltiples, por lo general están constituidos por dos reactores: el primer tanque de reacción se encuentra optimizando la etapa de hidrólisis, la acidogénica y la acetogénica; el segundo reactor, optimiza la etapa metanogénica. Debido a la posibilidad de un control más preciso en las diversas fases del proceso biológico, los reactores de etapas múltiples tienden a tener una mejora en la productividad de biogás y un mejor rendimiento del proceso de digestión anaerobia en su conjunto. (PROBIOGAS, 2015)

Conjuntamente con estas ventajas, debe tenerse en consideración que la operación de dos o más reactores en serie constituye en una mayor complejidad de mantenimiento de las condiciones óptimas en todos ellos. Esta operación más compleja implica mayores costos de inversión, con la necesidad de incorporar equipo adicional (bombas, reactores, etc.) y la demanda de un área más grande para la instalación de la unidad.

Un punto crítico es en relación a la interdependencia de los reactores, debido a que un fallo en uno de ellos puede conducir a la desestabilización de todo el sistema de metanización (Austermann et al., 2007). Los procesos de múltiples etapas son particularmente interesantes para el tratamiento de los residuos con un alto contenido de fibras de celulosa u otros compuestos de difícil degradabilidad (Vandevivere et al., 2002). En la actualidad, la mayoría de los sistemas continuos y semi-continuos utilizan tecnologías de una sola etapa.

En líneas generales, el contenido de sólidos (ST), expresado en fracción másica del total del sustrato en fresco, es el parámetro que termina definiendo el tipo de configuración o de tecnología de biodigestión a emplear para su tratamiento. En líneas generales se puede decir que un sustrato con un contenido de ST entre 2 – 15 % es factible de tratar en un sistema de reactor de mezcla completa, y para otro con un contenido de sólidos de entre 15 – 50 % debe optarse por una configuración de reactor seco, de régimen semi-continuo o batch. Esta última configuración es la que nos interesa, ya que el rango de ST es característico de una amplia variedad de residuos biomásicos (de importancia en volumen, con demanda real de soluciones de disposición sostenibles y de factibilidad aparente); tales como los descartes de frigoríficos y empacadoras de frutas, residuos orgánicos de mercados de concentración de frutas y hortalizas, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), etc.

Haciendo un repaso dentro del tipo de tecnologías para biodigestión, nos encontramos con las llamadas de 1^{ra} generación, 2^{da} generación y 3^{ra} generación. Las de 1^{ra} generación consisten en el empleo de un reactor o un sistema de reactores semi-continuos de mezcla completa, donde se corrige el contenido de sólidos del material de alimentación con una dilución inicial y posteriormente con la recuperación y recirculación de una fracción de la fase líquida del digestato. Las de 2^{da} generación están representadas por tecnologías patentadas de reactores semi-continuos de flujo pistón, tales como Kompogas, Dranco y Valorga, entre otros; capaces de tratar sustratos con mayor contenido de sólidos.

A continuación se puede apreciar, de forma resumida en la Tabla 4, las características sobresalientes de cada una de las tecnologías de 2^{da} generación mencionadas.

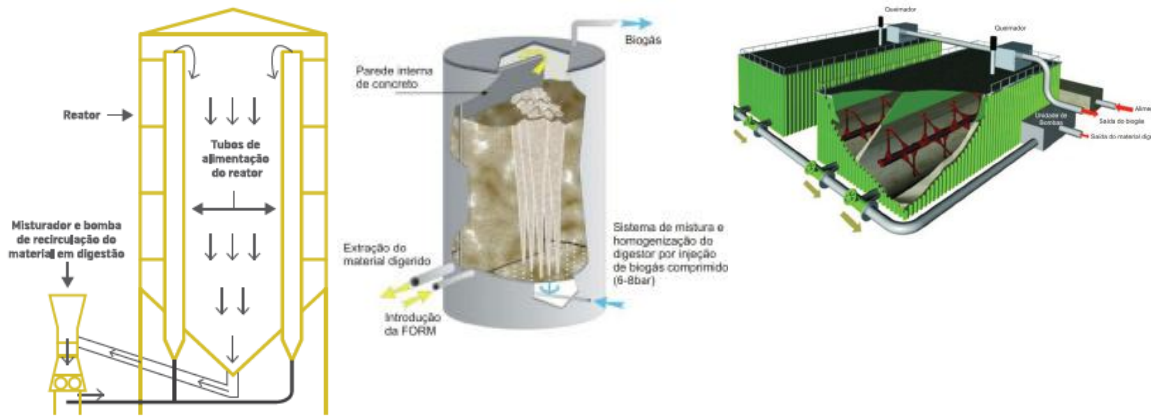
Tabla 4: Resumen de las tecnologías de metanización de segunda generación: Dranco, Valorga y Kompogas.
 (Fuente: elaboración propia. Esquemas extraídos de PROBIOGAS, 2015)

Dranco	Valorga	Kompogas
Tecnología propiedad de la empresa belga Organic Waste Systems (OWS), fundada en 1988, con su primer reactor a escala industrial construido en	Tecnología desarrollada y patentada en Francia, recientemente adquirida por la empresa española Urbaser. La planta industrial de Tilburg, Holanda, data del año 1991.	Tecnología propiedad del Grupo AXPO, de Suiza; con licencia de uso en distintas partes del mundo, incluso en Latinoamérica. Primer reactor industrial construido en Suiza en el año 1994.

1992, en Bélgica.	Proceso de digestión anaeróbica seca, mayoritariamente operado en franja mesófila, de una etapa, flujo pistón y alimentación semi-continua.	Proceso de digestión anaeróbica seca, termófila, de una etapa, flujo pistón y alimentación semi-continua.
Proceso de digestión anaeróbica seca, termófila, de una etapa, flujo pistón y alimentación semi-continua.	Reactor construido de hormigón armado o acero, de disposición vertical, formato cilíndrico y fondo cónico (diseño similar a un silo).	Reactor de disposición horizontal y formato rectangular, de fondo cilíndrico, construido en hormigón armado o acero.
Reactor construido de hormigón armado o acero, de disposición vertical, formato cilíndrico y fondo cónico (diseño similar a un silo).	Originalmente desarrollada para el tratamiento de los residuos orgánicos y posteriormente adaptada para FORSU. Operan con un contenido de ST del orden del 20 al 30 %.	Están específicamente diseñados para trabajar con FORSU, pero pueden aceptar también materiales como residuos de poda y otros residuos de la industria agroalimenticia. El sustrato de alimentación necesita ser estabilizado por dos días previamente a su ingreso al reactor, y ajustado a un nivel de 28 % de ST, con la incorporación del líquido recuperado del digestato.
Acepta una gran variedad de residuos orgánicos, trabajando con contenidos de ST de 15 a 40 %.	Alimentación mediante bombas tipo concreto. El reactor internamente posee un tabique de 2/3 el diámetro del mismo, que separa la región de alimentación y de descarga, pero propiciando el flujo pistón.	La agitación del material, en el reactor, se realiza mediante la rotación de palas fijadas en un único eje de disposición longitudinal respecto al mismo.
Alimentación diaria mediante bombas tipo concreto. Realizada por la parte superior y propiciando el flujo descendente del material.	Sin agitación mecánica (se emplea recirculación del material, en su lugar).	La productividad ronda los 100 Nm ³ /t de residuos orgánicos en general y los 150 Nm ³ /t de residuos con alto porcentaje de restos de comida.
Sin agitación mecánica (se emplea recirculación del material, en su lugar).	TRH de 20 a 30 días.	El digestato resultante requiere ser tratado con prensas o centrífugas hasta alcanzar un contenido de ST alrededor del 50 %, por lo que requiere luego de estabilización aeróbica, secado y tratamiento de efluentes con alto contenido orgánico y de nitrógeno.
TRH de 20 a 30 días.	Productividad de biogás de 80 a 120 Nm ³ /t.	La capacidad media de las plantas es de aprox. 28000 t/año. La de mayor capacidad es de 274000 t/año, Planta de Doha en Qatar.
Productividad de biogás de 80 a 120 Nm ³ /t.	TRH de 18 a 30 días.	Según datos del año 2015, existen 74 plantas construidas con esta tecnología.
El digestato resultante posee un contenido de ST alrededor del 50 %, por lo que requiere luego de estabilización aeróbica, secado y tratamiento de efluentes con alto contenido orgánico y de nitrógeno.	Productividad de biogás de 82 a 106 Nm ³ /t FORSU. Consumiendo cerca del 25 % de la energía producida.	
El digestato resultante requiere ser tratado con prensas o centrífugas hasta alcanzar un contenido de ST alrededor del 50 %, por lo que requiere luego de estabilización aeróbica, secado y tratamiento de efluentes con alto contenido orgánico y de nitrógeno.	El digestato resultante requiere ser tratado con prensas o centrífugas hasta alcanzar un contenido de ST alrededor del 50 %, por lo que requiere luego de estabilización aeróbica, secado y tratamiento de efluentes con alto contenido orgánico y de nitrógeno.	
La capacidad media de las plantas es de aprox. 53500 t/año. La de mayor capacidad es de 180000 t/año, Planta de Alicante en España.	La capacidad media de las plantas es de aprox. 127500 t/año. La de mayor capacidad es de 497600 t/año, Planta de Fos Sur Mer en Francia.	
Según datos del año 2015, existen 31 plantas en		

distintos países, algunas en operación y otras en etapa de construcción.

Según datos del año 2015, existen 31 plantas en distintos países, algunas en operación y otras en etapa de construcción.



Los sistemas de 1^{ra} generación tienen la desventaja de requerir grandes volúmenes de reactor, por lo tanto alta inversión y alta demanda energética, para el tratamiento de cantidades considerables de materiales biomásicos, justamente por su limitación intrínseca para la alta carga de sólidos; adicionalmente tienen el problema de requerir la separación de la fase líquida del digestato y de contar con un sistema complementario para su tratamiento y posterior disposición final. Los sistemas de 2^{da} generación representan una alternativa favorable en cuanto a su capacidad para tratar materiales con alta carga de sólidos, pero presentan algunas complicaciones relacionadas con la separación de fases dentro del reactor y su consecuente dificultad para alcanzar una buena homogeneización del material, las características del material también presenta algunos desafíos a la hora de diseñar los sistemas de carga y descarga del reactor; también presenta la necesidad de bajar el contenido de humedad del digestato, estabilizar la fase sólida y tratar la líquida. Ambos sistemas tecnológicos son sensibles a la presencia de impropios en el material de alimentación, por lo que requieren de un proceso de preparación o adecuación más intensivo.

Frente a todo lo anterior mencionado, se presenta la alternativa de los sistemas de 3^{ra} generación, cuya diferenciación fundamental consiste en solucionar la problemática de contar con instalaciones complementarias de tratamiento de las fases del digestato, simplificando los sistemas de manipulación del material para la carga y descarga del reactor, y conservando la virtud de poder realizar una alimentación con alta carga de sólidos. Otra ventaja importante es que esta tecnología es la menos sensible al contenido de impropios en el material de carga. Esta tecnología se conoce también como de reactores “tipo garaje”, ya que su fisonomía se asimila a eso; aunque en

realidad su desarrollo proviene de los típicos túneles de compostaje. En realidad el sistema, como puede apreciarse en la Figura 5, consiste en una serie de reactores secos termófilos tipo batch de configuración prismática hermética y de disposición horizontal, que trabajan bajo un régimen de permite tener un tratamiento del residuo y una producción de biogás continua y estable en el tiempo. Cada reactor, de forma individual, funciona en tres ciclos: 1) Carga e inicio de proceso aeróbico de aireación forzada por flujo ascendente hasta alcanzar una temperatura de 50 °C; 2) Corte de la aireación e inicio de la fase anaeróbica termófila con recuperación y aprovechamiento del biogás generado, promoción de la interacción sustrato-microorganismos mediante un sistema de recolección de lixiviados y su aspersión por sobre la superficie de la pila; 3) Una vez agotado el proceso de tratamiento anaeróbico, se corta la recirculación de lixiviados y se vuelve a la aireación forzada con aire caliente para realizar el secado de la pila; para su posterior descarga. Como resultado de todo esto se tiene el tratamiento del material biomásico en cuestión, el aprovechamiento energético del biogás generado y la oportunidad de uso como mejorador de suelos del digestato seco y estabilizado. Una planta tipo, que emplee esta tecnología, consiste en una serie de reactores funcionando alternadamente y en paralelo (al menos cuatro), un área de depósito transitorio de sustrato de alimentación y de digestato estabilizado, el sistema de recirculado de lixiviado, un reactor de lixiviados y todo el sistema de adecuación y aprovechamiento del biogás. Es pertinente mencionar el estadio incipiente de desarrollo que posee ésta tecnología, aunque se reconoce que posee una gran potencialidad de aplicación dada sus ventajas comparativas.

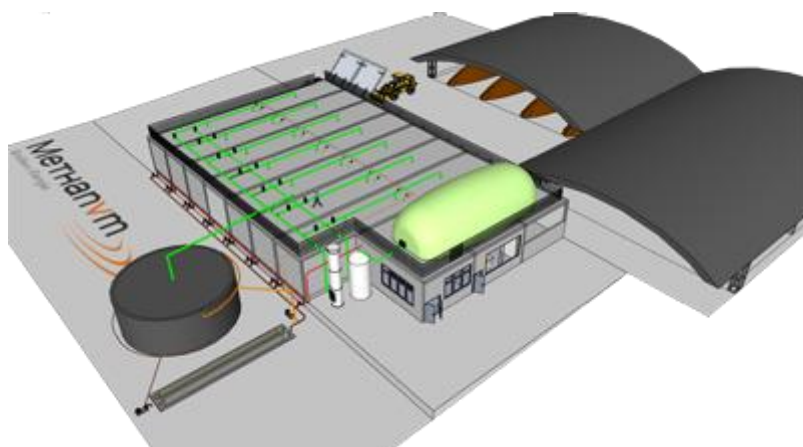


Figura 5: Esquema de la tecnología tMETHAR® (Túneles de Metanización de Residuos Orgánicos), propiedad de la empresa METHANUM. (Fuente: página web de la empresa⁹)

Existen actualmente tres tecnologías de metanización extra-seca en fase comercial en toda Europa, y una en Brasil; todas muy similares:

⁹ <http://methanum.com/pt/solucoes/tecnologiasmethanum/methar/methar-tmo.html> (Diciembre de 2016)

- **Kompoferm Plus.** Desarrollada en Alemania por la empresa Eggersmann Anlagenbau GmbH & Co. Proyectada inicialmente para el tratamiento de residuos agroindustriales y actualmente empleado para FORSU. La primera planta fue instalada en el año 2007.
- **Bekon Dry Cicle Fermenter.** Desarrollada en Alemania por la empresa Bekon Energy Technologies GmbH & Co. Proyectada también inicialmente para el tratamiento de residuos agroindustriales y actualmente empleado para FORSU. La primera planta fue instalada en el año 2007.
- **BIOferm System.** Desarrollada en Alemania por la empresa Viessmann Werke GmbH & Co. Proyectada, como todas las anteriores, inicialmente para el tratamiento de residuos agroindustriales y actualmente empleado para FORSU. La primera planta fue instalada en el año 2006.
- **tMETHAR.** Desarrollada en Brasil en una actividad de cooperación entre la empresa Methanum y la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), con apoyo financiero del Banco Nacional de Desarrollo (BNDES) de ese país. Esta tecnología ha sido específicamente proyectada para el tratamiento de la FORSU. La primera planta se encuentra en fase de construcción y pretende ser inaugurada este año 2016, para el tratamiento de residuos de la Estación de Transferencia de la Usina do Caju (Río de Janeiro).

Es necesario mencionar que estas últimas tecnologías, de 2^{da} y 3^{ra} generación, aún no se encuentran en operación en nuestro país (e incluso son contados los casos en la región), pero se prevé su desarrollo en el corto plazo; movilizado por la demanda creciente de alternativas sostenibles de tratamiento de grandes volúmenes de residuos biomásicos sólidos (industriales y domiciliarios o municipales), la necesidad de muchas empresas (medianas a grandes) de poder gestionar sus propios residuos y de adecuarse al nuevo esquema financiero y normativo generado por el aumento de tarifas de los energéticos y por la reglamentación de la ley modificatoria de fomento a la generación de energía de fuentes renovables, y al interés en esta tecnología por parte de empresas nacionales dedicadas a brindar servicios de ingeniería para el tratamiento de residuos (algunas de ellas ya trabajando con sistemas de biodigestión, pero de 1^{ra} generación y enfrentando los problemas asociados ya mencionados).

3.7. Estado del arte del tratamiento del FORSU_D, a través de la metanización, en Europa, y su perspectiva

A finales de los años 80, la incineración de vertederos y las quemadas en masa seguía siendo el método principal por el cual se eliminaba el RSU. El compostaje constituía un pequeño porcentaje del total de tratamientos y estaba en declive debido a los desafíos de mejora de la calidad a causa de la presencia de metales pesados y materiales

inertes en el producto final. El reciclaje se limitó a papel, vidrio y materiales fácilmente recuperables.

Posteriormente se fueron logrando importantes avances en todos los ámbitos de gestión de residuos, pero la introducción de la digestión anaerobia en el tratamiento de los RSU es uno de los desarrollos tecnológicos más exitosos e innovadores observados durante las dos últimas décadas en el ámbito de la gestión de residuos.

Según De Baere y Mattheeuws (2015), la digestión anaeróbica ha alcanzado la mayoría de edad en el campo del tratamiento de la fracción orgánica derivada de los residuos sólidos municipales (MSW, por sus siglas en inglés; equivalente a RSU), más que cualquier otra tecnología alternativa de tratamiento desarrollada en los últimos 20 años. Con un total de 244 plantas y una capacidad de casi 8 millones de toneladas de capacidad de tratamiento orgánico al año, la digestión anaeróbica ya se ocupa de aproximadamente el 25% del tratamiento biológico en Europa. Si se asumen 300 kg de residuos biodegradables generados por persona y por año¹⁰, esta capacidad de tratamiento representa cerca de un 5 % de los residuos biodegradables generados en toda Europa (excluidos los antiguos estados de la URSS) por sus 550 millones de habitantes. Una experiencia exitosa a largo plazo ha hecho de la digestión anaerobia la tecnología de tratamiento preferida para los compuestos orgánicos del RSU.

En el Gráfico 2 puede verse el desglose por país, de la capacidad total instalada de tratamiento de FORSU [t/año] y el valor promedio de la capacidad instalada de sus plantas (las más grandes se encuentran en Francia, con un tamaño medio de 56130 t/año, y las más chicas en Suecia, con un tamaño medio de 10000 t/año).

¹⁰ El RSU generado en EU-27 se ha establecido alrededor de los 520 kg/(persona*año), desde el año 2000. Adicionalmente se asume que la fracción orgánica representa el 60 %.

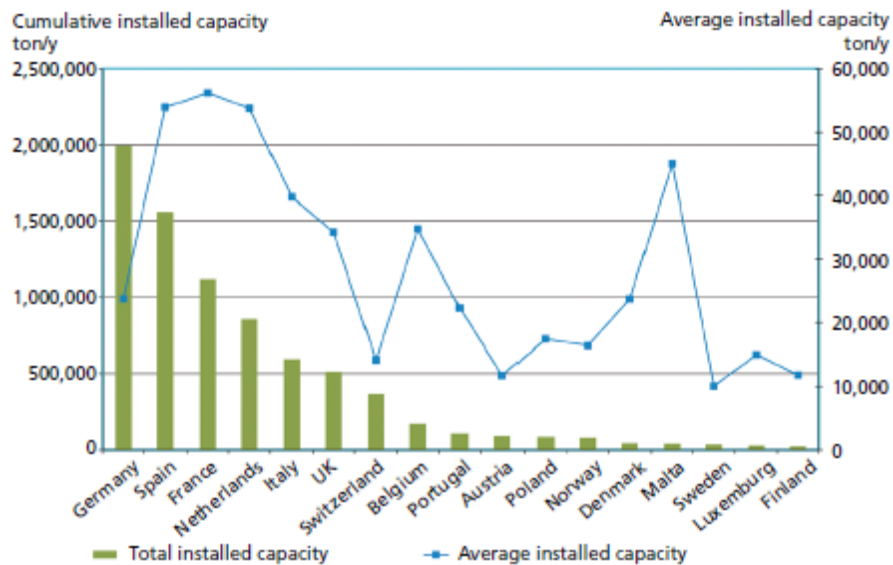


Gráfico 2: Capacidad instalada total y promedio, por país. (Fuente: De Bare y Mattheeuws, 2015)

En la Gráfico 3 puede apreciarse la capacidad de tratamiento instalada por país, de la FORSU, expresada en t/año por cada millón de habitantes, al igual que su correspondiente porcentaje respecto al potencial total (en relación a los 300 kg de FORSU/año generado por habitante).

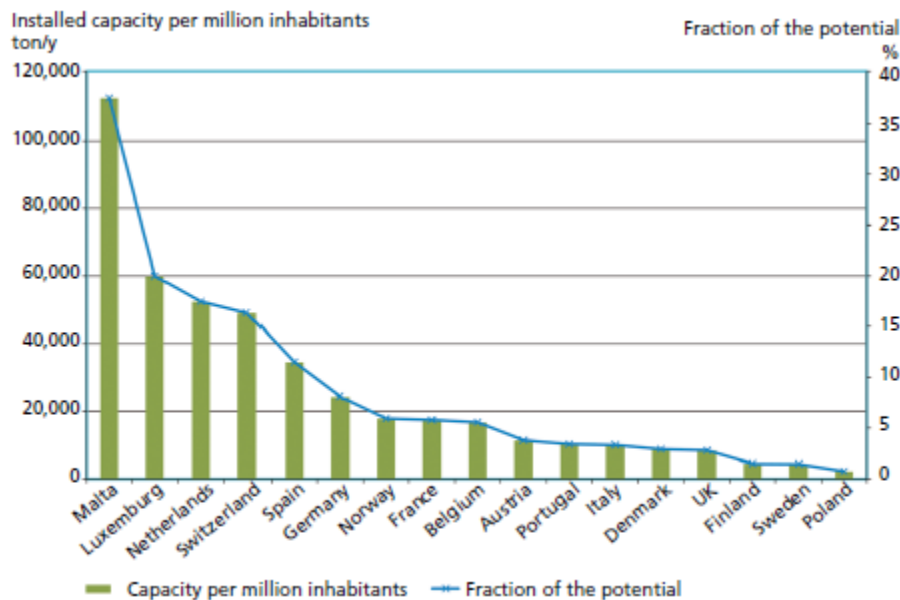


Gráfico 3: Capacidad instalada por millón de habitantes y por país. (Fuente: De Bare y Mattheeuws, 2015)

Las primeras plantas de digestión anaeróbica fueron todas construidas para el tratamiento de residuos sólidos urbanos mixtos, ya que no existía en ese momento ninguna fuente de recolección diferenciada. La implementación y rápido incremento de las acciones de separación en origen, a partir de los años 90, provocó la instalación

de un gran número de plantas de digestión anaeróbica, a pesar de que la tecnología todavía estaba en su infancia, reemplazando en gran parte a los sistemas de tecnología de compostaje que se encontraban en declive. En la actualidad ambos sistemas van de la mano y son complementarios, ya que el digestato resultante de la digestión anaeróbica luego debe ser estabilizado aeróbicamente para su uso y disposición final.

No se puede decir que la digestión anaeróbica es más barata que el compostaje aeróbico, pero ofrece los aditamentos de la oportunidad de producir energía renovable (lo que mejora significativamente el resultado de la ecuación económica), de reducir la superficie del sitio requerido para el tratamiento y de reducir significativamente también el olor emanado al medio por estas plantas de tratamiento de FORSU.

Desde sus inicios, el incremento de la capacidad de tratamiento de FORSU vía metanización, no ha sido explosiva, pero sí constante. En el Gráfico 4 puede tenerse una idea general de la tasa de incremento de esta capacidad, para el caso de los países de mayor relación *capacidad instalada por millón de habitantes*.

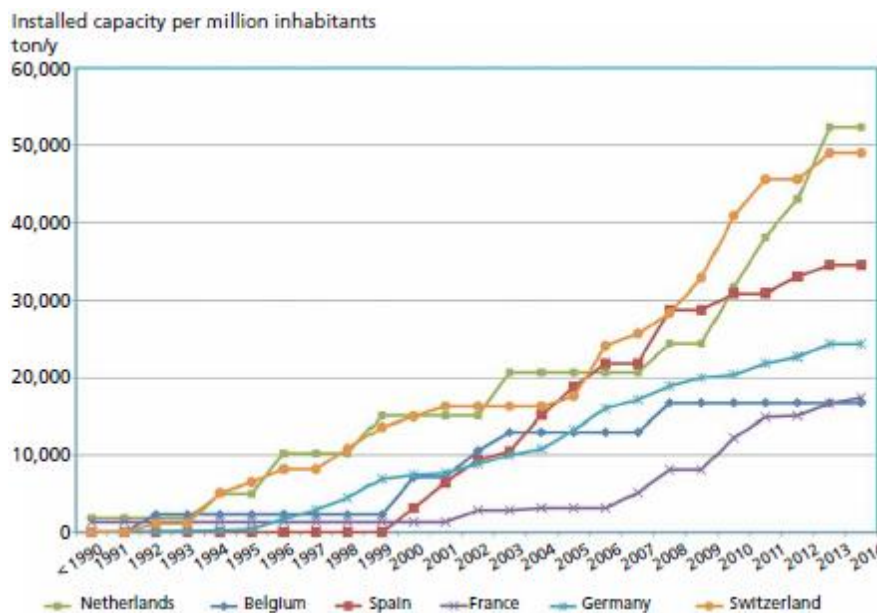


Gráfico 4: Incremento en la capacidad instalada, por millón de habitantes y por país. (Fuente: De Bare y Mattheeuws, 2015)

Los motivos principales que promovieron el desarrollo de esta tecnología en Europa pueden resumirse en los siguientes puntos:

- *Landfill Directive*, del año 1999; modificada por el Reglamento CE 1882/2003 del Parlamento y Consejo Europeo. La que limita la cantidad de RSU biodegradables con destino a relleno sanitario directo, estableciendo que los Estados miembros disminuyan gradualmente esta práctica y exigiendo una estabilización previa del

material orgánico remanente. La aplicación efectiva de esta reglamentación se ejecuta a través de Decretos o de Leyes generadas por los países miembros.

- La implementación y desarrollo de la separación en origen.
- La tarifa diferencial que posee la energía de fuentes renovables para la venta.
- 18 países de la UE con prohibición de apertura de vertederos nuevos.
- La mayoría de los pliegos de licitación pública de los países de la UE exige la digestión anaeróbica como primer paso del proceso de tratamiento de la FORSU (De Bare y Mattheeuws, 2015).

De Bare y Mattheeuws (2015), efectuaron un estudio del estado del arte de la tecnología actualmente empleada en el viejo continente, para el tratamiento de la FORSU; teniendo en cuenta los parámetros de proceso más importantes, a la hora de diferenciar los distintos sistemas de metanización aplicados; a saber, temperatura de operación, contenido de humedad de la carga, complejidad, fuente de sustrato y co-digestión. En la Tabla 5 se muestra un resumen de los resultados.

Tabla 5: Tipo de tecnologías de metanización en operación en el año 2014. Porcentaje instalado acumulado, en función de los parámetros más importantes de proceso. (Fuente: adaptado de De Bare y Mattheeuws, 2015)

Parámetro	Porcentaje instalado acumulado, en 2014, para cada opción	
	<i>Mesófilo</i>	<i>Termófilo</i>
Rango de Temperatura	67 %	33 %
Sustrato	<i>Solo FORSU</i>	<i>Co-digestión con materiales agroindustriales</i>
	89 %	11 %
Complejidad del sistema	<i>Una etapa</i>	<i>Multi-etapa</i>
	93 %	7 %
Contenido de humedad del sustrato de carga	<i>Seco</i>	<i>Húmedo</i>
	62 %	38 %
Fuente del FORSU	<i>Separación en origen</i>	<i>Residuos mezclados</i>
	55 %	45 %

El desarrollo de la tecnología de biodigestión extra-seca (tipo garaje, 3^{ra} generación tecnológica), representa un alternativa reciente que ofrece una solución de baja tecnología, en relación de la complejidad de los de 2^{da} generación, pero que aporta en contrapartida mayor robustez, mayor capacidad de tratamiento y la posibilidad de realizar una expansión modular de la capacidad instalada de la propia planta; por lo que se considera prometedora y de gran interés para el sector.

Dado que los sistemas de tipo garaje son de reciente implementación, existe poca información de característica censal y de evaluación de desempeño de las plantas. Sin embargo, según datos aportados por los propios proveedores de tecnología¹¹, en

¹¹ Ver apartado 3.6

Europa hay actualmente 47 plantas en operación, alimentadas con el sustrato de la FORM, residuos y restos de poda verde y residuos agrícolas; en sistemas de mono-digestión o de co-digestión. De estos, 8 tienen la tecnología Kompoferm, 18 representan la tecnología BIOFerm y 21 operan con la tecnología Bekon. (PROBIOGAS, 2015)

El tratamiento de materiales biomásicos de distinta índole, a pequeñas escalas y a escalas industriales, tiene ya larga data en países europeos y asiáticos, por lo que se considera en líneas generales como una tecnología madura; contando con una representación en nuestro continente liderada por países como EEUU y Brasil. Argentina se encuentra dando los primeros pasos en la implementación de este tipo de tecnologías, contando actualmente con alrededor de 60 plantas en todo su territorio; de envergaduras y configuraciones variadas, pero basadas fundamentalmente en tecnologías de reactores de tipo doméstico, de mezcla completa, UASBs y lagunas cubiertas (con o sin optimización¹²).

¹² Incorporación de mecanismos de agitación y calefacción, que mejoran sustancialmente la eficiencia del tratamiento y el rendimiento en la generación de biogás.

4. CAPÍTULO 4: Estudio técnico

4.1. Diseño e ingeniería conceptual de planta

El diseño de planta es un paso clave para el correcto desempeño del proyecto. Esto comprende la selección de la tecnología, el dimensionamiento y el layout de planta. El objetivo es poder lograr una instalación eficiente, que alcance las expectativas de diseño, haciendo un uso óptimo de los recursos disponibles, asegurando las condiciones adecuadas de seguridad en el trabajo y minimizando los impactos al medio.

En este caso, primero se efectúa una definición del sustrato, materia prima con la que se alimenta la planta, junto con una evaluación de su potencial, para luego realizar una descripción de los componentes del diseño; a saber: almacenamiento y tratamiento, unidad de digestión, almacenamiento de biogás, sistemas de transporte de materiales, aprovechamiento del biogás.

Para el caso en cuestión se opta por evaluar la aplicación de una tecnología de biodigestión anaeróbica de 2^{da} generación, la cual permite trabajar con un sustrato de alimentación con alta carga de sólidos y por lo tanto aumentar la capacidad de tratamiento de la planta, por unidad de superficie y por nivel de inversión, en relación a las tecnologías de 1^{ra} generación. El caso de implementación de tecnología de 3^{ra} generación no es abordado ya que se carece de información técnica referida a algunos de los parámetros de diseño y de conocimiento más profundo acerca de ciertas particularidades de la tecnología, pero se entiende que el aparente potencial para el tratamiento de la FORSU_D, junto con la solución que brinda a las dificultades técnicas correspondientes a las tecnologías anteriormente mencionadas, la posicionan actualmente como una de las alternativas con mayor potencialidad de desarrollo y crecimiento.

4.1.1. Sustrato y cálculo de potencial

Se proyecta el diseño de una planta que tenga la capacidad de tratar 30000 toneladas de FORSU_D al año. Se considera para este estudio que la planta opera, recibiendo dicha carga orgánica los 365 días del año; lo que representa entonces un ingreso de 82,19 t FORSU_D/día. En la práctica se prevé las paradas programadas de ciertos equipos, a fines de efectuar alguna tarea de inspección y mantenimiento, pero siempre se buscará evitar la parada del biodigestor; esto se debe al largo período de puesta en régimen que ocasiona un corte en el proceso de degradación biológica (alrededor de 3 meses).

Es importante aclarar que cuando hablamos de FORSU_D en este estudio, nos referimos a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de origen domiciliario, comúnmente conocidos como restos de comida o desechos alimenticios. Los RSU de nuestra región están conformados por los sólidos domiciliarios y los sólidos de higiene urbana, en una proporción respectiva de 44 % y 56 %; según datos extraídos del Resumen Ejecutivo del Proyecto “Diseño de un sistema de gestión integral de residuos sólidos urbanos para el área metropolitana de Mendoza”; y a su vez, los domiciliarios presentarían una proporción de fracción orgánica (FORSU) del 51 %, correspondiente a los restos de comida. Tomando algunos valores de generación de RSU por departamento del Área Metropolitana (extraídos del documento *Evaluación de la situación de la ENGIRSU, año 2012- Mendoza*), afectándolos por los factores anteriormente mencionados y comparando el resultado con la carga de diseño de planta, se podría catalogar a la misma como un sistema con la potencialidad para tratar un caudal másico equivalente al generado en el Departamento de Maipú, con una población de 172.332 habitantes¹³.

$$\begin{aligned} & \text{FORSU}_D \text{ del Departamento de Maipú} \\ &= 166 \frac{t \text{ RSU domiciliario}}{\text{día}} * 0,51 \frac{t \text{ FORSU}_D}{t \text{ RSU domiciliario}} = 84,66 \frac{t \text{ FORSU}_D}{\text{día}} \end{aligned}$$

Es pertinente mencionar que según los datos extraídos del reporte, el Departamento de Maipú se ubica en el quinto lugar a nivel provincial en relación a la generación diaria de RSU_D; tomando como referencia a Guaymallén, en el primer lugar con 276 t RSU_D/día, y a Capital, en el puesto octavo con 111 t RSU_D/día. Esto permite dar una idea de la magnitud del proyecto a evaluar. En la práctica, si se pretende tener el dato de generación específico de las distintas fracciones residuales, al igual que su fluctuación estacional, debe aplicarse una metodología como la propuesta por la norma IRAM 29523:2003 “Calidad ambiental – Calidad de suelo. Determinación de la composición de residuos sólidos urbanos sin tratamiento previo”. Las características de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de origen domiciliario son función de multitud de factores y varían de un municipio a otro, de una estación a otra y hasta entre barrios de una misma ciudad, por lo cual es difícil establecer unos estándares. Esto justifica la necesidad de realizar un buen trabajo de caracterización previo al diseño de un proyecto real.

Un sustrato en particular, tiene un potencial máximo de generación de metano, basado en su contenido de carbono, el cual no es posible exceder; sin importar cómo la planta haya sido diseñada u operada. Las bases para la obtención de este valor teórico fueron primeramente estudiadas por Symons y Buswell, en 1933. En la práctica, de todas formas, dicho valor teórico no puede ser alcanzado, ya que una

¹³ Valores referidos a datos censales y estadísticos, oficiales, del año 2010.

parte del carbono, sumado a la energía obtenida por la reacción catabólica, es utilizado por los mismos microorganismos para el mantenimiento de sus funciones, al igual que para el crecimiento y mantenimiento de su propia biomasa. Una proporción del carbono puede también no ser transformado debido a que podría no ser anaeróbicamente biodegradable, siendo protegido del ataque microbiano a través de su estructura química o localización física. Para salvar todo lo anterior, el potencial específico máximo de un sustrato, expresado como $\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{SV}$, puede ser determinado experimentalmente mediante un ensayo de Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Sin embargo, los resultados obtenidos a través del ensayo PBM, puede que tampoco sean verificados al escalarlo a un reactor continuo o semi-continuo, por un número de razones, a saber: en un sistema mixto como un reactor de mezcla completa, una proporción del sustrato puede baipasear el sistema; el tiempo de retención medio del digestor podría no ser suficiente para alcanzar la degradación completa del sustrato; o el balance de nutrientes y minerales podría ser insatisfactorio para el mantenimiento activo del consorcio anaeróbico. (Wellinger et al, 2013)

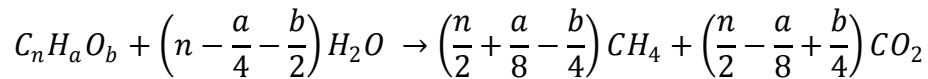
Para poder hacer un cálculo estimativo de la producción de biogás que tendría el sustrato, debe poder definírsele y caracterizarlo, en este caso se trabajará a partir de una caracterización modelo de una FORSU_D extraída de la bibliografía, para luego fijar condiciones que formarán parte de dicho cálculo.

Se define¹⁴ entonces un FORSU_D con un contenido de humedad del 70 %, donde el 95 % de los sólidos son volátiles y la degradación de estos SV es del 70 % (que es el valor objetivo mínimo para un biodigestor bien diseñado). La composición de los ST es la siguiente: C 48,3 %; H 7,6 %; O 35,8 %; N 3,3 %; Cenizas 5 %. En caso de tener dificultades para acceder a una caracterización del sustrato, mediante análisis elemental, existe también la posibilidad de estimar los valores de composición a través de la metodología que se presenta en el *ANEXO: Procedimientos de estimación de productividad teórica de biogás*.

Se toma un contenido energético bruto de 37,78 MJ por cada Nm^3 de CH_4 . A continuación se realiza el cálculo mediante dos métodos, el de Buswell y el de Dulong modificado.

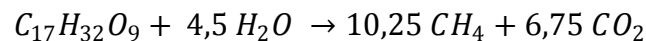
4.1.1.1. Cálculo de proporción de metano y dióxido de carbono mediante ecuación de Buswell

¹⁴ Caracterización modelo extraída de Wellinger y col., 2013; apartado 5.4.



Considerando los pesos atómicos de cada elemento, y en base a la composición porcentual de los ST, se puede obtener la siguiente descripción estequiométrica de los sólidos volátiles presentes en el sustrato modelo: $C_{17}H_{32}O_9N$.

$$\text{Si } n = 17, a = 32, b = 9 \therefore$$

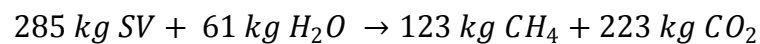


$$380 + 81 \rightarrow 164 + 297$$

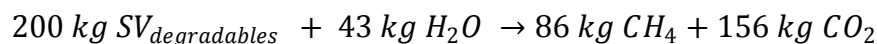
$$461 \rightarrow 461$$

Tomando las proporciones anteriores, se realiza un reemplazo en función de la cantidad de SV presentes por tonelada de sustrato.

$$\text{Humedad } 70 \% ; 95 \% \frac{SV}{ST} \therefore 300 \frac{kg ST}{t sustrato} ; 285 \frac{kg SV}{t sustrato} \therefore$$



Considerando un 70 % de degradación de los SV:



$$\text{Densidad del } CH_4, \text{ condiciones normales}^{15} = \frac{16}{22,412 \frac{Nm^3}{kg}} = 0,714 \frac{kg}{Nm^3} ;$$

$$\text{Densidad del } CO_2, \text{ condiciones normales} = \frac{44}{22,412 \frac{Nm^3}{kg}} = 1,963 \frac{kg}{Nm^3} \therefore$$

$$120 Nm^3 CH_4 + 80 Nm^3 CO_2 = 200 Nm^3 \text{ biogás } \therefore$$

¹⁵ Condiciones normales de presión y temperatura (CNPT): 0 °C (273,15 K) y 1 atm.

Proporción volumétrica de metano, en el biogás = 60 %

Proporción volumétrica de dióxido de carbono, en el biogás = 40 %

Estos cálculos nos arrojan una producción teórica esperada de 423 Nm³ CH₄/t SV_{incorporado} ó 120,5 Nm³ CH₄/t sustrato_{incorporado}, con un contenido energético bruto de 22,78 MJ/ Nm³ biogás_{generado} ó 4556,44 MJ/t sustrato_{incorporado}.

4.1.1.2. Cálculo de producción de biogás mediante ecuación de Dulong modificada (basada en la destrucción de los SV)

$$\begin{aligned} \text{Valor energético de 1 kg SV} & \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg SV}} \right] \\ & = 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 93 * S + 23,26 * N \end{aligned}$$

C, H, O, S, N; son las proporciones de estos elementos en relación a los SV, expresados en porcentajes.

C 50,8 %SV; H 8 %SV; O 37,7 %SV; N 3,5 %SV; ∴

$$\begin{aligned} \text{Valor energético de 1 kg SV} & \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg SV}} \right] \\ & = 337 * 50,8 + 1419 * \left(8 - \frac{37,7}{8} \right) + 93 * 0 + 23,26 * 3,5 \\ & = 21882,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg SV}} \cong 21,9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg SV}} \end{aligned}$$

Al considerar la proporción de SV presente en el sustrato y la degradabilidad de los mismos, se tiene entonces por este método un valor energético bruto de 4365,53 MJ/t sustrato_{incorporado}. Esto equivale a una producción teórica esperada de 405,44 Nm³ CH₄/t SV_{incorporado} ó 115,55 Nm³ CH₄/t sustrato_{incorporado}.

4.1.1.3. Producción de biogás y aprovechamiento energético

De acuerdo con los valores obtenidos por los métodos anteriormente descriptos, se opta por continuar trabajando con el menor conjunto de valores teóricos calculados:

valor energético bruto de 4365,53 MJ/t sustrato_{incorporado} y 405,44 Nm³ CH₄/t SV_{incorporado} ó 115,55 Nm³ CH₄/t sustrato_{incorporado}. Estos valores concuerdan con el rango de generación de metano de los residuos de frutas, extraídos de tabla (Figura 7), de 0,25 – 0,50 Nm³ CH₄/kg SV.

Table 2.1 Characteristics of some biogas feedstocks (* indicates methane booster)

Type of feedstock	Organic content	C:N ratio	DM ^a (%)	VS ^b % of DM	VS (%)	Methane yield (m ³ CH ₄ /kg VS)	Methane production (m ³ CH ₄ /m ³)
Animal wastes and by-products							
Pig slurry	Carbohydrates, proteins, lipids	7	5	80.0	4.0	0.30	12.0
Pig manure, solid	Carbohydrates, proteins, lipids		20	80.0	16.0	0.30	48.0
Cattle slurry	Carbohydrates, proteins, lipids	13	8	80.0	6.4	0.20	12.8
Cattle manure, solid	Carbohydrates, proteins, lipids		20	80.0	16.0	0.2	32.0
Poultry droppings	Carbohydrates, proteins, lipids	7	5	80.0	4.0	0.30	12.6
Poultry manure, solid	Carbohydrates, proteins, lipids		20	80.0	16.0	0.30	48.0
Stomach/intestine content, cattle	Carbohydrates, proteins, lipids	4	12	80	9.6	0.40	38.4
Stomach/intestinal content, pig	Carbohydrates, proteins, lipids	4	12	80	9.6	0.46	44.2
Plant wastes and by-products							
Straw	Carbohydrates, lipids	90	70-90	80-90		0.15-0.35	
Garden wastes	Carbohydrates, lipids	125	60-70	90		0.20-0.50	
Grass	Carbohydrates, lipids	18	20-25	90		0.30-55	
Fruit wastes	Carbohydrates, lipids	35	15-20	75		0.25-0.50	
Organic wastes from industries							
Whey	75-80% lactose, 20-25% protein	—	5	90	4.5	0.33	15.0
Concentrated whey	75-80% lactose, 20-25% protein	—	10	90	9.0	0.54	31.5
Flotation sludge	65-70% proteins, 30-35% lipids	—	5	80	4.0	0.54	21.6
Fermentation slop	Carbohydrates	7	1-5	90		0.35-0.78	
Whole silage (grain)			12.6	91	11.5	0.47	53.9
Thin silage (grain)			8.5	86	7.3	0.50	36.5
*Fish oil	30-50% lipids	—	90	90	81.0	0.80	648.0
*Soya oil/margarine	90% vegetable oil	—	95	90	85.5	0.80	684.0
*Alcohol	40% alcohol	—	40	95	38.0	0.40	152.0
*Bleach clay			98	40	39.2	0.8	313.6
Olive pulp		—	24	96	23	0.18	41.4
Brewers spent grains		—	20	90	18	0.33	59.4
*Glycerine							

(Continued)

Table 2.1 (Continued)

Type of feedstock	Organic content	C:N ratio	DM ^a (%)	VS ^b % of DM	VS (%)	Methane yield (m ³ CH ₄ /kg VS)	Methane production (m ³ CH ₄ /m ³)
Energy crops							
Grass silage		17	15–40	90		<0.45	
Maize silage							
Fodder beet silage							
Sewage sludge							
Waste water sludge			5	75	3.75	0.4	15.0
Conc. wastewater sludge			10	75	7.5	0.4	30.0
Food remains			10	80		0.5–0.60	

^a Dry matter.

^b Volatile solids.

Figura 6: Tabla de características típicas de diversos sustratos. (Imagen extraída de Wellinger y col., 2013)

Considerando entonces una alimentación diaria de 82,19 t y una presencia de impropios de 1,5 % (en peso)¹⁶, se tiene como resultado un ingreso diario de 80,96 t FORSU_D, con un potencial de generación de 9354,93 Nm³ CH₄/día; lo que representa un valor energético bruto de 353433,31 MJ ó 98,18 MWh.

Es pertinente mencionar que aunque los valores anteriores sean el producto teórico de cálculo, partiendo de datos secundarios de caracterización, son coherentes con los datos de productividad de las fichas técnicas que presentan otras plantas de biogás, de similares características a la propuesta, en funcionamiento en países como Alemania¹⁷ y España.

4.1.2. Diagrama simplificado de procesos

A continuación, y a modo introductorio, se presenta un diagrama simplificado de los procesos implicados en el tratamiento de la FORSU_D mediante la tecnología propuesta (Figura 8). A lo largo de este capítulo se aborda cada fase del tratamiento.

¹⁶ Valor objetivo, razonable, para un sistema de separación en origen bien planteado y gestionado.

¹⁷ Planta de biogás de Leonberg, Alemania; para el tratamiento de los residuos orgánicos municipales: http://www.uni-stuttgart.de/takag/download_TAKAG/Vergaerungsbroschuere2006_optimiert.pdf (septiembre de 2015)

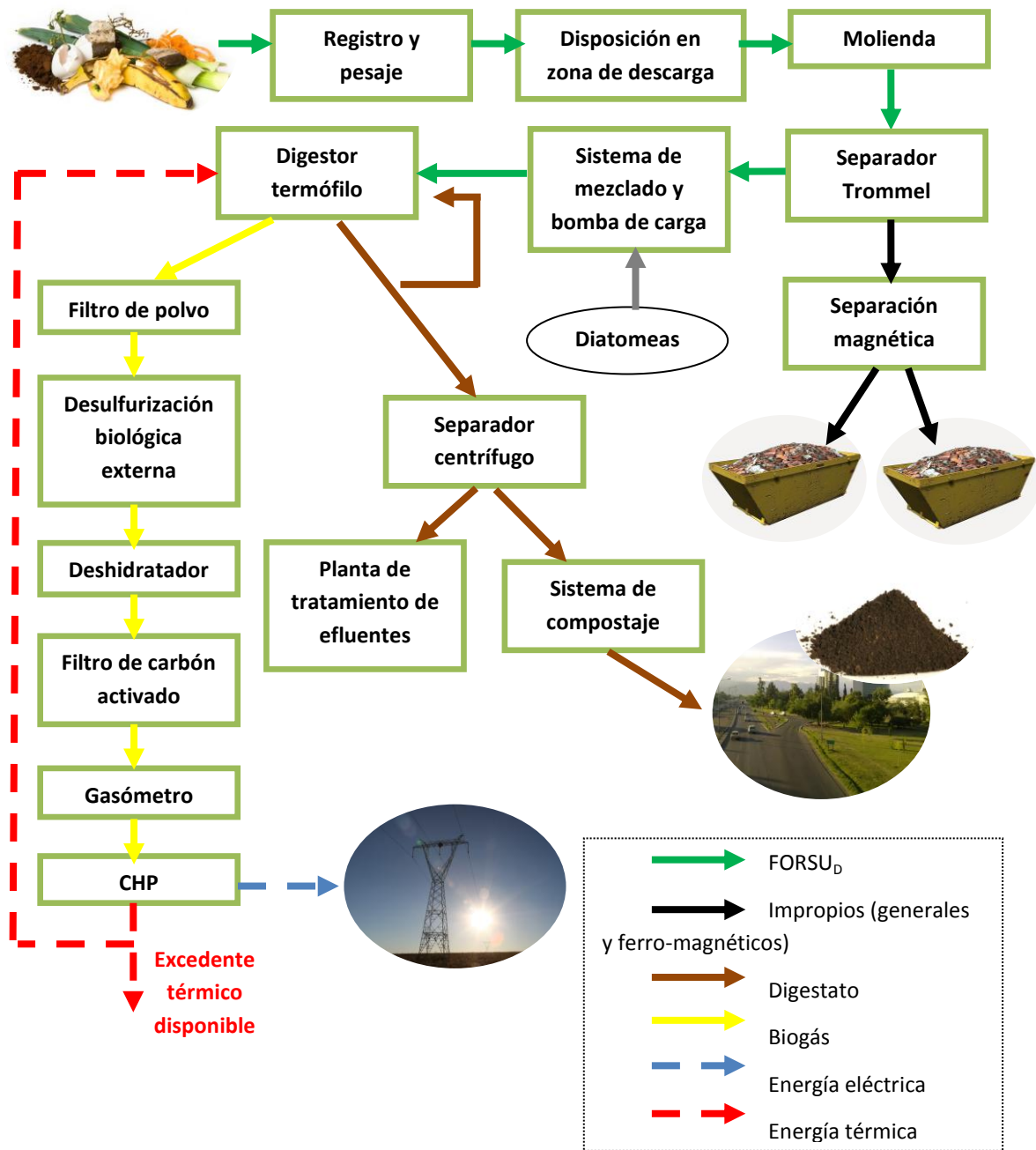


Figura 7: Diagrama simplificado del proceso de metanización propuesto para el tratamiento de la FORSU_D.

4.1.3. Almacenamiento y pre-tratamiento del sustrato

4.1.3.1. Recepción

La recepción de la FORSU_D en planta consiste en el pesaje en báscula del camión transportador, antes y después de la descarga, al igual que el registro de los datos de su recorrida, procedencia, tipo de vehículo, hora de entrada, etc.

El material es descargado en una zona techada, con piso impermeabilizado y provisto de sistema de recepción y conducción de lixiviados hacia planta de tratamiento de efluentes. El sitio de descarga tiene la capacidad de contener un volumen equivalente a dos días de generación, de manera de permitir un mínimo margen de operaciones en caso de avería del sistema de carga al reactor u otro contratiempo. No sería aconsejable realizar un mayor stock ya que el mismo sistema no permite aumentar la tasa de carga una vez restablecido el funcionamiento normal, por lo que se generaría así un excedente estable de material que traería complicaciones operativas y sanitarias.

Este sector de planta también debería contar con un sistema mecánico, con posibilidad de operación en modo automático, de traslado del material hacia la siguiente etapa del proceso.

4.1.3.2. Reducción y homogeneización de tamaño

Esta etapa consiste en un simple pre-tratamiento mecánico, el cual tiene la finalidad de incrementar la superficie específica del sustrato, y por lo tanto su bio-accesibilidad. Adicionalmente, a la promoción de la producción de biogás, genera un cambio en la viscosidad del material y reduce la formación de capa flotante.

El pre-tratamiento mecánico es uno de los pasos más costosos de los sistemas de aprovechamiento biomásico, a causa del consumo energético. Se recomienda un tamaño de partícula de 1 – 2 mm para una hidrólisis efectiva. (Kratky and Jirout, 2011)

Los equipos para la reducción de tamaño se dividen en quebrantadores, molinos, molinos de ultrafinos y máquinas de corte.

Estas máquinas realizan su trabajo en formas muy diferentes. La compresión es la acción característica de los quebrantadores. Los molinos utilizan impacto y frotación, a veces combinadas con compresión; los molinos de ultrafinos operan principalmente por frotación. El corte es, por supuesto, la acción característica de las máquinas cortadoras.

Dentro de la categoría molinos existen los de martillos, los cuales pueden tratar casi cualquier producto: sólidos fibrosos como cortezas o cuero, virutas de acero, pastas blandas y húmedas, arcilla plástica o una roca dura. Teniendo en cuenta esta versatilidad de alimentación, las características propias del material y el requerimiento granulométrico de salida; es que se opta por esta tecnología.

Según McCabe y col., tanto la capacidad como el consumo de energía de un molino de martillos varían mucho con la naturaleza de la alimentación y no se pueden estimar con confianza a partir de consideraciones teóricas, sino que es preferible obtener estos valores a partir de la información publicada, o todavía mejor a partir de ensayos a pequeña o gran escala realizados en el molino con una muestra real del material a tratar. Los molinos comerciales típicamente tratan 100 a 400 lb de sólido por caballo-hora de energía consumida (60 a 240 kg/kWh; que es lo mismo que decir que requieren entre 4,17 y 16,7 kWh/t). Otra desventaja, que se suma a la alta demanda energética, es que los molinos pueden ser dañados por piedras u otros materiales impropios, a causa de la provocación de atascos o de su alta dureza.

4.1.3.3. Separación de cuerpos extraños

El sistema de separación de cuerpos extraños consiste en un filtro Trommel, colocado en serie y aguas abajo con respecto al molino de martillos. El material que ingresa por la criba del filtro es transportado a la tolva de mezcla y carga del reactor y el descarte pasante se envía a un contenedor para su posterior disposición, previa separación magnética. Otro electroimán debe ser colocado en la línea, antes del ingreso del FORSU_D al molino de martillos.

Es necesaria la inspección visual y retiro de materiales impropios antes de la alimentación del molino de martillos, de manera de evitar el ingreso de botellas de vidrio (lo cual reduciría la calidad del digestato estabilizado, para su uso como mejorador estructural de suelos) u otros cuya envergadura pueda estropear o atascar el equipo. Es importante señalar aquí la necesidad de contar con una buena campaña de separación en origen para reducir al máximo la aparición de estos impropios entre el FORSU_D. Se considerará, para nuestro estudio, un porcentaje másico extraído como impropios del 1,5 %; lo que nos resulta en una alimentación neta, al reactor, de 80,96 t FORSU_D/día (107,94 m³/día).

4.1.4. Unidad de digestión

La unidad de digestión es el corazón de una planta de biogás, ya que es donde la actividad microbiana toma partido, degradando la materia orgánica y generando biogás consecuentemente. Ésta se compone por uno o varios digestores o reactores, el

sistema de alimentación, agitación y calefacción; los sistemas de pre-digestión y pos-digestión también se incluyen. Las posibilidades tecnológicas con variadas y dependen mayormente de las características del sustrato con que se alimenta, tales como contenido de sólidos, degradabilidad, riesgos por contaminantes o inhibidores (Tabla 6).

Tabla 6: Opciones tecnológicas para el proceso. (Adaptado de Wellinger y col., 2013)

Factor técnico	Parámetro clave	Opciones
Sistema de alimentación	Tipo de digestor y contenido de sólidos del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> Alimentación discontinua para digestores en batch. Alimentación continua o semi-continua para digestores flujo pistón o RMC. Sistema de alimentación de sólidos o líquidos, dependiendo del contenido de ST del sustrato.
Tipo de reactor	Contenido de materia seca del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> RMC para sustratos líquidos. Flujo pistón o digestores batch para sustratos sólidos.
Temperatura del reactor	Riesgo por patógenos	<ul style="list-style-type: none"> Mesófilo, cuando no existe riesgo. Termófilo, cuando hay riesgo por presencia de patógenos.
Número de fases	Composición del sustrato, riesgo de acidificación	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de una fase, cuando no hay riesgo de acidificación. Sistema de dos fases para sustratos con alto contenido de azúcares simples, almidón o proteínas.
Sistema de agitación	Contenido de materia seca del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> Agitador mecánico para alto contenido de sólidos. Sistemas de agitación mecánica, hidráulica o neumática, para bajo contenido de sólidos.

4.1.4.1. Sistema de alimentación

Los sistemas de alimentación tienen la función de efectuar el traslado del sustrato desde el sitio de almacenaje y pre-tratamiento hacia el interior del digestor, efectuando la transición de las condiciones aerobias a las anaerobias. Dicho sistema

requiere ser adaptado a las características del sustrato y del digestor, al igual que considerar procesos intermedios tales como dosificado y mezclado de inóculo.

4.1.4.2. Cálculo del caudal de carga y tubería de transporte

Como se verá más adelante, necesitamos cubrir una necesidad de bombeo diaria, para alimentación del reactor, de 756 m³/día; de los cuales 1/7 del volumen total corresponde a alimentación fresca (107,95 m³ FORSU_D = 80,96 t FORSU_D) y el otro 6/7 a material recirculado del biodigestor (digestato)¹⁸.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta para el diseño del sistema de tuberías es el de la velocidad que alcanza el fluido por el interior de las conducciones. Dicha velocidad, en el caso de la circulación isoterma de fluidos incompresibles, viene determinada por el caudal y el diámetro de la sección interna de la conducción, y para cada fluido tiene un valor máximo que no debe ser sobrepasado, ya que de lo contrario puede producirse un deterioro del producto por tratamiento mecánico inadecuado y además incrementa el valor de pérdida de carga, incrementando consecuentemente los costos de conducción. Los valores aproximados que se usan en la práctica dependen del tipo de fluido que se trate, pero los más corrientes se recogen en la Tabla 7. Los valores de la tabla son los más corrientes en la práctica ordinaria, sin embargo, en condiciones especiales, pueden requerirse velocidades que están fuera de los intervalos indicados.

Tabla 7: Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías.

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		[ft/s]	[m/s]
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5 – 1	0,15 – 0,30
	Entrada de bomba	1 – 3	0,3 – 0,9
	Salida de bomba	4 – 10	1,2 – 3
	Línea de conducción	4 – 8	1,2 – 2,4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,2 – 0,5	0,06 – 0,15
	Salida de bomba	0,5 – 2	0,15 – 0,6
Vapor de agua		30 – 50	9 – 15
Aire o gas		30 – 100	9 – 30

¹⁸ La densidad del digestato se considerará equivalente a la del FORSU_D. Esto no es estrictamente así en la realidad, ya que a causa de los procesos de degradación y consecuente liberación de agua celular la densidad se irá incrementando.

Así, para un caudal determinado del fluido a bombear, imponiendo la velocidad máxima del mismo, se determina de forma inmediata el diámetro mínimo de la conducción. Deberá escogerse, en cualquier caso, el diámetro normalizado inmediatamente superior a dicho valor mínimo. Dicho valor es lo que se conoce como el diámetro óptimo de la conducción, pues representa el menor costo posible, cumpliendo las exigencias en cuanto a la velocidad máxima de circulación del fluido por la misma.

A continuación se muestra un procedimiento de cálculo de tubería de conducción, a modo ilustrativo y con el objetivo de tener una idea somera acerca de sus dimensiones.

En nuestro caso particular, se procede considerando una velocidad máxima de conducción de 0,5 m/s; esto en relación a un valor “medio” correspondiente a un fluido viscoso.

Para esto primero se calcula el caudal volumétrico de bombeo necesario para alimentar el digestor:

$$Q_{vol.alim.} = \frac{80,96 \frac{t \text{ FORSU}_D}{\text{día}}}{0,75 \frac{t \text{ FORSU}_D}{m^3}} * 7 = 756 \frac{m^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 31,5 \frac{m^3}{h}$$

El valor “7” corresponde a la relación de alimentación DIGESTATO RECIRCULADO/FORSU_D.

Si tomamos ahora el valor de caudal calculado y lo expresamos en base a un funcionamiento continuo a lo largo del día, tenemos un caudal de 31,5 m³/h (≈0,0087 m³/s). En base a la ecuación de continuidad, teniendo en cuenta el caudal y la velocidad máxima del flujo, podemos calcular el diámetro mínimo interno de la tubería de conducción:

$$\text{Diámetro interno} \geq 149 \text{ mm}$$

Los cálculos precedentes nos llevan a optar por una tubería de conducción de acero al carbono sin costura (tubo ASTM A-53), con un diámetro exterior de 219,1 mm y una cédula de 40 (≈8,18 mm de espesor; y por lo tanto un diámetro interno de 202,74 mm) propia de una conducción convencional de agua industrial de 8”; la cual representa la alternativa con el diámetro interno normalizado inmediatamente superior al valor calculado. Ver *Anexo: Catálogo de caños y tuberías de conducción normalizadas*.

Teniendo en cuenta el valor del diámetro de tubería normalizada, se procede a

recalcular el caudal volumétrico horario:

$$Q_{vol.alim.} = A * v = \pi * \frac{D^2}{4} * v = \pi * \frac{0,20274^2}{4} * 0,5 * 3600 = 58,11 \frac{m^3}{h}$$

Al realizar una relación entre los caudales volumétricos, se visualiza la capacidad de bombear el mismo caudal másico diario, pero con una reducción de las horas de uso diarias al 54 %. Con esto último obtenemos los siguientes parámetros de bombeo definitivos:

- Diámetro interno de tubería de carga: 202,74 mm
- Q: 58,11 m³/h
- Horas de bombeo: ≈ 13 h/día

4.1.4.3. Bomba de carga del digestor

Las formas de impulsar un fluido, líquido o gas, a través de una conducción son muy variadas, aunque básicamente se pueden reducir a una de las siguientes:

- Por desplazamiento volumétrico del fluido, bien sea mecánicamente o con la ayuda de otro fluido (bombas de desplazamiento positivo, etc.)
- Por impulsión mecánica, mediante la acción de la fuerza centrífuga (turbobombas, ventiladores y turbocompresores)

Un parámetro fundamental para poder seleccionar el equipo de bombeo, es la altura manométrica total (Hm). A continuación se efectúa el cálculo.

Se carece del valor de viscosidad dinámica o cinemática del material de carga. Es por este motivo que se procede a hacer una asimilación del mismo al producto de la trituración de una hortaliza con contenido de humedad similar; valor de 50000 cps (= 50 Pa*s) de viscosidad dinámica (μ)¹⁹. Es importante hacer esta salvedad, ya que dicho valor es sensible a la hora de calcular las pérdidas de carga.

Datos:

- $\mu = 50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Longitud de tubería = 38 m; de $\varnothing 8''$ (D = 0,20274 m)
- Altura de descarga = 24 m
- $\gamma = 750 \text{ kg/m}^3$

¹⁹ Valor de viscosidad extraída de la tabla de viscosidades de la empresa ATPP (página web: http://www.fmed.uba.ar/depto/tec_dieto/t2014.pdf)

- $v = 0,5 \text{ m/s}$
- Accesorios de conducción (8"): válvula de retención, 2 codos de 45°, 1 codo de 90°
- $\text{msnm} = 704 \text{ m}$

Cálculo:

1. Número de Reynolds:

$$Re = \frac{v * D * \gamma}{\mu} = 1,521$$

2. El Re calculado nos indica que estamos tratando con un flujo laminar, por lo que el coeficiente de fricción (f) será el siguiente:

$$f = \frac{64}{Re} = 42,09$$

3. Para poder calcular las pérdidas de carga, primero debo obtener el valor de longitud equivalente (L); lo que se obtiene sumando la longitud de la tubería (38 m)²⁰ y las longitudes equivalentes a cada accesorio (válvula retención = 1 m; 2 codos de 45°, asimilables a 1 de 90° = 4 m; 1 codo de 90° = 4). Esto nos da un valor de 47 m.

Procedo ahora a calcular las pérdidas de carga por fricción (hf):

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} = 129,754 \text{ m}$$

Donde g es el valor de aceleración de la gravedad (= 9,8 m/s²).

4. Cálculo de altura representativa de la velocidad:

$$\frac{v^2}{2 * g} = 0,013 \text{ m}$$

5. Cálculo de las pérdidas de carga por altitud (0,1 m por cada 100 msnm) = 0,874 m.
6. La suma de la altura geométrica (24 m), las pérdidas por fricción, la altura representativa de la velocidad y las pérdidas por altitud, nos da la altura manométrica total (Hm) = 154,64 m.

Si afecto a Hm por la γ (750 kgf/m³), tenemos un requerimiento de presión de aproximadamente 11,60 bar. Con este dato, además del caudal necesario, se puede proceder a seleccionar el equipo de bombeo más adecuado; en función

²⁰ Representa a un sistema de conducción de una sola vía: 10 m desde la bomba + 24 m de altura (22 m altura reactor + 2 m fundación y soporte de hormigón) + 6 m hasta el centro del digestor. En la práctica real, el sistema debería contar con al menos 3 vías o ramales de carga (en relación al diámetro del reactor en cuestión); por lo que todo lo anterior debería ser recalculado. Dicho cálculo entonces cumple solo la función de demostrar uno de los procedimientos posibles para obtener los parámetros de diseño.

del tipo de material a bombear, eficiencia del conjunto motor-bomba y costos.

No se ha considerado la incorporación de tierras diatomeas en la mezcla de carga al digestor, algo necesario en la práctica, cuya función es impedir la separación de fases dentro del digestor. Se considera importante evaluar la variación en los parámetros del fluido, debido a lo anteriormente mencionado.

El cálculo precedente se realizó en base a varias aproximaciones y simplificaciones de la realidad, por lo que su utilidad es sólo de índole orientativa.

Las bombas de pistón o émbolo son muy útiles para la impulsión de líquidos muy viscosos por el elevado esfuerzo cortante que se crea sobre las paredes del cilindro al paso del émbolo, lo que favorece la estanqueidad del conjunto; sin embargo, no se pueden utilizar para bombear líquidos que contengan sólidos abrasivos, debido al daño que ocasionarían sobre las superficies pulidas del interior; esta es una de las cuestiones que justifica el requerimiento de hacer una buena extracción de impropios antes de ingresar a la bomba de carga, de manera de asegurar su durabilidad mecánica y así evitar costosas reparaciones y paradas imprevistas del proceso (altamente costosas también).

En nuestro caso se requiere del uso de un equipo de bombeo industrial automatizado, para alto contenido de sólidos y que permita el transporte del material de carga a través de una tubería cerrada.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la bomba a emplear debe ser de desplazamiento positivo (las cuales son las indicadas para impulsar materiales con un contenido de sólidos mayor al 8 %), oelohidráulica, de doble émbolo, con un alto rendimiento de bombeo, bajo consumo energético, diseñada para funcionar las 24 horas y los 7 días de la semana; con una presión de impulsión de aprox. 12 bar. Se prioriza equipos que posean larga vida útil y bajo costo de mantenimiento, a causa de la aplicación de tecnología robusta y pocas piezas móviles.

El dispositivo de alimentación recepciona el sustrato que llega por la cinta transportadora y el lodo recirculado del digestor (extraído y transportado por un sinfín), efectuando luego la carga de la bomba. Consiste en sistema de sinfines-mezcladores que permiten ajustar el paso a través de los reguladores de frecuencia y a la vez que realizan un proceso de homogeneización del sustrato-inóculo a través de palas mezcladoras en la zona de entrada.

4.1.4.4. Reactor

El sistema propuesto para este caso tiene como núcleo a un bioreactor seco continuo, de disposición vertical. Este tipo de configuración es usualmente utilizada cuando se trabaja con sustratos con un contenido de sólidos de 20 – 40 %. Esto se conoce también como reactor de flujo pistón, ya que la movilización interna del sustrato es producida por el efecto de la gravedad y el empuje del sustrato ingresante, el cual se va depositando en capas sucesivas por la parte superior para luego ser evacuado por la parte inferior. Usualmente este tipo de reactor se alimenta a partir de la carga diaria efectuada mediante un mezclador, en donde se inocula al nuevo sustrato con una porción mayoritaria del lodo (digerido) extraído por la parte inferior del sistema, para luego ser bombeado hasta la parte alta del mismo (Figura 9).

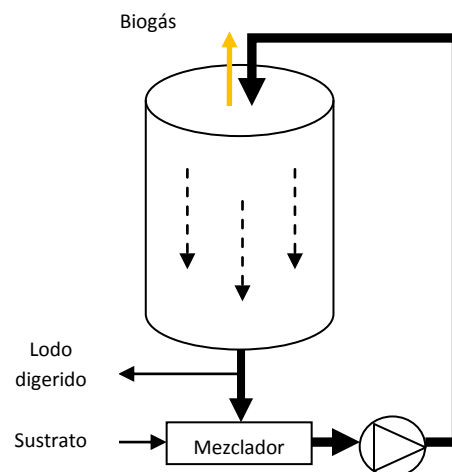


Figura 8: Esquema de movimiento de materiales en un digestor seco continuo vertical.

Estos sistemas se caracterizan por hacer un buen aprovechamiento de la energía térmica necesaria para sostener el proceso y por no tener agitación, lo cual también reduce la complejidad del mismo, y la posibilidad de fallas internas al no poseer partes móviles. En la práctica, la fricción producida en las paredes, la circulación interna producto del fenómeno de convección de la fase acuosa y la generación de biogás, produce un efecto de mezcla dentro del digestor; esto sin contar el proceso de recirculación de lodo digerido.

El proceso de carga del digestor, 1 parte de sustrato fresco por 6 partes de material digerido, conforma un sistema de mezcla estable que asegura una degradación rápida y controlada de la FORSU_D; con alta producción de biogás.

Este es un sistema de una sola fase, es decir que todas las fases de la degradación microbiana suceden en un mismo reactor. Las ventajas del sistema son, la menor complejidad del mismo y un menor costo de inversión.

4.1.4.4.1. Volumen del reactor

Se utilizan dos parámetros para poder calcular el volumen del reactor: Tasa de Carga Orgánica (TCO) y el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).

La TCO indica la cantidad de SV introducidos al reactor, expresado como [kg SV/m³*día]. En reactores continuos de mezcla completa, el rango de TCO apropiado es de 2 a 3 kg SV/m³*día; en cambio, para reactores de tipo flujo pistón, la carga puede superar los 10 kg SV/m³*día. Mediante la siguiente ecuación, es posible calcular la TCO:

$$TCO \left[\frac{kg \text{ SV}}{m^3 * \text{día}} \right] = \frac{\text{carga de sustrato} \left[\frac{kg}{\text{día}} \right] * ST [\%] * SV [\% \text{ de } ST]}{\text{volumen del digestor} [m^3]}$$

El TRH describe el tiempo teórico en el que el sustrato se mantiene en el reactor. Este tiempo debe ser escogido en función de alcanzar una adecuada degradación del sustrato, sin incrementar demasiado el volumen del propio reactor. Para evitar que la concentración de microorganismos dentro del reactor baje, por arrastre conjunto del material de descarga, el TRH no debe ser menor a 10 días (Eder y Schulz, 2006).

$$TRH [\text{día}] = \frac{\text{volumen neto del digestor} [m^3]}{\text{carga de sustrato} \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right]}$$

A continuación se realiza el cálculo para la determinación del volumen del reactor, para nuestro caso particular. Se toma para esto una carga de 30000 t anuales descontando el porcentaje de impropios del 1,5 % (29550 t FORSU_D/año), ST 30 %, SV 95 % ST, densidad del FORSU_D de 0,75 t/m³, una TCO de 10 kg SV/m³*día, y un TRH de 21 días; lo que se considera razonable para este tipo de materiales.

$$\text{Sólidos volátiles totales} = 29550 \frac{t \text{ FORSU}_D}{\text{año}} * 0,3 \frac{t \text{ ST}}{t \text{ FORSU}_D} * 0,95 \frac{t \text{ SV}}{t \text{ ST}} = 8421,75 \frac{t \text{ SV}}{\text{año}} ;$$

$$\text{Volumen total del sustrato} = \frac{29550 \frac{t \text{ FORSU}_D}{\text{año}}}{0,75 \frac{t \text{ FORSU}_D}{m^3 \text{ FORSU}_D}} = 39400 \frac{m^3 \text{ FORSU}_D}{\text{año}} \therefore$$

$$\text{Volumen Digestor, en función de TCO} = \frac{8421,75 \frac{t \text{ SV}}{\text{año}} * 1000 \frac{kg}{t}}{365 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 10 \frac{kg \text{ SV}}{m^3 * \text{día}}} = 2307,33 m^3$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen Digestor, en función de TRH} &= \frac{39400 \frac{m^3 \text{ FORSU}_D}{\text{año}} * 21 \text{ día}}{365 \frac{\text{día}}{\text{año}}} \\ &= 2266,85 m^3 \end{aligned}$$

Considerando los resultados anteriores, se trabajará con un reactor de 2350 m³; de manera de asegurar el cumplimiento de la TCO, fundamentalmente.

4.1.4.4.2. Material del reactor

Los materiales mayormente utilizados para la construcción de reactores son el hormigón armado y el acero. El sustrato, el biogás y los condensados pueden contener sustancias agresivas (ej.: sulfuro de hidrógeno, amoníaco, ácidos orgánicos e incluso la actividad microbiana) que actúan desintegramando y oxidando los materiales. En nuestro caso se utilizará el acero sobre una fundación de hormigón, ya que el acero es el material más utilizado en la industria para estos usos y dimensiones, debido a que es un material abundante, de sencillo acceso y de construcción rápida y bajo costo. En las partes del reactor en contacto con fluidos corrosivos se recomienda el empleo de aceros inoxidable de alta calidad. Las partes del reactor en contacto directo con el sustrato normalmente no requiere de protección, lo que sí es necesario en la que se encuentra expuesta al biogás y a los condensados. Una alternativa es la construcción directa con placas de acero recubiertas con vidrio²¹ o la aplicación de recubrimientos superficiales, sobre el acero de construcción, tales como: pinturas epoxi, films o láminas de polietileno y polímeros cerámicos²².

²¹ Estas placas se obtienen aplicando un esmalte vítreo sobre el acero, el cual al ser sometido a un tratamiento térmico en horno a 860 °C crea una fusión resistente a la corrosión. (Fuente: http://www.glstanks.com/en/downloads/gls_es.pdf . Septiembre, 2015).

²² http://proguard-coatings.de/fileadmin/chefs/Broschueren/CP-cat%C3%A1logo_el_esp%C3%A1nol.pdf (Septiembre, 2015).

4.1.4.4.3. Dimensiones del reactor

El diseño de tanques para el almacenamiento de sustancias implica muchos factores, que dependen de las características propias del material de construcción, el tipo y cantidad de sustancia a almacenar, el manejo y el entorno en el cual se instalará el equipo mecánico. En este contexto, la utilización de normas técnicas para efectuar los cálculos de diseño correspondientes, permiten optimizar el proceso; a través de métodos estructurados, diseñados por profesionales pertenecientes a organismos de normalización, que tienen la finalidad de estandarizar un único procedimiento para el cálculo de recipientes.

Las normas aplicables en nuestro caso son la API²³ 650 “Welded Steel Tanks for Oil Storage” y la AWWA²⁴ D-100 “Welded Steel Tanks for Water Storage”; ambas muy utilizadas en la industria para el diseño de tanques. La API 650 enfoca su diseño en estanques de acero que almacenan petróleo o subproductos, a una presión cercana a la atmosférica; esto último hace que tenga alcance para el uso particular que compete al caso. La AWWA D-100, en cambio, es específica para el diseño de tanques para almacenamiento de agua.

La configuración geométrica seleccionada responde al volumen a contener, como así también a la dirección y sentido de los flujos de materiales internos (material de alimentación y biogás). La forma cilíndrica se debe a una mayor resistencia mecánica, que en relación al formato rectangular no presenta concentraciones de esfuerzos en los vértices; es por ello que los recipientes rectangulares se construyen generalmente con la menor altura posible. Dentro de los cilíndricos, existe la disposición horizontal y la vertical, donde los verticales permiten el almacenamiento de mayores volúmenes de líquidos²⁵, permite un mejor manejo de la sustancia que contiene y tiene un menor costo en materiales.

Con respecto a la parte superior e inferior del mismo, se opta por un recipiente techado hermético y con fondo cónico; lo que justifica su asentamiento sobre una base cilíndrica de hormigón armado, además de evitar el contacto directo del acero con el piso. Si bien las condiciones de trabajo internas son cercanas a la presión atmosférica, la condición de techado hermético responde a la necesidad de conservar el ambiente reductor y el calor, al igual que contener y encauzar el biogás que se genera.

²³ American Petroleum Institute.

²⁴ American Water Works Association.

²⁵ Para volúmenes pequeños se pueden utilizar casi todos los tipos de tanques, sin embargo para capacidades mayores a 1000 barriles (159 m³), usualmente se utilizan los estanques verticales cilíndricos. (Gómez, 2007)

Es frecuente no utilizar toda la capacidad del tanque para almacenar una determinada sustancia; esto se debe a diversos factores físicos como el movimiento de transporte de la sustancia, los gases que emite, la posibilidad de formación de espumas, etc.; y otros de índole económico. La capacidad total del tanque está formada por tres tipos de volúmenes:

- Volumen muerto: corresponde al mínimo volumen de sustancia que puede contener el recipiente. En la industria esto suele utilizarse para permitir la formación de precipitados y la separación de las fases. En nuestro caso particular no se requiere de este volumen y de hecho la forma cónica del fondo es utilizada para facilitar la total evacuación del contenido, sin la presencia de puntos muertos.
- Volumen vivo: es la capacidad normal de trabajo con la que opera el recipiente; y corresponde al valor de cálculo a partir de TCO y/o TRH, en este caso concreto.
- Volumen máximo de diseño: se refiere a la capacidad máxima que permite el recipiente, asociada a la altura total del mismo.

Los cálculos de diseño de tanques, teniendo en cuenta lo anterior mencionado, tienen una complejidad que requiere la labor de técnicos expertos, conocedores de las características del material a contener, las prestaciones que se espera tenga el recipiente y sus parámetros de proceso, conocimiento de normativa aplicada al diseño y montaje de equipos mecánicos, de parámetros climáticos y sísmicos del lugar, al igual que de normativa y legislación aplicable a la seguridad industrial. Haciendo estas salvedades, se procederá a continuación a efectuar un cálculo básico de las dimensiones del mismo, solo con el objeto de poder tener una idea somera acerca de la envergadura y materiales principales implicados.

Tomando como punto de partida un volumen vivo de 2350 m^3 y simplificando el formato como un cilindro de bases planas, se procede tanteando valores de diámetro (D) y altura (h), que permitan obtener una buena relación h/D que asegure la estabilidad de la estructura y logren una cámara de gas superior de aprox. 2 m sobre el pelo del nivel vivo. Esto nos da como resultado un tanque de 12 m de diámetro interno y 23 m de alto, configurando un recipiente de volumen máximo de aprox. 2600 m^3 .

Es interesante también poder lograr una aproximación del espesor del material de construcción del reactor, ya que tiene una incidencia directa en el costo. Para esto puede utilizarse la fórmula de *Espesor por condición de diseño* (t_d), propuesta por la norma API 650 (método solo aplicable a tanques con un diámetro igual o menor a 60 m); haciendo también una gran simplificación con respecto a no considerar la posibilidad de variar, como sí se hace en la práctica, el espesor del material de acuerdo a la altura.

$$t_d [mm] = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{S_d} + ca$$

Donde D es el diámetro (= 12 m), H es la altura del volumen vivo (20,78 m), G es la densidad relativa de la sustancia a contener (0,75), S_d es el esfuerzo permisible por condiciones de diseño (120 MPa; que es la tensión admisible del acero) y ca es la corrosión permisible (1 mm; este valor surge de considerar una velocidad de corrosión de 0,05 mm/año, por un período de 20 años); lo que da como resultado un t_d de 8,53 mm. Podemos tomar entonces el valor comercial superior inmediato, que sería chapa de acero de 3/8" (9,53 mm) para las paredes del reactor. Es pertinente volver a explicitar que lo anterior es una simplificación (muy grande) del cálculo, de parámetros y de criterio para el dimensionamiento de tanques; cuyo único objetivo es poder darnos una idea de las dimensiones generales y de los espesores de los materiales. El solo diseño y optimización del tanque reactor amerita un trabajo de ingeniería mecánica, de la envergadura de una tesis completa.

4.1.4.4. Temperatura de operación, aislamiento y demanda térmica

La temperatura de digestión se fija en 50 °C, configurando entonces un proceso termófilo. Este rango de temperatura es el que frecuentemente se usa para sustratos que tengan algún tipo de riesgo sanitario, como es el caso de los FORSU_D.

Una temperatura constante dentro del reactor es esencial para mantener un proceso de digestión estable; es por eso que el mismo debe ser aislado y calefaccionado, en función de reducir y compensar las pérdidas de calor.

La aislación del reactor puede efectuarse internamente o externamente, en relación a las paredes del mismo. Las lanas minerales y las espumas plásticas son los materiales mayormente utilizados para este fin. El espesor de la capa aislante es calculado en función de optimizar los costos de su aplicación en comparación con el ahorro generado por la reducción de las pérdidas de calor. Como regla general, se busca lograr valores de transmitancia térmica de 0,3 W/m²*K para procesos mesófilos y de 0,2 W/m²*K o menos para procesos termófilos. (Wellinger et al, 2013)

A continuación se efectúa el cálculo del espesor del aislamiento térmico. Este procedimiento se basa en las fórmulas y valores de tabla presentes en la Norma IRAM 11601:2002 "Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario".

Consideramos un reactor cilíndrico vertical construido con un sistema de capas homogéneas, cuyo ordenamiento (en sentido interior-exterior) y parámetros de

cálculo son los siguientes:

- Capa 1. Acero inoxidable: 0,009 m espesor, λ (conductividad térmica) 17,7 W/m*K.
- Capa 2. Placa de poliestireno expandido: X m espesor, λ 0,035 W/m*K (corresponde a plancha de densidad aparente de 20 kg/m³).
- Capa 3. Chapa galvanizada acanalada: 0,0015 m espesor, λ 110 W/m*K (valor asimilado a Latón).

El espesor de la capa 2 es la incógnita del problema.

En este caso debe adicionarse un valor de *Resistencia térmica superficial* (R_s), correspondiente a la interfaz del reactor con el medio externo: 0,04 m²*K/W.

Como se mencionó anteriormente, el valor de transmitancia térmica total del sistema de capas debe ser inferior a 0,2 W/m²*K; al tratarse de un proceso termófilo.

Se toma el criterio de efectuar los cálculos bajo la modalidad de elementos constructivos planos, para el caso de la base y techo del reactor, y de los elementos cilíndricos para la envolvente lateral del mismo.

A continuación se presenta el cálculo y los resultados para la base y el techo.

$$\text{Resistencia térmica de la capa } (R_i) = \frac{\text{espesor de la capa}}{\lambda \text{ del material}} ;$$

$$\text{Resistencia térmica total } (R_T) = R_s + \sum_{i=1}^3 R_i ;$$

$$\text{Transmitancia térmica total } (U_T) \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] = \frac{1}{\text{Resistencia térmica total}} ; \therefore$$

$$\text{Espesor de la capa 2} \geq \lambda_2 * \left(\frac{1}{U_T} - R_s - R_1 - R_3 \right)$$

$$\text{Espesor de la capa 2 (poliestireno expandido; base y techo)} \geq 0,1736 \text{ m}$$

En función de los cálculos anteriores, se opta por una capa aislante de poliestireno expandido de 18 cm de espesor y una densidad de 20 kg/m³.

Se procede también a efectuar el cálculo de espesor de capa, en el caso de emplear como material aislante a la espuma poliuretánica en lugar del poliestireno expandido; de manera de poder comparar prestaciones y costos de uno y otro, seleccionando el más conveniente.

Espesor de la capa 2 (espuma poliuretánica; base y techo) $\geq 0,1190$ m

Esto nos permite redondear el espesor de la capa poliuretánica en 12 cm.

Para la envolvente lateral se procede de la siguiente manera:

$$\text{Transmitancia térmica total } (U_T) \left[\frac{W}{m * K} \right] = \frac{2 * \pi}{\ln \frac{r_{ext1}}{r_{int1}} + \frac{r_{ext2}}{\lambda_2} + \frac{r_{int3}}{\lambda_3} + R_s};$$

El cálculo anterior nos arroja como resultado la transmitancia térmica total lateral por metro lineal del cilindro (cuerpo del reactor); por lo que a este valor hay que afectarlo por la cantidad de metros cuadrados, de la cara externa, del anillo cilíndrico de 1 m de largo, de manera de obtener una expresión por metro cuadrado de superficie lateral; tal y como se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Transmitancia térmica total } (U_T) \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \\ = \frac{2 * \pi}{\ln \frac{r_{ext1}}{r_{int1}} + \frac{r_{ext2}}{\lambda_2} + \frac{r_{int3}}{\lambda_3} + R_s} * \frac{1 \text{ metro lineal}}{1 * \pi * 2 * r_{ext3}}; \end{aligned}$$

Se procede por tanteo, modificando el valor de espesor de la capa 2, hasta alcanzar el valor de transmitancia térmica total deseado.

Los resultados son los siguientes:

Espesor de la capa 2 (poliestireno expandido; envolvente lateral) $\geq 0,1640$ m

Espesor de la capa 2 (espuma poliuretánica; envolvente lateral) $\geq 0,1130$ m

La temperatura del digestor se sostiene a través de un sistema de aprovechamiento de calor, que recupera la energía térmica del moto-generator para luego ser transferida por las paredes del reactor hacia el sustrato. Para lograr cuantificar dicha demanda térmica, deben calcularse y sumarse tres componentes, que hacen a la potencia de calefacción del sustrato, a la compensación de las pérdidas de calor por radiación, y a

la compensación de las pérdidas de calor por evaporación del agua presente en la mezcla a digerir (vapor que luego es acarreado con el biogás).

1. Potencia de calefacción del sustrato:

$$P_S [W] = T_{al} * c_e * \Delta^{\circ}T$$

Donde T_{al} es la tasa de alimentación [g/s], c_e es el calor específico o sensible del agua²⁶ (4,186 J/g*K) y $\Delta^{\circ}T$ es la diferencia de temperatura entre el contenido del reactor y el sustrato fresco ingresante [K].

2. Compensación de las pérdidas de calor por convección:

$$P_R [W] = \Delta^{\circ}T' * S * U_T$$

Donde $\Delta^{\circ}T'$ es la diferencia de temperatura entre el interior del digestor y el ambiente exterior al mismo [K], S es la superficie total de transferencia del reactor [m²] y U_T la transmitancia térmica total (se considera aquí el máximo valor recomendado para sistemas termófilos: 0,2 W/m²*K).

3. Compensación por las pérdidas de calor por evaporación:

$$P_E [W] = G_{corr} * L * Sat$$

Donde G_{corr} es el caudal de biogás corregido según las condiciones de generación [m³/s], L es el calor latente de evaporación del agua a 50 °C (2233,4 J/g) y Sat es el contenido de vapor del biogás generado [g/m³].

Supuestos para el cálculo:

- La potencia demandada total (P_T) es la suma de las tres componentes anteriormente mencionadas; en la condición de bomba de carga funcionando y estado estacionario (temperaturas constantes).
- La superficie total de transferencia térmica del reactor se calculó como una simplificación cilíndrica de 12 m de diámetro, 23 m de alto y 0,12 m espesor de capa aislante en todo el contorno = 1128,98 m².
- Se considera que el biogás que se genera, en las condiciones de atmósfera interior al reactor, tiene una humedad relativa (ϕ) del 100 %. La presión manométrica de la línea (y de la atmósfera superior del interior del reactor) es de 2 mbar, la presión atmosférica se obtiene a partir del dato de altitud (850

²⁶ Se toma el valor correspondiente al agua a causa de que se carece de datos referidos específicamente al material en cuestión (sustrato fresco de alimentación y digestato)

msnm).

- No se consideran las ganancias térmicas por radiación solar incidente.
- Se procede a calcular las potencias demandadas totales para la condición “Invierno”, “Verano” y “Media Anual”.
- El valor de temperatura exterior de la condición “Invierno” corresponde a la media de las temperaturas mínimas absolutas de los últimos 10 años (2007-2016) = - 6,64 °C.
- El valor de temperatura exterior de la condición “Verano” corresponde a la media de las temperaturas máximas absolutas de los últimos 10 años (2007-2016) = 39,06 °C.
- El valor de temperatura exterior de la condición “Media Anual” corresponde a la media de las temperaturas medias anuales (media anual obtenida como la media de las temperaturas medias mensuales registradas en el año) de los últimos 10 años (2007-2016) = 15,90 °C.
- Los valores de temperatura son los registrados por la Estación Meteorológica de Rousell (departamento de Maipú), ya que es la estación más cercana a la zona de Guaymallén con registros históricos accesibles²⁷.
- La temperatura del sustrato fresco que ingresa al reactor se considera en equilibrio con la temperatura ambiente exterior de cada una de las condiciones ya mencionadas.
- La potencia bruta entregada por el sistema (*PB*) resulta de multiplicar los 4365,53 MJ/t sustrato_{incorporado} por las 80,96 t sustrato_{incorporado}/día y dividirlo por la cantidad de segundos del día = 4090,7 kW.

La sumatoria de las componentes anteriores, en nuestro caso, arrojan los siguientes valores de demanda térmica para calefacción del reactor:

- Media anual: 298,0 kW (7,3 % de la potencia bruta)
- Invierno: 466,3 kW (11,4 % de la potencia bruta)
- Verano: 125,1 kW (3,1 % de la potencia bruta)

Los cálculos completos pueden observarse en el *ANEXO: Cálculo de potencia térmica demandada por el reactor*.

²⁷ Acceso desde la página web de la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas de la Provincia de Mendoza. (<http://www.contingencias.mendoza.gov.ar>) (ver *ANEXO: Datos históricos (2007-2016) de temperatura de la Est. Met. Rousell*)

4.1.5. Almacenamiento de biogás

El biogás generado a través de la biodigestión anaeróbica, al tener una baja densidad, escapa automáticamente por el conducto ubicado en la parte superior del reactor.

Las fluctuaciones en la producción de biogás ocurren con frecuencia; al igual que variaciones de volumen por cambios de temperatura. Para mitigar este efecto y así poder controlar el flujo de combustible a la unidad de transformación o de aprovechamiento, es necesario proveer al sistema de un módulo de almacenamiento temporario.

La unidad de almacenamiento, o gasómetro como comúnmente se la denomina, debe tener ciertos requerimientos mínimos, tales como: ser construida con un material impermeable a los gases; resistente a la presión, a la radiación UV, a las variaciones de temperatura y a las condiciones climáticas adversas (ej.: granizo).

Usualmente, el volumen de almacenamiento es seleccionado en función al espacio y al presupuesto disponible. Muchas plantas de biogás funcionan con 2 – 3 horas de capacidad de almacenamiento, o incluso menos en el caso de biogás mejorado²⁸. (Wellinger et al, 2013)

Una posibilidad es almacenar el biogás directamente sobre el reactor, por medio de una membrana (o doble membrana) flexible; la cual sirve a la vez de techo del mismo. Otra posibilidad es efectuar un almacenamiento externo, es decir, de forma separada al reactor. Con respecto a este último, antes solía utilizarse el sistema de tanques de almacenamiento flotante²⁹, pero actualmente se prefiere, para estas escalas, el uso de una membrana flexible; la cual debe a su vez protegerse, de las cargas externas, por una segunda membrana o por una estructura rígida.

En nuestro caso, se opta por la implementación de un gasómetro externo flexible, de doble membrana, presurizadas, $\frac{3}{4}$ esféricas y concéntricas; el cual brinda un sistema de contención de biogás hermético y resistente, química y mecánicamente hablando. Sin contar los aspectos estéticos, presenta las ventajas de adaptarse perfectamente al sitio de emplazamiento y el de poder acceder fácilmente a la membrana interna para practicar verificaciones. (Figura 10)

²⁸ = upgrading = proceso por el cual el biogás es purificado hasta alcanzar una proporción de metano similar al del gas natural.

²⁹ Consiste en un recipiente cilíndrico, dispuesto verticalmente y abierto en su base inferior, colocado libre en el interior de otro, también cilíndrico pero lleno de agua. El biogás, generado en el reactor, ingresa por la parte baja de estos y es atrapado por el recipiente de menor diámetro; esta acumulación provoca la elevación o flotación del mismo (soportado por rieles de conducción), al mismo tiempo que las fugas radiales por la base son evitadas por el efecto tapón producido por el agua circundante.

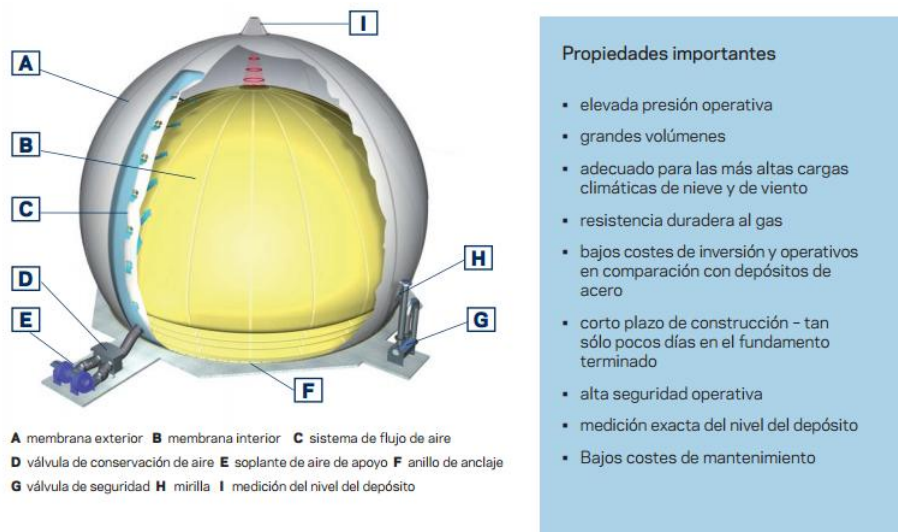


Figura 9: Esquema de gasómetro externo (Tipo SATTler DMGS) (Fuente: <http://www.manantial.cl/dinamicos/descargas/biogas-catalogo-1.pdf>)

La sobre-presión en estos gasómetros suele rondar los 0,05 bar. (Wellinger et al, 2013)

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se procede a calcular el volumen requerido de almacenamiento:

$$\frac{P_1}{V_2 * T_1} = \frac{P_2}{V_1 * T_2} \therefore$$

$$V_2 = \frac{P_1}{T_1 * P_2} * V_1 * T_2 = \frac{918,70 \text{ mbar}}{323,15 \text{ K} * 944,70 \text{ mbar}} * 847,66 \text{ m}^3 * 315,15 \text{ K}$$

$$= 803,92 \text{ m}^3$$

Donde P_1 es la presión absoluta en la línea 918,70 mbar, P_2 contempla la adición de la sobre-presión presente en el gasómetro (+26 mbar), T_1 es la temperatura de digestión (50 °C), V_1 es el volumen de biogás generado en el reactor, en una hora y en las condiciones de presión y temperaturas mencionadas (50 °C; 918,70 mbar), y T_2 es la temperatura de equilibrio máxima a la que podría llegar el gasómetro luego de pasar el biogás por todo el tren de purificación (se toma el valor de la temperatura máxima absoluta de los últimos 10 años, registrada en la estación meteorológica empleada como referencia = 42,0 °C). El resultado anterior debe afectarse por la cantidad de horas deseadas como capacidad de almacenamiento. En nuestro caso, se opta por hacer un diseño con 2 horas de capacidad; lo que nos arroja un volumen requerido de 1607,85 m³. Tomando este resultado y verificando la disponibilidad según catálogo del proveedor (ANEXO: Catálogo gasómetros de membrana), se opta finalmente por trabajar con un gasómetro de 1920 m³ de capacidad, de diámetro 16,6 m y 12,4 m de altura (lo que nos daría un tiempo de almacenamiento algo mayor a las 2 horas). Es pertinente mencionar que este volumen máximo empleado para el cálculo, se

generaría en el lapso de 1 hora sólo en el caso de que la temperatura del biogás se mantuviera a 42,0 °C; cosa que en la práctica no sucede, por lo que su capacidad de almacenamiento real es mayor aún.

En caso de membranas simples, el EPDM (etileno propileno dienomonómero, tipo M ASTM) es el elastómero generalmente utilizado, a causa de su alta resistencia UV y elasticidad. Cuando se trata de doble membrana, el PVC flexible es el utilizado. (Wellinger et al, 2013)

Un soplador de aire, colocado entre ambas capas, actúa inflando constantemente la membrana externa; protegiendo así la interna, la cual se infla y desinfla de acuerdo al volumen de biogás, y brindando resistencia del sistema en general a las condiciones meteorológicas externas.

Este sistema de gasómetro seleccionado cuenta con un equipo integrado de medición indirecta de volumen acumulado mediante ultrasonido.

4.1.6. Tuberías y válvulas

Tanto el sustrato de alimentación del reactor como el biogás generado, es transportado a través de tuberías. El material que conforma la tubería y el diámetro de la misma, son escogidos en función del material a transportar, la temperatura en la que éste se encuentre, la ubicación de la línea y la presión que deba contener (Tabla 8).

Tabla 8: Relación de parámetros para la selección de tuberías. (Adaptado de Wellinger et al, 2013)

Parámetros	Características requeridas por la tubería
Material transportado y localización de la línea	La tubería de biogás debe ser construida de acero inoxidable si la línea se extiende de forma aérea, y de polietileno (PE) si lo hace bajo tierra. Las tuberías para sustrato y lodo digerido pueden ser de PVC, PE o acero.
Temperatura del material transportado	PVC y PE es utilizado en el caso de temperaturas menores a 60 °C. Por arriba de esa temperatura, se recomienda el uso de acero.
Presión interna	Las tuberías bajo presión son generalmente hechas de acero. En el caso de utilizar materiales plásticos, el espesor de sus paredes debe ser incrementado. El diámetro de las tuberías varía entre los 100 y 150 mm (lo suficientemente grande

para evitar obstrucciones, pero lo suficientemente pequeño para prevenir caídas de presión y sedimentación). Las tuberías de rebalse o de retorno son generalmente de PVC y tienen mayores diámetros, entre 200 y 300 mm.

Es necesario mencionar que, independientemente del material de construcción, las tuberías deben ser protegidas de las temperaturas de congelación. También, el diseño de la línea debe prever puntos de apertura para efectuar inspecciones y actividades de mantenimiento.

Los tipos de válvulas mayormente usados en plantas de biogás son las de tipo compuerta, mariposa y anti-retorno.

Como su nombre lo indica, las de tipo compuerta actúan bajando o subiendo una estructura perpendicular al flujo, que regula o impide el paso del mismo. Tienen la ventaja de permitir un cierre hermético, pero la desventaja de la lentitud, al tener que ser accionado mediante el giro de un volante. Si el material a transportar es fibroso, además tendrá que contar con un elemento cortante que permita el cierre completo.

Las válvulas mariposa consisten en un disco solidario a un eje perpendicular al flujo; el cual permite un rápido accionar con el solo giro de 90° del mismo, aunque por otro lado no provee de un cierre hermético.

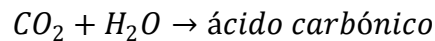
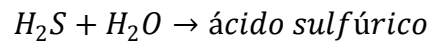
Las válvulas anti-retorno solo permiten que el flujo se manifieste en una dirección; lo que las hace muy útiles en el caso de que los reflujos deban ser prevenidos.

4.1.7. Sistema de acondicionamiento del biogás

Como ya se trató en el correspondiente apartado del *Capítulo 3: Marco teórico*, el biogás no está compuesto de solo metano, sino que contiene cantidades considerables de dióxido de carbono y agua, junto con una cantidad de compuestos presentes en menores cantidades. A pesar de que la concentración de estas impurezas sea relativamente baja, pueden afectar a los equipos a causa de la corrosión producida o el desgaste mecánico.

Las impurezas se generan por diversas razones, tanto por las condiciones de presión y temperatura del reactor como por la propia actividad microbiana. Esto se ve condicionado también por el tipo de sustrato empleado.

La purificación del biogás se realiza fundamentalmente para prevenir la corrosión de las tuberías de transporte y de los componentes del sistema de aprovechamiento térmico-eléctrico.



En caso de que el biogás no sea debidamente tratado y secado, la frecuencia de cambio de aceite del motor de combustión se puede duplicar, incrementando consecuentemente los costos operativos.

A continuación se tratan las impurezas más frecuentemente encontradas; respecto a su origen, consecuencias y métodos de eliminación o reducción a valores aceptables.

4.1.7.1. Material particulado

Las partículas presentes en el biogás pueden causar daño en los equipos debido a sus propiedades abrasivas, deposiciones no deseadas u obstrucciones en algunos sectores de la línea de conducción/limpieza/aprovechamiento; es por esto que deben ser eliminadas.

El retiro de este tipo de materiales se realiza en la propia línea de conducción, a la salida del reactor, empleando dispositivos convencionales de retención física (filtros de polvo).

4.1.7.2. Sulfuro de hidrógeno

En el biogás crudo puede encontrarse una variedad de impurezas sulfuradas, pero el sulfuro de hidrógeno (SH_2) es el más común. Se emplea el criterio de llegar a una concentración de SH_2 residual, en el biogás tratado, inferior a 100 mg/Nm^3 , de manera de prevenir daños en la unidad de CHP y otros equipos.

Se opta por aplicar un sistema de desulfurización biológica externa, debido a que se considera eficiente, de bajo costo (al no requerir la incorporación continua de insumos químicos) y más seguro (al brindar la posibilidad de oxidar y recuperar el azufre de forma separada, sin tener que incorporar oxígeno a la línea de conducción de biogás).

Se complementa el tratamiento con la incorporación de un filtro de carbón activado, al final del tren.

4.1.7.3. Disminución del contenido de agua

El biogás que se genera en el digester lo hace siempre saturado en agua. La cantidad de agua de este biogás depende de la condición de presión y temperatura presente en el reactor.

El agua en el biogás crudo puede causar problemas en el sistema, aguas abajo del digester. Esta puede causar corrosión en la tubería de conducción en presencia de otros compuestos como dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, formando condensados ácidos. Otro efecto negativo es que el contenido de agua baja el poder energético del biogás en el sistema de aprovechamiento.

El agua puede ser removida cambiando los parámetros que afectan a la capacidad del gas para contener el vapor de agua, presión y temperatura. Es por esto que las tecnologías de disminución del contenido de agua consisten en sistemas de compresión y/o de enfriamiento. También son empleados sistemas de absorción (ej.: empleando etilenglicol) y adsorción (ej.: sílica-gel, óxido de aluminio, óxido de magnesio, etc.).

4.1.8. Sistema de aprovechamiento térmico-eléctrico

El biogás es considerado como un bio-combustible CO_2 neutral, pudiendo ser empleado en todas las aplicaciones convencionales para el gas natural. Como se explicó anteriormente su contenido energético depende de la concentración de metano presente.

El biogás tiene numerosas aplicaciones finales, en comparación con otras fuentes de energía renovables, a saber:

- Producción de calor y/o vapor en una caldera.
- Producción de electricidad en una planta combinada de calor y potencia eléctrica (CHP, por sus siglas en inglés "Combined heat and Power").
- Fuente de energía para uso industrial, en la forma de agua caliente, aire caliente, vapor y/o electricidad.
- Conversión a hidrógeno en celdas de combustible y almacenamiento.
- Upgrading para la inyección en red municipal de gas o para su compresión y uso en sistemas de transporte.

Tal y como se trató en el apartado anterior, el biogás debe ser acondicionado antes de poder emplearlo en algún sistema de aprovechamiento como los que se listaron.

En nuestro caso particular se plantea una utilización in situ del biogás generado, por lo que no se abordará la temática de upgrading.

En la Tabla 9 se presenta una comparación entre las unidades de aprovechamiento generalmente empleadas para su alimentación con biogás, con sus capacidades, eficiencias, consumo de combustible y ratios de recuperación térmica.

Tabla 9: Comparación de sistemas estacionarios de generación de energía con biogás (Adaptado de Wellinger y col., 2013)

Parámetro	Motor de combustión interna	Turbina de gas	Micro-turbina	Motor Stirling	Celda de combustible
Potencia nominal (kW_{el})	110 - 3000	3500 - 15000	30 - 300	< 150	300 - 1500
Tamaño de planta	Pequeña a mediana	Grande	Pequeña	Pequeña	Pequeña
Eficiencia eléctrica (%)	30 - 42	25 - 40	25 - 30	30 - 40	40 - 45
Eficiencia térmica (%)	40 - 50	30 - 50	30 - 35	35 - 40	30 - 40
Eficiencia general del sistema	70 - 80	70 - 75	55 - 65	65 - 80	75 - 80
Posibilidad de controlar la relación de producción de energía eléctrica/térmica	No es posible	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Buena
Nivel de exigencia de purificación del biogás	Medio	Medio	Medio	Bajo a Medio	Alto
Emisiones de NO_x	Altas (500 - 700 mg/Nm^3)	Bajas (25 - 50 mg/Nm^3)	Bajas	Muy bajas	Extremadamente bajas (3 mg/Nm^3)
Fuente alternativa de combustible	Gas licuado	Gas natural	Gas natural, kerosene, fuel oil	Gas natural, fuel oil, biomasa	Gas natural
Costos de inversión ($€/kW_{el}$)	400 - 1100	900 - 1500	600 - 1200	1300 - 1500	3000 - 4000
Costos operacionales y de mantenimiento ($€/kWh$)	0,01 - 0,02	0,005 - 0,010	0,008 - 0,015	0,003 - 0,005	0,003 - 0,010

En nuestro caso particular trabajaremos con un sistema de moto-generación con recuperación térmica (CHP), con una eficiencia eléctrica media (36 %) y una térmica

media (45 %). La potencia bruta generada por la planta se obtiene multiplicando la energía bruta teórica bruta obtenida (4365,53 MJ/t sustrato_{incorporado}) por la cantidad de alimentación diaria (80,96 t sustrato/día) y dividiendo todo por la cantidad de segundos del día; lo que nos da como resultado 4,09 MW brutos. Si consideramos las eficiencias ya mencionadas, estamos hablando de que nuestra planta tiene una potencia instalada de 1,47 MW_{el} y de 1,84 MW_{tér}; con un factor de planta del 85 - 90 %. En la Figura 11, puede verse un esquema del sistema de recuperación de calor.

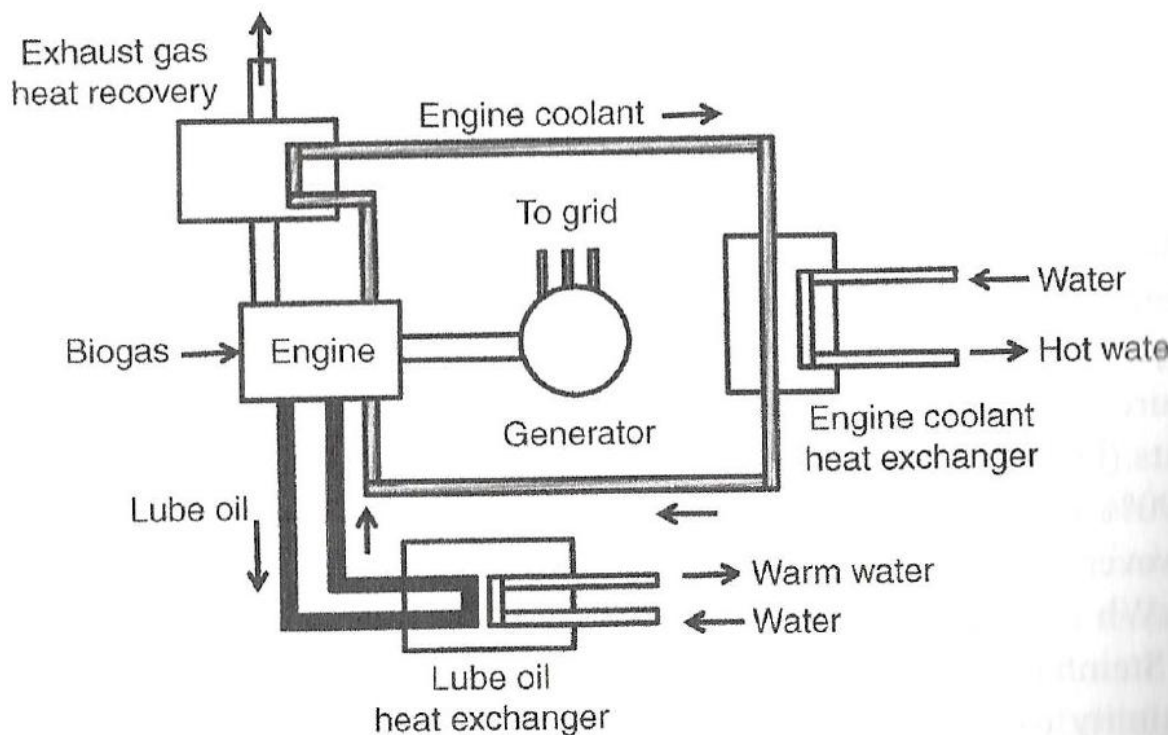


Figura 10: Esquema de recuperación de calor de un sistema CHP alimentado con biogás (Fuente: Wellinger y col, 2013)

El contenido de SH₂ máximo para el ingreso en estos equipos debiera ser menor a 200 mg/Nm³ (óptimo < 100 mg/Nm³). No obstante esto, todas las partes del motor en contacto con el gas puede ser corroído, por lo que requieren ser protegidas. También deben emplearse lubricantes especiales, bajos en cenizas y que provean alta alcalinidad por largos períodos de tiempo (se requiere del monitoreo del aceite con una regularidad que, dependiendo del contenido de sulfuro de hidrógeno del biogás, puede ir del intervalo de 160 a 200 hs de uso).

4.1.9. Tratamiento del digestato y posibles usos

El digestato es el efluente digerido del proceso de producción de biogás. La composición y calidad del mismo es altamente dependiente de la composición y calidad del sustrato empleado. Debido a su contenido de micro y macro-nutrientes

fácilmente accesibles, este material es valorizado por sus propiedades como fertilizante de suelos y mejorador de su estructura. Para su uso como fertilizante, el digestato necesita ser de la más alta calidad y libre de patógenos, impurezas físicas y químicas u otro contaminante. La mayoría de estas situaciones es salvada empleando un correcto control de calidad del sustrato de alimentación. Dependiendo de su uso final y de las condiciones necesarias para su disposición, será necesario aplicarle algún tratamiento tecnológico posterior a su salida del digestor.

El digestato extraído tendrá un bajo contenido de materia seca, considerando que en nuestro caso la degradación de los SV del sustrato alcanzaría el 70 %; lo que nos da como resultado un contenido de humedad en el digestato de alrededor del 90 %.

El proceso de biodigestión anaeróbica tiene efecto sanitizante, siendo posible la inactivación de la mayoría de los patógenos presentes en la mezcla de sustrato en el interior del digestor (Tabla 10). La inactivación de patógenos ocurre como resultado de la combinación de temperaturas constantes de proceso (termófilas y mesófilas) y tiempos de retención del sustrato, en interacción con otros parámetros del microambiente en el interior del digestor. (Wellinger y col, 2013)

Tabla 10: Comparación en tiempo de decaimiento T_{90} (tiempo para la destrucción del 90 % de los patógenos) de algunas bacterias patogénicas en un sistema de biodigestión anaeróbica y en un sistema de estiércol líquido no tratado. (Adaptado de Wellinger y col, 2013)

Bacteria	Sistema de biodigestión anaeróbica		Sistema de estiércol líquido no tratado	
	53 °C T_{90} [horas]	35 °C T_{90} [días]	18 - 21 °C T_{90} [semanas]	6 - 15 °C T_{90} [semanas]
Salmonella typhimurium	0,7	2,4	2,0	5,9
Salmonella dublin	0,6	2,1	-	-
Escherichia coli	0,4	1,8	2,0	8,8
Staphylococcus aureus	0,5	0,9	0,9	7,1
Mycobacterium paratuberculosis	0,7	6,0	-	-
Coliform bacteria	-	3,1	2,1	9,3
Group D streptococci	-	7,1	5,7	21,4
Streptococcus faecalis	1,0	2,0	-	-

En nuestro caso particular, el digestato requerirá de un procesamiento previo a su uso a causa de su alto contenido de humedad, fundamentalmente.

El primer paso del tratamiento es la separación de fases, líquido-sólido, mediante un sistema centrífugo. La fase líquida obtenida será dirigida a la planta de tratamiento de efluentes y la sólida pasará al sector destinado a su estabilización final mediante compostaje.

El producto de compostaje, luego de ser tamizado, será empleado como enmienda orgánica en espacios verdes del propio municipio (sin costo alguno); empleando para ello el propio sistema de retiro y transporte municipal.

4.2. Layout de planta

En la Figura 12 se presenta el layout de planta propuesto.

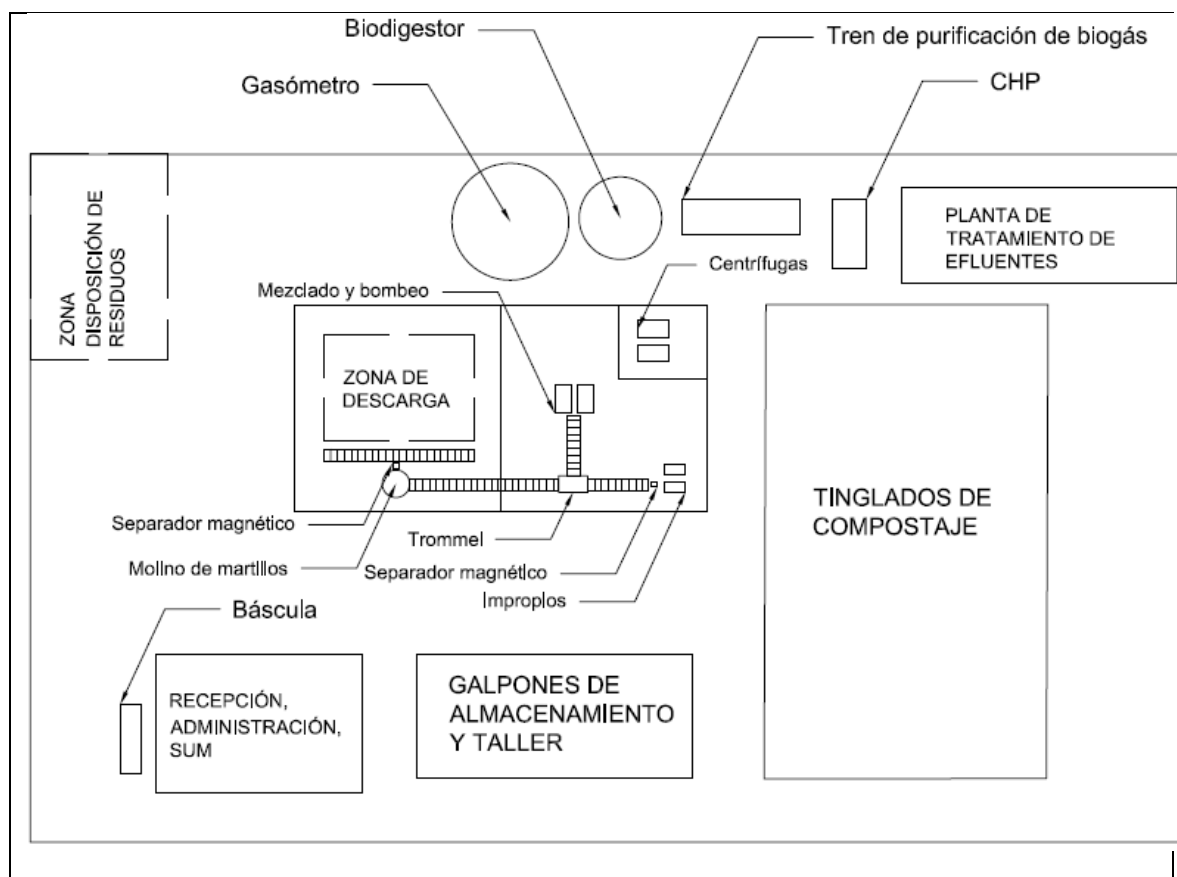


Figura 11: Layout de planta (predio de aprox. 1,7 ha)

5. CAPÍTULO 5: Estudio económico-financiero

5.1. Postulados para el estudio financiero base

En este apartado se presentan algunas cifras referidas a los costos de inversión, factor de planta, costos operativos y de mantenimiento, de adquisición de sustrato, y los ingresos esperados por su tratamiento y venta de los excedentes energéticos.

Este estudio se realiza empleando la herramienta de armado del flujo de fondos base del proyecto, a partir del cual luego se procede a la sensibilización de algunas de las variables de manera de estimar el comportamiento del mismo en caso de posibles cambios de las condiciones de entorno.

5.1.1. Inversión

La Inversión o Gastos de Capital (CAPEX, por su traducción al inglés) se considera compuesta por el monto asociado a la ingeniería y equipos provistos por la empresa que posee la patente de la tecnología en cuestión (OWS de Bélgica); la cual asciende a 5,9 millones de €, que contempla lo expuesto en el ANEXO: *Oferta Presupuestaria Instalación Dranco para el tratamiento de 30.000 toneladas de residuos biomásicos al año*; impuestos y tasas aplicables, sistema de pretratamiento del sustrato, sistema de tratamiento del digestato, sistema de tratamiento de efluentes, obra civil, conexión al Sistema Interconectado Nacional (SADI). El terreno se considera a concesión por parte de las autoridades locales y sin necesidad de efectuar trabajos generales de movimiento de suelos.

Para el cálculo del costo de la nave industrial, del galpón de almacenamiento-taller y de los tinglados de compostaje se toma el valor de \$ 6.359,70/m² correspondiente a "Galpón Metálico", actualizado al mes de febrero de 2017, según índice del COPAIPA³⁰. En el caso de la zona de Recepción, Administración y SUM, se emplea el valor de \$ 12.793,91/m² correspondiente a "Vivienda 2 Plantas", según datos de la misma fuente.

En cuanto al conjunto de equipos y sistemas de transporte para el pretratamiento del sustrato, del tratamiento del digestato y la planta de efluentes, se toma una actualización de una cotización realizada para un proyecto de similares características técnicas en el año 2014 (\$ 4.500.00,00). El INDEC no posee un indicador claro de IPC en el rubro bienes durante el periodo 2014-2016, por lo cual se tomará el valor correspondiente al periodo abril 2016-febrero 2017; de 100 a 121,4 que al anualizarlo

³⁰ <http://www.copaipa.org.ar/costos-de-la-construccion/> (abril de 2017). Se emplea el indicador proporcionado por esta fuente ya que el acceso a datos de provincia de Mendoza se encuentra restringido a afiliados de la Cámara Argentina de la Construcción.

representa un incremento de 29,27 %. Se considera luego que este comportamiento ha sido similar en los dos periodos anteriores y se llega así a un valor actualizado de \$ 9.721.499,26 (\equiv us\$ 613.924,80).

El conjunto total asciende al valor de 10.202.972,79 us\$, según el siguiente detalle:

- Sistema de biodigestión Dranco: 7.658.904,94 us\$
- Sistema de pretratamiento del sustrato y de postratamiento del digestato: 613.924,80 us\$
- Obras civiles: 1.930.143,04 us\$

Relación cambiaria empleada³¹ de 1,073 us\$/€.

5.1.2.Período de estudio

Se analiza un período de 21 años, ya que se corresponde con el plazo de instalación y puesta en operación del proyecto (1 año) y el plazo por el que CAMMESA, en representación de los agentes distribuidores y grandes usuarios del MEM, se compromete a comprar el 100 % de la energía generada a través del Contrato de Abastecimiento de Energía Eléctrica Renovable (PPA = Power Purchase Agreement) (modalidad contrato a término, a largo plazo y en dólares), desde la fecha de habilitación comercial (20 años).

5.1.3.Costos operacionales y de mantenimiento

Los costos operacionales están en función de la cantidad de material procesado anualmente por la planta. El valor considerado resulta de tomar los datos de distintas plantas con tecnología Dranco, relevadas en el estudio de Gómez (2010), correspondientes a 17 €/t una planta para procesar 25.000 t/año y a 13 €/t una planta para 50.000 t/año; cuya interpolación lineal da como resultado un costo unitario de 16,2 €/t, o lo que es lo mismo, 17,4 us\$/t de sustrato procesado para una de 30.000 t/año; lo que anualmente representaría el monto de us\$ 521.393,44. Debe tenerse en cuenta que se está tomando un índice de origen europeo.

El costo de mantenimiento se considera como monto fijo anual correspondiente al 1,5 % de la inversión total inicial (CAPEX) en dólares (= us\$ 153.044,59/año).

³¹ En base a tipo de cambio de referencia consultado en página web del Banco Central de la República Argentina: <http://www.bcra.gov.ar/> (fecha de consulta: 02/02/2017; valores referidos a 01/02/2017; dólar mayorista, tipo de cambio de referencia: \$ 15,8350).

5.1.4. Costos de adquisición de sustrato de alimentación

Como se mencionó en el apartado de Estudio Técnico, el FORSU_D recibido en planta no implica el incurrir en costos de adquisición del mismo, sino que por el contrario, implica el cobro de un canon para el tratamiento de este material.

5.1.5. Costos por disposición final del descarte

El FORSU_D recibido en planta posee un 1,5 % de material de descarte, que se extrae en la fase de pretratamiento del sustrato, que debe ser dispuesto de forma convencional en un vertedero controlado. Se considera entonces el costo de disposición del 1,5 %, en peso, del material ingresado anual; por un valor de us\$ 18,9/t (\equiv a los \$ 300/t requeridos por la empresa LIME, según tasa de cambio empleada).

5.1.6. Ingresos

Los ingresos de planta están conformados por el cobro del canon por el tratamiento del material residual FORSU_D y por la venta de la energía eléctrica generada a través del aprovechamiento del biogás obtenido. No se considera la transacción de energía térmica excedente (lo que en un caso de aplicación real no sería despreciable). Tampoco se considera la venta de digestato estabilizado; la disposición del mismo se establece como entrega sin costo (en la puerta de la planta) al municipio para su uso como enmienda de suelos en espacios verdes, con el compromiso del municipio para su retiro total y en períodos pactados.

Se considera un ingreso correspondiente al concepto de canon por tratamiento y disposición final del material residual FORSU_D recibido. El valor de este canon se fija un 20 % por debajo del canon que actualmente solicita la empresa LIME a los municipios del Gran Mendoza, quien gestiona el relleno sanitario de El Borbollón; el cual es de \$ 300 por tonelada, contemplando solo su disposición final por entierro y sin considerar los costos de transporte hacia el sitio (gasto a cargo de los municipios). Con todas estas consideraciones, el ingreso anual en concepto de tratamiento y disposición final asciende a \$ 7.200.000,00 (\equiv us\$ 454.688,98); correspondiente a \$ 240/t FORSU_D y 30.000 t FORSU_D/año.

El ingreso anual por venta de energía eléctrica se considera constituido por el producto de la potencia instalada de generación eléctrica³² de 1,47 MW_{el} (de aquí en más se supone que toda la potencia y energía que se menciona es de carácter eléctrica), por un factor de planta o de capacidad del 85 % (correspondiente a 7.446 h/año) que constituye una oferta de 10.945,62 MWh (lo que en el contexto de los valores

³² La potencia mínima requerida para la tecnología de biogás, en el RenovAr, es de 1 MW.

publicados en el último informe anual, resumen del año 2016, por el Ente Provincial Regulador Eléctrico, corresponde a un 0,19 % de la demanda eléctrica anual de la Provincia de Mendoza; cuya participación en la Región Cuyo³³ fue del 72,02 %), por el valor de venta de cada MWh a la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA) de 152,82 us\$/MWh; considerando que el valor pactado corresponde a la media de los precios adjudicados en la Ronda 1 del Programa RenovAr³⁴, referido a los 6 proyectos de generación de energía eléctrica a partir de tecnología de metanización o biogás cuyas potencias instaladas están en el orden de lo analizado puntualmente en nuestro caso (1,2 MW – 2,0 MW). El cálculo anterior arroja un resultado de 1.672.673,16 us\$/año en concepto de venta de energía eléctrica. A su vez, el precio de la energía tiene dos factores de ajuste anual; un ajuste prefijado con una tasa de incremento anual del 1,7 %, que arroja el esquema de factor de ajuste anual (durante los 20 años considerados) que se muestra en la Figura 13; y otro ajuste llamado “factor incentivo” que tiene carácter decreciente a medida que transcurren los años calendario (desde inicios de 2017 hasta fines de 2038; lo que pretende promover la rápida incorporación de potencia en renovables), según la Gráfico 5. Se considera que el llamado “factor incentivo” tiene un valor medio de 1 (uno) cuando se toma la variación total durante todo el periodo evaluado.

³³ Región conformada en este caso por las provincias de San Juan y Mendoza.

³⁴ <https://www.minem.gob.ar/www/833/25871/precios-adjudicados-del-programa-renovar.html>

AJUSTE DE PRECIO

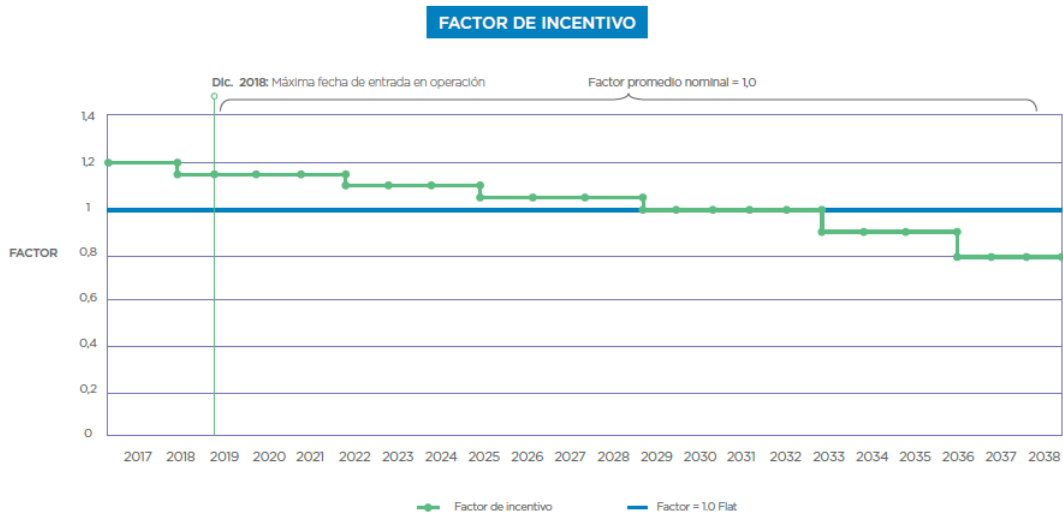
FACTOR DE AJUSTE ANUAL

AÑO DE PRODUCCIÓN	FACTOR DE AJUSTE ANUAL
1	1.0171
2	1.0344
3	1.0521
4	1.0701
5	1.0883
6	1.1069
7	1.1258
8	1.1450
9	1.1646
10	1.1845
11	1.2047
12	1.2253
13	1.2462
14	1.2675
15	1.2891
16	1.3111
17	1.3335
18	1.3563
19	1.3794
20	1.4030

Figura 12: Evolución del factor de ajuste de precio, de acuerdo a los años transcurridos de operación/producción.
 (Fuente: Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina,
https://www.minem.gob.ar/servicios/archivos/6548/AS_14695676441.pdf)

AJUSTE DE PRECIO

FACTOR DE INCENTIVO



* Mayores incentivos en los primeros 2 años (variación semestral), luego descenso más agresivo

Gráfico 5: Evolución del “factor de incentivo” de ajuste de precio, de acuerdo a los años calendario transcurridos de inicio del 2017 hasta fines del 2038. (Fuente: Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina, https://www.minem.gob.ar/servicios/archivos/6548/AS_14695676441.pdf)

Solo a fin de tener una dimensión del proyecto, en cuanto a su capacidad de generación de energía eléctrica, el aporte anual esperado por la planta (10.945,62 MWh), es comparable a la energía generada por la Central Hidroeléctrica Gral. San Martín (11.373 MWh) o la suma de los Pequeños Aprovechamientos Hidráulicos CT Mendoza y La Lujanita (6.837 MWh + 4.441 MWh); registrada en el año 2016³⁵. No debe perderse de vista que, si bien el factor generación-venta de energía (cuyo aporte a la matriz de generación provincial es pequeño) es el que hace viable económicamente el proyecto, el foco del problema que se pretende abordar es la mejora en la disposición final de una fracción mayoritaria de los RSU, y no el aporte a la seguridad energética en sí mismo.

En el flujo de fondos se contempla que a causa del proceso de puesta en régimen del sistema, la cantidad de material FORSU_D a tratar será del 80 %, durante el año 1 del proyecto (el año de construcción se toma como el momento cero), representando a su vez una generación eléctrica del 70 % con respecto a lo considerado para el resto de los años.

5.1.7. Estructura de financiamiento

Se considera que el origen de los fondos pertenece a capital privado, obtenidos a través de un préstamo otorgado por un ente de financiamiento internacional, por el total del valor de la inversión.

La principal característica de las tecnologías de aprovechamiento energético de fuentes renovables es que su viabilidad (su tarifa) está condicionada por su alto costo de inversión y por la tasa de interés con la que se financian los proyectos. Es por ello que uno de los hechos determinantes para el desarrollo de las renovables en nuestro país pasa por haber resuelto la situación de default con la que se convivió los últimos años, junto con la promulgación y reglamentación de la Ley Nacional 27.191 en el año 2016 (modificatoria de la Ley Nacional 26190 del 2006) con la cual se fijan pautas claras para el fomento de las inversiones privadas en el sector.

Otro de los mecanismos que se crean por medio de la mencionada Ley, y que pretende servir de respaldo a la inversión extranjera, es un fondo fiduciario específico por sector, el Fondo Fiduciario para el Desarrollo de Energías Renovables o FODER. Dicho fondo otorga garantías de pago para todos los contratos de compra de energía

³⁵ Datos del Informe Anual 2016 publicado por el EPRE
(http://www.epremendoza.gov.ar/a_adjuntos/Inf_Demanda_Cuyo_ANUAL_2016.pdf)

ofertados (PPA), además de proveer asistencia para el financiamiento de proyectos. La cuenta de financiamiento del fondo para el proyecto recibe los aportes del Tesoro Nacional, ofertas públicas, de organismos de la Administración Nacional de Seguridad Social (ANSES) y multilaterales. La cuenta se utilizará para otorgar préstamos para proyectos a largo plazo, subsidios a las tasas de interés y realizar aportes de capital a las compañías con proyectos para la generación de energías renovables. El FODER es un fideicomiso administrado por el Banco de Inversión y Comercio Exterior de Argentina (BICE).

Aún teniendo en cuenta todo lo anterior, nuestro país sigue teniendo dificultades para el acceso al financiamiento internacional, debido a nuestro vasto historial de vaivenes económicos. Es por eso que existen no pocas iniciativas del Gobierno Nacional de generación de acuerdos que atraigan inversiones, como es el caso del acuerdo gestionado a través de la cartera del Ministerio de Energía y Minería en enero de este año, por el que mediante el Banco Interamericano de Desarrollo a través de la Corporación Interamericana de Inversiones, se acordó un préstamo de us\$ 130 millones con el Green Climate Fund (GCF), destinado a los adjudicatarios del Programa RenovAr. Si bien el monto es bajo, en comparación con los 2.400 MW adjudicados en la primera ronda, por un monto de inversión de us\$ 4.000 millones, se trata del primer crédito que el GCF aprueba para Argentina desde su creación y el más alto que la entidad de fomento ha destinado a un país hasta el momento; según Guido Gubinelli de la revista virtual Energía Estratégica³⁶. Las características principales de este préstamo son: tasa preferencial del 3 %, a pagar en 15 a 18 años, 2,5 años de gracia, pero destinado solo a proyectos con una inversión no menor a los us\$ 15 ó 20 millones.

De acuerdo con todo lo anteriormente mencionado, para el proyecto en cuestión, se toma la decisión de trabajar con una tasa del 4,5 %, a pagar en 18 años, sobre el monto total de la inversión. Lo que puede considerarse un muy buen acuerdo, dado el contexto.

5.1.8. Depreciaciones

Se tomará en consideración un cálculo de depreciaciones en base al monto de inversión en el sistema Dranco y los sistemas complementarios; con un valor residual del 25 % y una vida útil equivalente al horizonte del proyecto, de 21 años.

³⁶ <http://www.energiaestrategica.com/credito-us-130-millones-destinado-al-renovar-apunta-solo-grandes-proyectos/>

5.1.9. Tasa de descuento

Esta es la tasa que representa al costo de oportunidad. Es la tasa de interés mínima que el inversor estaría dispuesto a obtener al invertir en el proyecto; en otras palabras, es la rentabilidad mínima que se le exige a la inversión.

Para la evaluación del proyecto se fijó una tasa de descuento del 10 %.

5.1.10. Beneficios programa RenovAr

Sin duda que el mayor de los beneficios del programa se refiere al contrato a término por la compra del 100 % de la energía generada, pero a esto debieran sumarse los incentivos fiscales que el mismo contempla, a saber:

- Exención de aranceles a la importación de equipos, partes, repuestos, componentes y materias primas (solo para importaciones realizadas hasta el 31/12/2017).
- Amortización acelerada.
- Devolución anticipada de IVA.
- Exención del Impuesto a las Ganancias Mínimas Presuntas.
- Exención del Impuesto a los Dividendos ante la reinversión en infraestructura.
- Dedución de la carga financiera en el Impuesto a las Ganancias.
- Certificado Fiscal (sujeto a acreditación de componente nacional y transferible a terceros).

No obstante, no se han incluido todos estos beneficios en el estudio en cuestión, ya que varios de ellos actualmente se encuentran sujetos a evaluaciones y redefiniciones técnicas. Solo se ha considerado la exención de aranceles de importación (ya que se espera efectuar todas las operaciones antes de la fecha límite) y la devolución anticipada de IVA; esto último a efectuarse por el 100 % del valor, durante el tercer período fiscal (año 2 del proyecto).

No se han considerado reducciones en el Impuesto a las Ganancias (33 % del valor de Utilidad).

Esta decisión de incrementar la participación de renovables en la matriz nacional ocurre en un momento muy especial a nivel mundial, dado que luego de haberse logrado el Acuerdo de París en Diciembre de 2015, el cual busca limitar el aumento de la temperatura global a 2°C o menos para el año 2100, gran parte de los esfuerzos globales están orientados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs), mayoritariamente provenientes de la generación de energía.

A la vez, los Objetivos de Desarrollo Sostenible que fueron acordados en el seno de las Naciones Unidas, dan cuenta también de la necesidad de garantizar el acceso a fuentes confiables, sostenibles y modernas de energía para todos los habitantes del mundo, mencionando también la necesidad de aumentar el uso de fuentes renovables.

5.1.11. Indicadores de resultado

Se opta por el empleo de los siguientes indicadores de resultado para la evaluación del proyecto:

- Valor Actual Neto (VAN).
- Tasa Interna de Retorno (TIR).

5.2. Resultado del flujo de fondos base

Tabla 11: Indicadores de resultado, del flujo de fondo base.

Indicador	Resultados
TIR [%]	16,45
VAN [us\$]	888.519,64

Si bien no se ha considerado como un indicador, es importante mencionar que el proyecto requiere que la empresa que lo lleve adelante cuente con un respaldo financiero equivalente al 15,8 % de la inversión inicial total; al menos para enfrentar los primeros años de su ejecución.

5.3. Sensibilización de variables

Bajo el principio del *caeteris paribus*, se evalúa el comportamiento del flujo de fondos, mediante la siguiente sensibilización de variables:

- Precio de venta de la energía equivalente al menor valor adjudicado en la Ronda 1 del Programa RenovAr (118,00 us\$/MWh), lo que se considera un criterio razonable en una próxima ronda ya que se busca que el costo de adquisición tienda a la baja.

Tabla 12: Indicadores de resultado, con un precio menor de venta de energía eléctrica; de 118,00 us\$/MWh.

Indicador	Resultados
TIR [%]	2,87
VAN [us\$]	- 1.305.331,21

- Menor factor de planta, del 75 % y del 80 %.

Tabla 13: Indicadores de resultado, con un menor factor de planta o de capacidad; del 75 % y del 80 %.

Indicador	Resultados (75 %)	Resultados (80 %)
TIR [%]	8,47	12,14
VAN [us\$]	- 246.263,03	319.128,30

- Tasa de interés por el financiamiento del 3,5 % y del 5 %.

Tabla 14: Indicadores de resultado, con una variación de la tasa de interés por el financiamiento de la inversión; del 3,5 % y del 5 %.

Indicador	Resultados (3,5 %)	Resultados (5 %)
TIR [%]	40,15	9,79
VAN [us\$]	2.516.207,45	- 36.600,00

- Plazo del crédito por el financiamiento de 15 años.

Tabla 15: Indicadores de resultado, con una reducción en el plazo de devolución del crédito por el financiamiento de la inversión; plazo de 15 años.

Indicador	Resultados (*)
TIR [%]	15,81
VAN [us\$]	1.138.885,37

(*) Respaldo financiero equivalente al 17 % de la inversión total.

Tal y como se manifiesta en este estudio de sensibilización, el carácter capital-intensivo de este tipo de tecnologías, requiere que se sigan promoviendo políticas que permitan el acceso al crédito, con menores tasas y plazos acordes. Puede apreciarse claramente que una variación favorable de estos factores es la clave para obtener proyectos viables y con un precio por venta de energía competitivo; lo que redundará en un beneficio integral para la economía en general.

Si, por ejemplo, se trabajara con una tasa del 3 % por el financiamiento, en un plazo a 18 años, aún con un precio de venta de la energía de 105,00 us\$/MWh, se podrían obtener los siguientes resultados:

Tabla 16: Indicadores de resultado, con una tasa del 3 % por el financiamiento de la inversión, plazo de 18 años y un precio de venta de la energía de 105,00 us\$/MWh.

Indicador	Resultados (*)
TIR [%]	12,22
VAN [us\$]	229.528,74

(*) Respaldo financiero equivalente al 12,6 % de la inversión total.

Se remarca nuevamente que no se han considerado los aportes de una posible operación de venta de la energía térmica cogenerada en el proceso.

5.4. Aspectos económicos del proyecto

Es importante destacar algunos aspectos económicos del proyecto, que si bien no se reflejan en el estudio financiero, constituyen un válido aporte a la economía provincial:

- Disminución de emanaciones de gases con alto potencial de efecto invernadero.
- Valorización energética de residuos.
- Generación de empleo.
- Aporte a la diversificación de la matriz energética.
- Desarrollo tecnológico.
- Es un proyecto que cuadra en el concepto de generación distribuida, como alternativa de inyección a red en punta de línea de pequeñas comunidades.
- Mejora general de la calidad de vida de los habitantes.
- Mejora en la imagen de la gestión pública.

6. COMENTARIOS FINALES

Como se mencionó desde el principio, el objetivo principal de este trabajo es el de presentar una alternativa tecnológica para el tratamiento de una corriente residual específica y de gran importancia dada su participación mayoritaria en lo que a los RSU respecta. El estudio de ella y los resultados preliminares presentados darían cuenta de que se trataría de una opción factible de aplicar a un sistema integrado de gestión de RSU en nuestra provincia; lo que no quiere decir que sea la única ni la mejor de todas, sino que preliminarmente valdría la pena hacer una evaluación más profunda y con datos de entrada de mayor calidad.

En cuanto a los aspectos puramente técnicos, se considera oportuno abordar seriamente la investigación acerca de las tecnologías de metanización de 3^{ra} Generación, ya que permitiría alcanzar una optimización del proceso, mejorando la etapa de estabilización del digestato y haciendo quizás innecesaria la construcción de la planta de tratamiento de efluentes. Esto debe complementarse con el estudio de otras tecnologías alternativas tales como la valorización energética por combustión directa, de modo de poder tener información suficiente para efectuar tomas de decisiones a nivel gestión pública.

El rumbo estratégico actualmente tomado a nivel Nacional hace factible este tipo de proyectos, desde un punto de vista económico-financiero, aunque no debe perderse de vista que evidentemente el verdadero valor de la valorización de residuos yace en la reducción del volumen de materiales a ser enterrados o confinados, y por ende en la reducción de superficie destinada a tal fin, y en evitar que se liberen grandes cantidades de GEI.

No se puede dejar de mencionar que el desarrollo de una estrategia de GIRSU debe contemplar la integración de los actores sociales vulnerables que actualmente encuentran en los RSU un modo de sustento.

7. BIBLIOGRAFÍA

Allende, D. G.; Benítez, R. A. (2016). *La calidad de aire en el Área Metropolitana de Mendoza. Aportes para su gestión pública local*. Publicado en la Plataforma de información para políticas públicas de la Universidad Nacional de Cuyo. URL del artículo: <http://www.politicaspublicas.uncu.edu.ar/articulos/index/la-calidad-de-aire-en-el-area-metropolitana-de-mendoza-aportes-para-su-gestion-publica-local>. (Fecha de consulta: 05/07/2017)

Allende, D.; Ruggeri, M. F.; Pescetti, E. y Puliafito, S. E. (2015) *Quema de Residuos Sólidos Urbanos y Calidad de Aire en el Gran Mendoza*. Octavo Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería EnIDI 2015, Los Reyunos, San Rafael, Mendoza, Argentina.

Buswell, A. M. y Hatfield, W. D. (1939). *Anaerobic Fermentations*. Division of the State Water Survey, Bolletín N° 32. Urbana, Illinois, USA.

Castells, X. (2005). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*. Ediciones Díaz de Santos y Fundación Universitaria Iberoamericana. España. 1228 p.

De Baere, L. y Mattheeuws, B. (2015). *Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe – Status, Experience and Prospects*-. (Fuente: <http://www.ows.be/wp-content/uploads/2013/02/Anaerobic-digestion-of-the-organic-fraction-of-MSW-in-Europe.pdf> ; diciembre de 2016)

Eder, B. y Schulz, H. (2006). *Biogas Praxis, Grundlagen-Planung-Anlagenbau-Beispiele-Wirtschaftlichkeit-Umwelt*. Ediciones Ökobuch. Freiburg, Alemania. 238 p.

Fundación Universidad Tecnológica Regional Mendoza y Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2004). *Resumen Ejecutivo del Proyecto “Diseño de sistema de Gestión integral de residuos Sólidos urbanos para el Área Metropolitana de Mendoza”*. Mendoza, Argentina.

Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de América. 177 p.

Gomez, F. C. (2010). *Dissertação: Biometanização Seca de Resíduos Sólidos Urbanos. Estado da Arte e Análise Crítica das Principais Tecnologias*. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. 215 p.

Martín, I.; Salcedo, R.; Font, R. (2011). Apunte: *Mecánica de Fluidos. Tema 2: Impulsión de fluidos*. Universidad de Alicante. España.

McCabe, W.; Smith, J.; Harriott, P. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química (cuarta edición)*. Mc Graw-Hill. 1112 p.

Pérez, A. y Torres, P. (2008). *Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables*. Ingeniería y Competitividad, Volumen 10, Nº 2, pág. 41 – 52.

PROBIOGAS. (2015). *RSU: O Estado da Arte da Tecnologia da Metanização Seca. Série Aproveitamento Energético de Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos. 1ª Edição*. Ministério das Ciudades, Brasilia. 95 p.

Puliafito, S. E.; Bochaca, F. R.; Allende, D. G. y Fernandez, R. P. (2013) *Green Areas and Microscale Thermal Comfort in Arid Environments: A Case Study in Mendoza, Argentina*. Atmos. Clim. Sci., vol. 3, no. 3, pp. 372–384, 2013.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2005) *Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos – ENGIRSU –*. Ministerio de Salud y Ambiente de la República Argentina. Septiembre de 2005.

Tchobanoglous, G.; Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. Mc Graw-Hill. 834 p.

Wellinger, A; Murphy, J y Baxter, D. (2013). *The biogas handbook: Science, production and applications*. IEA Bioenergy. Woodhead Publishing. Oxford, Cambridge, Philadelphia y Nueva Delhi. 476 p.

ANEXOS

ANEXO: Cálculo de potencia térmica demandada por el reactor

Se consideran los supuestos listados en el apartado correspondiente.

Partiendo de los datos del ANEXO: *Datos históricos (2007-2016) de temperatura de la Est. Met. Rouseil* se obtienen las siguientes temperaturas características:

- Condición INVIERNO: - 6,64 °C
- Condición VERANO: 39,06 °C
- Condición MEDIA ANUAL: 15,90 °C

Datos:

- Temperatura de digestión (rango termófilo): °Td = 50 °C = 323,15 K
- Caudal de la bomba de alimentación del reactor, considerando solo la fracción sustrato (1/7 de 58,11 m³/h): Q_{br} = 8,3014 m³/h
- Densidad del sustrato fresco: d = 750 kg/m³
- Transmitancia térmica total: U_T = 20 W/(m²*K)
- Superficie total de transferencia térmica del reactor: S = $\pi * 12,24 * 23,24 + 2 * \pi * (12,24/2)^2 = 1128,98 \text{ m}^2$
- Presión manométrica de la línea: P_m = 2 mbar
- Altitud: z = 850 msnm
- Masa de 1 mol de agua: M_m = 18 g agua/mol agua
- Cantidad de metano esperado por t de sustrato incorporado: 115,55 Nm³/t sustrato
- Proporción volumétrica del metano respecto del biogás: 0,6
- Cantidad de biogás esperado por t de sustrato incorporado: C = 115,55/0,6 = 192,58 Nm³/t sustrato
- Tasa de carga diaria de sustrato fresco al reactor: Q_{sf} = 80,96 t sustrato/día
- Calor latente de evaporación del agua a 50 °C: L = 2233,4 J/g
- Calor específico del agua: c_e = 4,186 J/(g*°C)
- Potencia bruta entregada por el sistema: PB = 4090,7 kW

Cálculos:

$$Tasa\ de\ alimentación\ al\ reactor\ por\ bombeo = Tal = Q_{br} * d * \frac{1000}{3600} = 1729,4643 \frac{g}{s}$$

La compensación de las pérdidas de calor por evaporación (P_E) es la misma para todas las condiciones climáticas evaluadas. Para su cálculo debe corregirse el caudal de generación de biogás, en función de las condiciones de presión y temperatura de generación; además se

debe obtener el valor del contenido de vapor del biogás (Sat), que es equivalente a la fracción másica de agua por m³ de biogás.

$$\begin{aligned} \text{Caudal de generación de biogás (CNPT)} &= G_{cnpt} = Q_{sf} * C * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \\ &= 0,1805 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \end{aligned}$$

$$\text{Presión atmosférica} = P_{atm} = 1013,25 * \left(\frac{293 - 0,0065 * z}{293} \right)^{5,26} = 916,7045 \text{ mbar}$$

$$\text{Presión absoluta de línea} = P_{abs} = P_{atm} + P_m = 918,7045 \text{ mbar}$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal de generación de biogás (corregido)} &= G_{corr} = \frac{G_{cnpt} * 1013,25 * {}^{\circ}Td(abs)}{273,15 * P_{abs}} \\ &= 0,2355 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \end{aligned}$$

Se considera que el biogás generado tiene una humedad relativa del 100 %,

$$\text{Presión de saturación} = P_{sat} = 6,1078 * e^{\frac{17,269 * {}^{\circ}Td}{{}^{\circ}Td + 237,3}} = 123,3421 \text{ mbar}$$

$$\text{Fracción molar del agua} = Y_{agua} = \frac{P_{sat}}{P_{abs}} = 0,1343 \frac{\text{mol agua}}{\text{mol biogás}}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de 1 mol de biogás en las condiciones de generación} &= V_{mol} \\ &= \frac{1 * 83,14462 * {}^{\circ}Td(abs)}{P_{abs}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0,0292 \frac{\text{m}^3}{\text{mol biogás}} \end{aligned}$$

$$\text{Contenido de vapor del biogás} = Sat = \frac{M_m * Y_{agua}}{V_{mol}} = 82,6315 \frac{\text{g agua}}{\text{m}^3 \text{ biogás}}$$

$$\begin{aligned} \text{Compensación de las pérdidas de calor por evaporación} &= P_E = G_{corr} * L * Sat \\ &= 43454,1 \text{ W} \end{aligned}$$

CONDICIÓN INVIERNO

Diferencia de temperatura entre el contenido del reactor y el sustrato fresco ingresante
 $= \Delta T = 50^{\circ}\text{C} - (-6,64^{\circ}\text{C}) = 56,64^{\circ}\text{C}$

$$\text{Potencia de calefacción} = P_S = Tal * c_e * \Delta T = 410047,4 \text{ W}$$

Diferencia de temperatura entre el interior del reactor y el ambiente exterior = $\Delta^{\circ}T'$
= $50^{\circ}\text{C} - (-6,64^{\circ}\text{C}) = 56,64^{\circ}\text{C}$

$$\text{Compensación de las pérdidas de calor por radiación} = P_R = S * U_T * \Delta^{\circ}T' \\ = 12789,1 \text{ W}$$

$$\text{Potencia térmica demandada total} = P_T = P_S + P_R + P_E = 466290,7 \text{ W} \\ \cong 466,3 \text{ kW}$$

$$\text{Demanda térmica respecto de la potencia bruta} = \frac{P_T}{P_B} = 11,4 \%$$

CONDICIÓN VERANO

Diferencia de temperatura entre el contenido del reactor y el sustrato fresco ingresante
= $\Delta^{\circ}T = 50^{\circ}\text{C} - 39,06^{\circ}\text{C} = 10,94^{\circ}\text{C}$

$$\text{Potencia de calefacción} = P_S = Tal * c_e * \Delta^{\circ}T = 79200,5 \text{ W}$$

Diferencia de temperatura entre el interior del reactor y el ambiente exterior = $\Delta^{\circ}T'$
= $50^{\circ}\text{C} - 39,06^{\circ}\text{C} = 10,94^{\circ}\text{C}$

$$\text{Compensación de las pérdidas de calor por radiación} = P_R = S * U_T * \Delta^{\circ}T' \\ = 2470,2 \text{ W}$$

$$\text{Potencia térmica demandada total} = P_T = P_S + P_R + P_E = 125124,9 \text{ W} \\ \cong 125,1 \text{ kW}$$

$$\text{Demanda térmica respecto de la potencia bruta} = \frac{P_T}{P_B} = 3,1 \%$$

CONDICIÓN MEDIA ANUAL

Diferencia de temperatura entre el contenido del reactor y el sustrato fresco ingresante
= $\Delta^{\circ}T = 50^{\circ}\text{C} - 15,90^{\circ}\text{C} = 34,10^{\circ}\text{C}$

$$\text{Potencia de calefacción} = P_S = Tal * c_e * \Delta^{\circ}T = 246868,2 \text{ W}$$

Diferencia de temperatura entre el interior del reactor y el ambiente exterior = $\Delta^{\circ}T'$
= $50^{\circ}\text{C} - 15,90^{\circ}\text{C} = 34,10^{\circ}\text{C}$

$$\text{Compensación de las pérdidas de calor por radiación} = P_R = S * U_T * \Delta^{\circ}T' \\ = 7699,7 \text{ W}$$

$$\text{Potencia térmica demandada total} = P_T = P_S + P_R + P_E = 298022,0 \text{ W} \\ \cong 298,0 \text{ kW}$$

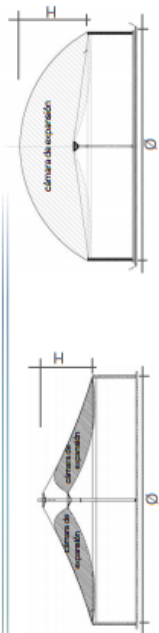
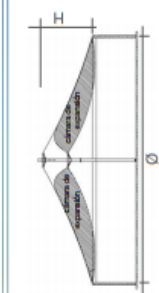
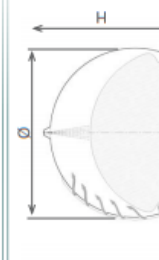
$$\text{Demanda térmica respecto de la potencia bruta} = \frac{P_T}{P_B} = 7,3 \%$$

ANEXO: Catálogo de caños y tuberías de conducción normalizadas

ANTONIO GRIEGO & CIA. S.A.																																
Av. SAENZ 621 - CAPITAL																																
Tel.: 91-9205/09 - 7017 - 7064 - 7937																																
TABLAS DE PESOS. TEORICOS (PESO POR METRO)																																
TUBOS ESTRUCTURALES																																
Sección Circular Exterior	Sección Cuadrada	SECCION RECTANGULAR				ESPEORES																										
		mm	Pulgadas	mm	mm	0,90	1,25	1,41	1,59	1,80	2,00	2,25	2,50	2,85	3,20	3,55	4,00	4,75	5,15	6,35												
5/8	15,87	12 x 12	20 x 10	20 x 15	20 x 20	0,33	0,45	0,50	0,58	0,62	0,64	0,68	0,76	0,84	0,90	0,99	1,08	1,15	1,28	1,58	2,03	2,25	2,47	2,75	3,02	3,25	3,58	3,99	4,37	5,11		
3/4	19,05	15 x 15	20 x 10	20 x 15	20 x 20	0,40	0,54	0,61	0,69	0,76	0,84	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,80	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,13	4,61	5,40	
1	25,40	20 x 20	20 x 10	20 x 15	20 x 20	0,54	0,74	0,83	0,94	1,04	1,15	1,28	1,41	1,58	1,76	1,95	2,15	2,35	2,55	2,85	3,20	3,55	3,91	4,28	4,68	5,14	5,60	6,15	6,80	7,65	8,70	
1 1/4	31,75	25 x 25	30 x 20	30 x 25	30 x 30	0,68	0,94	1,05	1,19	1,33	1,46	1,63	1,80	2,03	2,25	2,47	2,75	3,02	3,25	3,58	3,99	4,37	4,75	5,11	5,55	6,00	6,50	7,05	7,65	8,30	9,05	
1 1/2	38,10	30 x 30	40 x 30	40 x 35	40 x 40	0,82	1,10	1,27	1,44	1,61	1,78	1,99	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,13	4,61	5,11	5,60	6,15	6,70	7,30	7,90	8,55	9,25	10,00	10,80	
1 3/4	44,45	35 x 35	40 x 30	40 x 35	40 x 40	1,00	1,33	1,49	1,69	1,89	2,09	2,34	2,58	2,82	3,07	3,31	3,55	3,80	4,13	4,61	5,11	5,60	6,15	6,70	7,30	7,90	8,55	9,25	10,00	10,80	11,65	
2	50,80	40 x 40	50 x 30	50 x 35	50 x 40	1,25	1,71	1,94	2,17	2,40	2,59	2,89	3,20	3,51	3,81	4,13	4,45	4,78	5,11	5,55	6,00	6,50	7,05	7,65	8,30	8,95	9,65	10,40	11,20	12,05	12,90	
2 1/4	57,15	45 x 45	50 x 40	50 x 45	50 x 50	1,52	1,93	2,19	2,45	2,72	3,01	3,37	3,81	4,25	4,69	5,14	5,60	6,06	6,53	7,00	7,50	8,00	8,55	9,10	9,65	10,20	10,80	11,40	12,05	12,70	13,40	
2 1/2	63,50	50 x 50	60 x 40	60 x 45	60 x 50	1,82	2,15	2,44	2,73	3,03	3,39	3,78	4,26	4,75	5,24	5,74	6,24	6,74	7,24	7,74	8,24	8,74	9,24	9,74	10,24	10,74	11,24	11,74	12,24	12,74	13,24	
3	69,85	55 x 55	70 x 50	70 x 55	70 x 60	2,11	2,38	2,69	3,02	3,34	3,75	4,15	4,70	5,26	5,80	6,35	6,90	7,45	8,00	8,55	9,10	9,65	10,20	10,74	11,24	11,74	12,24	12,74	13,24	13,74	14,24	14,74
3 1/2	76,20	60 x 60	80 x 60	80 x 65	80 x 70	2,41	2,60	2,94	3,29	3,65	4,10	4,54	5,15	5,76	6,36	6,96	7,56	8,16	8,76	9,36	9,96	10,56	11,16	11,76	12,36	12,96	13,56	14,16	14,76	15,36	15,96	16,56
4	82,55	65 x 65	85 x 80	85 x 85	85 x 90	2,71	2,85	3,24	3,61	3,99	4,50	4,95	5,60	6,15	6,70	7,25	7,80	8,35	8,90	9,45	10,00	10,55	11,10	11,65	12,20	12,75	13,30	13,85	14,40	14,95	15,50	16,05
4 1/2	88,90	70 x 70	90 x 90	90 x 95	90 x 100	3,01	3,15	3,58	3,94	4,31	4,90	5,35	6,10	6,65	7,20	7,75	8,30	8,85	9,40	9,95	10,50	11,05	11,60	12,15	12,70	13,25	13,80	14,35	14,90	15,45	16,00	16,55
5	95,25	75 x 75	100 x 100	100 x 105	100 x 110	3,31	3,45	3,93	4,29	4,65	5,30	5,75	6,60	7,15	7,70	8,25	8,80	9,35	9,90	10,45	11,00	11,55	12,10	12,65	13,20	13,75	14,30	14,85	15,40	15,95	16,50	17,05
5 1/2	101,60	80 x 80	110 x 110	110 x 115	110 x 120	3,61	3,75	4,27	4,63	4,99	5,70	6,15	7,10	7,65	8,20	8,75	9,30	9,85	10,40	10,95	11,50	12,05	12,60	13,15	13,70	14,25	14,80	15,35	15,90	16,45	17,00	17,55
6	107,95	85 x 85	120 x 120	120 x 125	120 x 130	3,91	4,05	4,61	4,97	5,33	6,10	6,55	7,60	8,15	8,70	9,25	9,80	10,35	10,90	11,45	12,00	12,55	13,10	13,65	14,20	14,75	15,30	15,85	16,40	16,95	17,50	18,05
6 1/2	114,30	90 x 90	130 x 130	130 x 135	130 x 140	4,21	4,35	4,95	5,31	5,67	6,50	6,95	8,10	8,65	9,20	9,75	10,30	10,85	11,40	11,95	12,50	13,05	13,60	14,15	14,70	15,25	15,80	16,35	16,90	17,45	18,00	18,55
7	120,65	95 x 95	140 x 140	140 x 145	140 x 150	4,51	4,65	5,27	5,63	5,99	6,90	7,35	8,60	9,15	9,70	10,25	10,80	11,35	11,90	12,45	13,00	13,55	14,10	14,65	15,20	15,75	16,30	16,85	17,40	17,95	18,50	19,05
7 1/2	127,00	100 x 100	150 x 150	150 x 155	150 x 160	4,81	4,95	5,61	5,97	6,33	7,30	7,75	9,10	9,65	10,20	10,75	11,30	11,85	12,40	12,95	13,50	14,05	14,60	15,15	15,70	16,25	16,80	17,35	17,90	18,45	19,00	19,55
8	133,35	105 x 105	160 x 160	160 x 165	160 x 170	5,11	5,25	5,93	6,29	6,65	7,70	8,15	9,60	10,15	10,70	11,25	11,80	12,35	12,90	13,45	14,00	14,55	15,10	15,65	16,20	16,75	17,30	17,85	18,40	18,95	19,50	20,05
8 1/2	139,70	110 x 110	170 x 170	170 x 175	170 x 180	5,41	5,55	6,25	6,61	6,97	8,10	8,55	10,10	10,65	11,20	11,75	12,30	12,85	13,40	13,95	14,50	15,05	15,60	16,15	16,70	17,25	17,80	18,35	18,90	19,45	20,00	20,55
9	146,05	115 x 115	180 x 180	180 x 185	180 x 190	5,71	5,85	6,57	6,93	7,29	8,50	8,95	10,60	11,15	11,70	12,25	12,80	13,35	13,90	14,45	15,00	15,55	16,10	16,65	17,20	17,75	18,30	18,85	19,40	19,95	20,50	21,05
9 1/2	152,40	120 x 120	190 x 190	190 x 195	190 x 200	6,01	6,15	6,89	7,25	7,61	8,90	9,35	11,10	11,65	12,20	12,75	13,30	13,85	14,40	14,95	15,50	16,05	16,60	17,15	17,70	18,25	18,80	19,35	19,90	20,45	21,00	21,55
10	158,75	125 x 125	200 x 200	200 x 205	200 x 210	6,31	6,45	7,21	7,57	7,93	9,30	9,75	11,60	12,15	12,70	13,25	13,80	14,35	14,90	15,45	16,00	16,55	17,10	17,65	18,20	18,75	19,30	19,85	20,40	20,95	21,50	22,05
10 1/2	165,10	130 x 130	210 x 210	210 x 215	210 x 220	6,61	6,75	7,53	7,89	8,25	9,70	10,15	12,10	12,65	13,20	13,75	14,30	14,85	15,40	15,95	16,50	17,05	17,60	18,15	18,70	19,25	19,80	20,35	20,90	21,45	22,00	22,55
11	171,45	135 x 135	220 x 220	220 x 225	220 x 230	6,91	7,05	7,85	8,21	8,57	10,10	10,55	12,60	13,15	13,70	14,25	14,80	15,35	15,90	16,45	17,00	17,55	18,10	18,65	19,20	19,75	20,30	20,85	21,40	21,95	22,50	23,05
11 1/2	177,80	140 x 140	230 x 230	230 x 235	230 x 240	7,21	7,35	8,17	8,53	8,89	10,50	10,95	13,10	13,65	14,20	14,75	15,30	15,85	16,40	16,95	17,50	18,05	18,60	19,15	19,70	20,25	20,80	21,35	21,90	22,45	23,00	23,55

TUBOS ASTM - A - 53																			
DIAMETRO NOMINAL	DIAMETRO EXTERIOR	NUMERO DE "SCHEDULE" (CEDULA)																	
		20	30	40	60	80	100	120	140	160	180	200	240	280					
Pulg.	mm	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m
1/8	10,3	17,3	0,36	2,41	0,46	3,02	0,80	3,20	1,10	3,73	1,62	4,85	2,20	5,68	2,69	6,50	3,00	7,32	3,25
1/4	13,7	22,4	0,63	3,20	1,10	3,91	2,19	4,55	3,23	5,08	5,41	5,54	7,48	7,01	11,41	7,62	15,27	8,08	16,62
3/8	17,1	23,1	0,85	3,20	1,10	3,91	2,19	4,55	3,23	5,08	5,41	5,54	7,48	7,01	11,41	7,62	15,27	8,08	16,62
1/2	21,3	27,7	1,27	3,73	1,62	3,91	2,19	4,55	3,23	5,08	5,41	5,54	7,48	7,01	11,41	7,62	15,27	8,08	16,62
3/4	26,7	28,7	1,68	3,91	2,19	4,55	3,23	5,08	5,41	5,54	7,48	7,01	11,41	7,62	15,27	8,08	16,62	8,08	16,62
1	32,4	3,08	2,50	4,85	3,23	5,08	5,41	5,54	7,48	7,01	11,41	7,62	15,27	8,08	16,62	8,08	16,62	8,08	16,62
1 1/4	42,2	3,58	3,38	4,85	3,23	5,08	5,41	5,54	7,48	7,01	11,41	7,62	15,27	8,08	16,62	8,08	16,62	8,08	16,62
1 1/2	48,3	3,68	4,05	5,08	5,41	5,54	7,48	7,01	11,41	7,62	15,27	8,08	16,62	8,08	16,62	8,08	16,62	8,08	16,62

ANEXO: Catálogo gasómetros de membrana

designación del tipo	capacidad efectiva	diámetro/altura		presión máxima [mbar]
		Ø	H	
89 108/205	50 m³	4,9 m	3,7 m	50
89 109/205	70 m³	5,5 m	4,1 m	50
89 110/205	100 m³	6,1 m	4,6 m	50
89 111/205	130 m³	6,8 m	5,1 m	50
89 112/205	170 m³	7,4 m	5,5 m	50
89 113/205	210 m³	8,0 m	6,0 m	50
89 114/205	270 m³	8,6 m	6,5 m	50
89 115/205	330 m³	9,2 m	6,9 m	49
89 116/205	400 m³	9,8 m	7,4 m	46
89 117/205	480 m³	10,4 m	7,8 m	43
89 118/205	570 m³	11,1 m	8,3 m	40
89 119/205	670 m³	11,7 m	8,8 m	38
89 116/250	780 m³	12,6 m	9,5 m	35
89 117/250	1.040 m³	13,4 m	10,1 m	33
89 118/250	1.190 m³	14,2 m	10,7 m	31
89 119/250	1.350 m³	15,0 m	11,2 m	29
89 120/250	1.530 m³	15,8 m	11,8 m	27
89 121/250	1.920 m³	16,6 m	12,4 m	26
89 122/250	2.150 m³	17,2 m	12,9 m	25
89 123/250	2.380 m³	18,1 m	13,6 m	23
89 124/250	2.640 m³	18,9 m	14,2 m	22
89 125/250	3.200 m³	19,7 m	14,7 m	21
89 126/250	3.510 m³	20,4 m	15,3 m	20
89 127/250	3.840 m³	21,1 m	15,9 m	20
89 128/250	4.560 m³	22,0 m	16,5 m	19
89 129/250	4.950 m³	22,8 m	17,1 m	18
89 130/250	5.360 m³	23,5 m	17,6 m	17

diámetro	altura de los depósitos	Capacidad efectiva	presión máxima	23°		40°		cuarto de esfera		semiesfera	
				presión máxima	Capacidad efectiva	presión máxima	Capacidad efectiva	presión máxima	Capacidad efectiva	presión máxima	Capacidad efectiva
10	2,1	59	4,2	89	2,5	95	30	5,0	230	40	
11	2,3	79	4,6	130	2,8	127	22	5,5	310	28	
12	2,5	104	5,0	178	3,0	165	22	6,0	400	28	
13	2,8	118	5,5	232	3,3	210	22	6,5	510	28	
14	3,0	145	5,9	285	3,5	260	22	7,0	640	28	
15	3,2	171	6,3	343	3,8	320	22	7,5	790	28	
16	3,4	198	6,7	414	4,0	380	16	8,0	960	20	
17	3,6	236	7,1	498	4,3	470	16	8,5	1150	20	
18	3,8	281	7,6	581	4,5	550	16	9,0	1370	20	
19	4,0	326	8,0	678	4,8	650	16	9,5	1610	20	
20	4,2	373	8,4	774	5,0	760	16	10,0	1880	20	
21	4,5	426	8,8	880	5,3	880	12	10,5	2180	16	
22	4,7	487	9,2	985	5,5	1010	12	11,0	2500	16	
23	4,9	555	9,6	1135	5,8	1160	12	11,5	2860	16	
24	5,1	630	10,1	1284	6,0	1320	12	12,0	3250	16	
25	5,3	686	10,5	1462	6,3	1490	12	12,5	3680	16	
26	5,5	772	10,9	1609	6,5	1680	10	13,0	4140	14	
27	5,7	889	11,3	1786	6,8	1880	10	13,5	4630	14	
28	5,9	990	11,7	1963	7,0	2100	10	14,0	5170	14	
29	6,2	1077	12,2	2217	7,3	2330	10	14,5	5740	14	
30	6,4	1151	12,6	2471	7,5	2580	10	15,0	6360	14	
31	6,6	1260	13,0	2676	7,8	2850	8	-	-	-	
32	6,8	1403	13,4	2880	8,0	3130	8	-	-	-	
33	7,0	1551	13,8	3177	8,3	3430	8	-	-	-	
34	7,2	1706	14,3	3473	8,5	3760	8	-	-	-	
35	7,4	1929	14,7	3761	8,8	4100	8	-	-	-	
36	7,6	2098	15,1	4092	9,0	4460	3	-	-	-	
37	7,9	2278	15,5	4443	9,3	4840	3	-	-	-	
38	8,1	2468	15,9	4813	9,5	5250	3	-	-	-	
39	8,3	2668	16,4	5203	9,8	5670	3	-	-	-	
40	8,5	2877	16,8	5610	10,0	6120	3	-	-	-	

* Según ubicación de las membranas

Fuente: <http://www.manantial.cl/dinamicos/descargas/biogas-catalogo-1.pdf> (diciembre 2016)

ANEXO: Datos históricos (2007-2016) de temperatura de la Est. Met. Rousell

Nombre de la Estación Meteorológica: Rousell

Departamento: Maipú

Propiedad: Finca Cicero

Latitud: 33° 0'46,32" S

Longitud: 68° 44'50,39" O

Altitud: 850 msnm

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2007	36,2	24,1	12,2
02-2007	38,2	22,0	6,1
03-2007	32,7	19,3	8,0
04-2007	28,4	15,0	3,0
05-2007	21,6	8,6	-3,8
06-2007	22,3	6,9	-3,5
07-2007	22,8	5,7	-7,7
08-2007	22,3	5,5	-6,1
09-2007	32,8	13,4	-1,4
10-2007	35,1	18,2	4,1
11-2007	35,5	19,9	3,8
12-2007	38,2	22,7	7,7

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2009	38,5	23,4	10,9
02-2009	37,7	23,3	10,1
03-2009	35,5	21,8	9,7
04-2009	32,1	18,6	4,9
05-2009	27,8	11,8	-4,9
06-2009	27,3	7,9	-2,9
07-2009	22,4	6,4	-5,6
08-2009	30,0	11,6	-0,8
09-2009	26,0	10,7	-1,7
10-2009	39,3	17,3	2,3
11-2009	36,5	21,2	4,4
12-2009	31,1	20,2	10,1

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2011	37,5	23,7	0,0
02-2011	36,6	21,6	0,0
03-2011	32,9	19,3	0,0
04-2011	31,5	16,1	0,0
05-2011	25,3	10,6	-4,0
06-2011	20,3	6,9	-6,4
07-2011	26,6	6,3	-11,0
08-2011	23,2	8,3	-6,0
09-2011	32,8	14,2	-0,1
10-2011	32,5	16,6	1,4
11-2011	36,7	21,1	4,0
12-2011	36,8	23,8	8,7

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2008	38,0	23,7	10,1
02-2008	35,0	22,3	10,9
03-2008	31,3	20,1	9,4
04-2008	30,3	14,9	-0,6
05-2008	25,7	10,0	-4,3
06-2008	21,7	6,5	-4,4
07-2008	24,2	8,9	-2,3
08-2008	31,6	10,2	-2,7
09-2008	31,8	12,8	-1,4
10-2008	31,3	17,2	2,9
11-2008	35,5	22,5	6,2
12-2008	37,1	23,5	10,5

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2010	41,0	25,6	0,0
02-2010	37,9	23,1	13,3
03-2010	34,3	21,7	11,0
04-2010	26,8	14,2	1,7
05-2010	26,7	10,1	-1,3
06-2010	26,5	7,5	-3,4
07-2010	24,9	5,5	-6,2
08-2010	30,8	8,4	-5,3
09-2010	26,8	13,2	0,0
10-2010	31,1	16,8	0,0
11-2010	38,1	20,2	0,0
12-2010	38,5	22,9	0,0

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2012	40,8	25,1	0,0
02-2012	35,2	23,3	0,0
03-2012	34,6	20,7	0,0
04-2012	31,0	15,0	-1,1
05-2012	24,3	11,7	0,0
06-2012	24,0	7,3	-6,6
07-2012	20,3	5,8	-8,2
08-2012	23,7	9,3	-2,6
09-2012	29,1	14,4	-1,0
10-2012	29,8	16,8	0,0
11-2012	38,6	21,2	0,0
12-2012	42,0	23,6	0,0

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2013	37,3	24,5	0,0
02-2013	36,7	23,7	0,0
03-2013	32,6	18,5	0,0
04-2013	28,8	15,9	0,0
05-2013	24,6	11,4	-2,6
06-2013	24,6	8,8	-6,0
07-2013	23,9	6,8	-7,2
08-2013	27,3	8,2	-5,0
09-2013	33,0	10,8	-2,9
10-2013	34,6	18,1	1,8
11-2013	37,4	20,5	6,8
12-2013	36,8	25,7	11,0

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2014	41,3	25,0	7,8
02-2014	34,6	20,4	8,4
03-2014	30,3	18,1	4,1
04-2014	25,5	14,4	-0,0
05-2014	25,9	11,1	-1,3
06-2014	18,3	8,0	-3,5
07-2014	20,2	7,2	-5,6
08-2014	28,9	11,1	-3,2
09-2014	28,7	14,4	0,4
10-2014	34,7	19,4	4,3
11-2014	36,4	20,0	4,2
12-2014	37,1	22,0	5,5

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2015	37,3	24,8	8,7
02-2015	35,2	21,6	8,7
03-2015	35,7	21,5	8,2
04-2015	31,0	17,5	5,6
05-2015	24,4	12,2	-0,9
06-2015	24,6	9,5	-7,5
07-2015	19,3	7,2	-3,2
08-2015	32,1	11,5	-1,6
09-2015	27,5	13,7	0,6
10-2015	30,0	13,5	3,2
11-2015	31,4	18,3	7,5
12-2015	37,1	23,3	8,5

Parámetro: Temperatura

Fecha	Maxima	Media	Minima
01-2016	37,8	24,0	13,4
02-2016	36,8	24,4	11,8
03-2016	33,4	19,8	6,7
04-2016	28,7	14,6	2,5
05-2016	20,0	9,4	0,0
06-2016	17,4	6,7	-3,0
07-2016	21,0	6,8	-2,9
08-2016	26,1	12,2	-2,0
09-2016	29,5	13,2	-2,3
10-2016	30,7	15,3	4,3
11-2016	36,3	20,8	2,8
12-2016	38,6	22,2	8,0

Datos Anuales extraídos de la página web de la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas de la Provincia de Mendoza. (<http://www.contingencias.mendoza.gov.ar>)

Datos de entrada empleados en el cálculo de potencia térmica demandada:

- Temperatura exterior en la condición “Invierno” (media de las mínimas absolutas de cada año)= **- 6,64 °C**
- Temperatura exterior en la condición “Verano” (media de las máximas absolutas de cada año)= **39,06 °C**
- Temperatura exterior en la condición “Media Anual” (media de las temperaturas medias de cada año)= **15,90 °C**

ANEXO: Informe práctico. Analítica de Laboratorio Valoración FOS/TAC

INFORME PRÁCTICO
ANALÍTICA DE LABORATORIO
VALORACIÓN
FOS/TAC



Planta de Biogás de Wambán
Fuente: EnerCox

Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC

Una → planta de biogás funciona de la forma más eficaz cuando se agregan sustratos en cantidades totalmente adaptadas al → proceso de fermentación. Para tal fin, se debe conocer con exactitud, y documentar durante un período de tiempo prolongado, el estado exacto de la fermentación en el digestor. Esto se consigue mediante análisis de laboratorio internos periódicos, fáciles de realizar, de la → relación FOS/TAC. El usuario obtiene información exacta de las características de biodegradación del digestor y, por lo tanto, de la → producción de biogás. Toda interferencia en el proceso se puede detectar rápidamente y eliminar de forma específica. La planta se gestiona de modo más eficaz y con una mejor relación calidad-precio.



Autores:
Ulrich Lasse
- Asesor sobre biogás
- OCUA Nienburg

Petra Pöls
- Ing. Dipl. Química
- Productora de aplicación de laboratorio, HACH LANGE



UNITED FOR WATER QUALITY

2 FOS/TAC_ANALISIS

FOS/TAC: Para una evaluación fiable del proceso de fermentación



Fig. 1: El valorador TIM 840 para la determinación de FOS/TAC en la planta de biogás de Wambata.

FOS/TAC

La relación entre los ácidos orgánicos volátiles y la capacidad de compensación alcalina es una medida del riesgo de acidificación de una planta de biogás.

¿Qué es la relación FOS/TAC?

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) desarrolló el análisis de FOS/TAC a partir de un test de valoración (Método Nordmann) con el fin de disminuir el riesgo de la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación. FOS significa **F**lüchtige **O**rgani**S**che **S**äuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ac. Acético/L. TAC significa **T**ota**S** **A**no**r**ganisches **C**arbonat, es decir, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina), y se mide en mg CaCO₃/L. La relación FOS/TAC está reconocida desde hace tiempo como valor-guía para evaluar los procesos de fermentación. Permite detectar a tiempo los problemas del proceso, hasta el inminente vuelco de la fase biológica del digestor, con lo que pueden tomarse contramedidas inmediatamente.

¿Cómo se determina la relación FOS/TAC?

Bien mediante una valoración manual o, más fácil y rápidamente, con un valorador como, p. ej., el TIM 840 (véanse Fig. 1 y 4); comparado con la valoración manual, esto es más preciso y ahorra varios minutos por muestra.

Fórmula de cálculo (empírica):

Especificaciones FAL Cantidad de sustrato: 20 ml
 Ácido sulfúrico: 0,1 N (0,05 mol/l)
 TAC = Volumen de H₂SO₄ añadido desde el principio hasta pH 5 en ml x 250
 FOS = Volumen de H₂SO₄ añadido de pH 5 hasta pH 4,4 en ml x 1,66 - 0,15 x 500

Importante: Si la cantidad de sustrato o la concentración de ácido no son las arriba indicadas, debe modificarse la fórmula como correspondiente. La fórmula correcta está preprogramada en el valorador TIM 840/845 de HACH LANGU y los valores visualizados se pueden aceptar tal como son, es decir, no requieren conversión.

Fig. 2: Cálculo de la relación FOS/TAC

Realización de una medida de FOS/TAC

- Tomar una muestra representativa del sustrato de fermentación.
- Eliminar todo componente grueso de la muestra. Es crucial que la preparación de la muestra (filtro, colador de 10, colador de cocina o centrifuga) se efectúe siempre de la misma manera.
- Pesar 20 ml de sustrato y, si fuera necesario, llenar de agua destilada.
- Colocar la muestra sobre un agitador magnético y homogeneizarla continuamente durante el proceso de valoración.
- Valoración con 0,1 N H₂SO₄ hasta pH 5; anótese el volumen (ml) de ácido agregado.
- Valoración con 0,1 N H₂SO₄ hasta pH 4,4; anótese el volumen (ml) de ácido agregado.
- Calcular el FOS/TAC mediante la fórmula empírica (véase la Fig. 2).

Para medir la relación FOS/TAC con el valorador TIM 840, se echan 5 ml de la muestra preparada en un vaso de valoración provisto de una barra agitadora. A continuación se agregan 50 ml de agua destilada, se coloca el vaso debajo del electrodo de medición del TIM y se inicia la medida. Los pasos siguientes (●, ●, ●) que, en la práctica son, normalmente, algo complicados, son efectuados por el valorador. Al cabo de unos 5 minutos, la valoración (automática) ha terminado y los resultados aparecen en pantalla. Los valores TAC y FOS se calculan directamente utilizando una fórmula preprogramada. Los valores medidos se pueden almacenar en el valorador automático o transmitir a una impresora o un PC.

Determinación y uso de la relación FOS/TAC

En la práctica, una relación FOS/TAC de 0,3 a 0,4 es normal, aunque cada planta tiene su propio valor óptimo, el cual sólo puede determinarse mediante una observación a largo plazo y controles regulares, puesto que existe una fuerte dependencia del sustrato. Por ejemplo, las plantas que utilizan materias primas renovables requieren una relación FOS/TAC de 0,4 a 0,6 para que el funcionamiento sea estable.

El punto en el que la planta opera más eficientemente, es decir, en el que la producción de gas es máxima y no existe peligro de que el proceso se colapse, solamente puede determinarse probando diversas posibilidades. Un fallo de este tipo es muy costoso; varias semanas sin producción de gas y la enorme cantidad de trabajo (traslados por bombeo, vaciado del digestor, etc.) necesario para que la planta vuelva a estar operativa pueden poner en peligro la rentabilidad de todo un año.



Reglas empíricas para la evaluación de relaciones FOS/TAC
 (valores empíricos proporcionados por DEISA-Nienburg)

Valor de la relación FOS/TAC	Antecedentes	Medida
>0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la adición de biomasa
0,5-0,6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0,4-0,5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0,3-0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0,2-0,3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
<0,2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa

"A finales de 2006 pusimos en marcha nuestra planta de cofermentación. El material fermentable se compone de una mezcla selectiva de restos de alimentos, estiércol de cerdo y excrementos de pollo. Controlamos el proceso de fermentación efectuando medidas periódicas de FOS/TAC con el TIM 840 de HACH LANGE. Por regla general, la relación se encuentra entre 0,3 y 0,4 en el digestor y entre 0,2 y 0,3 en el post-digestor. Podemos reconocer inmediatamente un peligro de acidificación - porque la relación aumenta - y tomar las medidas correctoras apropiadas. En estos casos, cambiamos la composición de la entrada de biomasa, p. ej. aumentando la proporción de estiércol de cerdo o excrementos de pollo, lo que aumenta la capacidad compensadora (TAC). Gracias a este simple método de control no necesitamos temer que el proceso vaya a fallar".

Ing. Dipl. Christian Nölle
 Director de calidad
 Wambelner Bioenergiegesellschaft mbH

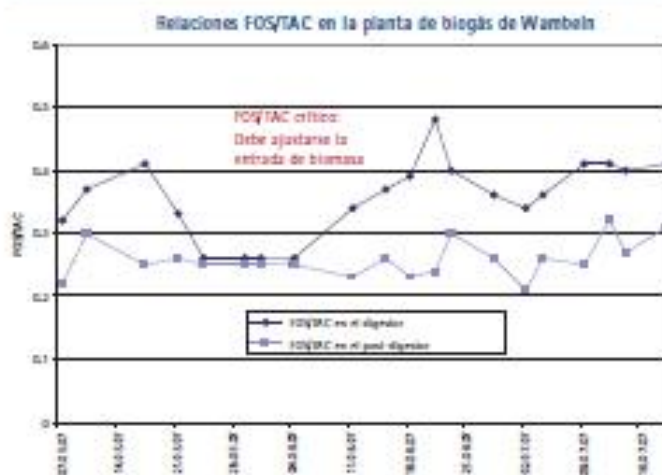


Fig. 3: Curva FOS/TAC de la planta de biogás de Wambeln durante un periodo de 3 meses.

TIM 84Q/84S_EBPECIFICACIONES TÉCNICAS

Especificaciones técnicas

Modelo TITRAJAB	TIM 84Q/84S
Buretas	
Número de buretas	1/2
Ampliación de buretas	Hasta un máximo de 6 buretas
Técnicas	
Medidas de pH/mV	●
Valoración de punto final	●
Valoración de punto de inflexión	●
Medidas de FOS/TAC	●
Técnicas de adición	
Dinámica continua	●
Monitoreo y dinámica incremental	●
Periféricas	Cambiador de muestras, balanza, impresora, software para PC
Entradas de electrodo para	
Electrodos indicadores	1
Electrodos de referencia	1
Electrodo polarizado	1

Tabla: Especificaciones técnicas, TIM 84Q/84S



Fig. 4: Valorador TIM 84Q de HACH LANGE para la determinación de FOS/TAC, pH y potencial redox.

Bibliografía

- Prof. Dr. Peter Wolland, Christa Rieger, Institut für Technologie und Biozersetzungstechnik, Abt. Technologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL): "Prozessstörungen frühzeitig erkennen", BIOGAS Journal 4/06
- Dr. Jürgen Wiese EnerCess GmbH, Ralf König HACH LANGE GmbH: "Prozessbegleitende Fermenterüberwachung auf Biogasanlagen", DVGW energie wasser-praxis 09/2006
- HACH LANGE Information "Routine-Analytik für Biogas", Art.No. DCC032.72.20007.APR07
- Kurzbedienungsanleitung: FOS/TAC-Messung mit dem HACH LANGE TITRALAB.

Servicios de HACH LANGE



Udemos para realizar un pedido, ampliar información o para solicitar asesoramiento.



Apoyo in situ mediante nuestro servicio de asistencia técnica y red comercial.



Aseguramiento de la calidad, con soluciones patrón, chequeo de los instrumentos y soluciones de referencia.



www.hach-lange.es
Actualizada y segura, con información y tienda on-line.



Protección del medio ambiente mediante la recogida de los reactivos usados.



UNITED FOR WATER QUALITY

ANEXO: Oferta Presupuestaria Instalación Dranco para el tratamiento de 30.000 toneladas de residuos biomásicos al año



**BUDGETARY OFFER
DRANCO INSTALLATION FOR THE TREATMENT
OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR**

*Offer no: 14/03/BIO30-D1
Date: August 2015*


	BUDGETARY OFFER DRANCO INSTALLATION FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 1403B/C030-01
		Date: August 2015

Table of contents

1.	The DRANCO process	Page 2/9
2.	Description of the DRANCO Installation	Page 3/9
2.1.	Introduction	Page 3/9
2.2.	Reception	Page 3/9
2.3.	Anaerobic digestion	Page 3/9
2.4.	Biogas treatment and valorisation	Page 4/9
2.5.	Control and operating	Page 4/9
3.	Specifications of the DRANCO Installation	Page 5/9
3.1.	Capacity	Page 5/9
3.2.	Mass balance	Page 5/9
3.3.	Operating hours	Page 5/9
3.4.	Consumables	Page 6/9
3.5.	Biogas production	Page 6/9
3.6.	Electricity production and consumption	Page 6/9
4.	Economical data	Page 7/9
4.1.	Scope of works and services	Page 7/9
4.2.	Not included in the delivery	Page 7/9
4.3.	Supply limits	Page 9/9
4.4.	Budgetary investment price	Page 9/9
5.	Annexes	
	Annex 1: Layout	
	Annex 2: DRANCO reference list	




1. The DRANCO process

The DRANCO digestion technology is a waste treatment technique which degrades and stabilizes organic material. The technique is ideal for waste streams containing a lot of organic material such as biowaste (kitchen and garden waste), grey waste, dewatered sludge, organic industrial waste among others.

The waste degradation takes place in the absence of oxygen, e.g. under anaerobic conditions, by means of bacteria. The degradable waste fraction is converted into biogas, a mixture of methane and carbon dioxide. Biogas is a renewable source of energy to be used for the production of electricity, heat, steam or, after recycling, as fuel. The non-degradable fraction forms a residue having a total solids content depending on the input material. The residue has to be treated further depending on the input material. Residue from grey waste or equivalent waste can, after stabilisation, be landfilled or incinerated or go through a wet separation to recover a maximum of recyclable fractions. Residue from biowaste or equivalent waste can, after dewatering and further stabilisation, be commercialised as a high-quality compost.

Characteristics:

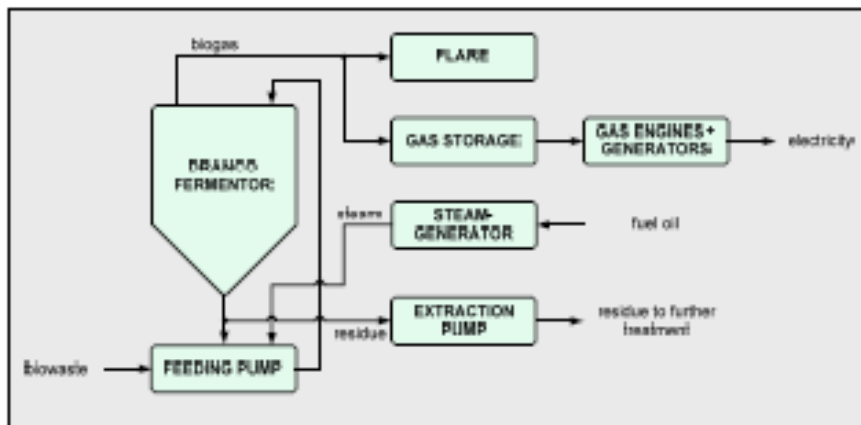
- The DRANCO process is a one-step digestion process. The different digestion process steps take place in the same reactor volume. As a result the construction of the installation is simpler in comparison with multiple-step digestion technologies, which increases operational reliability.
- The digestion occurs by means of thermophilic bacteria, which operate in a temperature area between 48 and 55°C. Most pathogens are killed in the reactor by the high temperature and the anaerobic conditions.
- The mixing of fresh waste with excess residue, i.e. already digested waste, takes place outside the DRANCO reactor. The patented system permits an excellent control of the mixing and makes it possible that inside the reactor no mixing or stirring system is necessary. This results in a simpler reactor construction, which leads to a long, reliable and free of interference operational management of the installation. The high relation of residue to fresh waste during mixing leads to a quick degradation, which starts immediately after the introduction in the reactor. Because of this sudden fluctuations in the composition of the supplied waste are met without problems.
- The DRANCO process takes place in standing reactors. A rugged solid pump introduces the mixture in the upper part of the reactor. By means of gravity the material then moves downwards. Extraction screws placed outside the reactor remove the residue.
- The DRANCO technology permits to treat various waste streams with the same reactor type: from wet to very dry waste streams. The DRANCO process is a semi-dry to very dry digestion process and is operational till 40% TS-content in the reactor. In practice the reactor is operated at a TS-content which is spontaneously adjusted depending on the kind of waste. By keeping the TS-content in the reactor high, sedimentation and flotation problems are avoided to a great extent. This means that floating materials such as woody material, polystyrene foam, plastics among others cannot form a crust, while heavy elements, such as sand and other inerts, cannot deposit.

	BUDGETARY OFFER DRANCO INSTALLATION FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 14036103G-01
		Date: August 2015

2. Description of the DRANCO installation

2.1. Introduction

The DRANCO installation has a processing capacity of 30.000 tons pretreated biowaste per year. This results in a weekly and daily capacity of 600 tons and 120 tons respectively, taking into account 50 working weeks per year and 5 working days per week. It is assumed that the biowaste is smaller than 60 mm and free of iron parts and other non-organic parts. The average composition is estimated at a total solids (TS) content of 40%, a volatile solids (VS on TS) content of 65%, a biodegradability (BVS) of 55 % and a C/N ratio between 25 and 30.



Flow sheet DRANCO installation

2.2. Reception

The client brings the fresh biowaste, smaller than 60 mm, in the hopper of the dosing screw (DS-01). The OWS part of the delivery starts with the dosing screw and the client takes care of the connection between their supply system and the dosing screw. The screw subsequently brings the material to the feeding pump. The dosing screw is put on weighing cells so that the amount of fresh waste, sent to the digester, is known.

2.3. Anaerobic digestion

The dosing screw brings the biowaste in the feeding pump FP-01 of the digester. Above the feeding pump, a mixing unit is placed where the fresh organic waste is intensively mixed with excess residue. The residue, already digested waste coming from the digester, functions as active inoculum with the intention of starting the anaerobic digestion as quickly and smoothly as

	BUDGETARY OFFER DRANCO INSTALLATION FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 14036103G-01
		Date: August 2015

possible immediately after the mixture entering the digester. In the mixing unit a small amount of steam is also injected to heat up the mass to a temperature of 48-55°C. Subsequently the homogeneous mixed warm mass is brought into the digester through feeding tubes. The tubes cut through the conical bottom of the digester and flow out at a distance of approximately 1 meter of the roof of the digester. The material is forced out the feeding tubes and falls at the top of the digester into the digesting mass and starts to produce very active biogas. The anaerobic digestion takes place at a dry solids content between 20 and 40% and a temperature between 48 and 55°C. The digester FE-01 itself is a vertically standing cylinder with a conical outlet and a slightly conical roof. The total volume is around 1.970 m³. The entire digester is made of steel and insulated to reduce heat losses.


The digesting mass moves slowly from top to bottom in the digester, depending on the rate by which the residue is at the bottom withdraw out the digester. There is no mixing equipment inside the digester. The residue leaves the digester through the conical outlet and is largely transported by the extractions screws ES-01 & ES-02 to the feeding pump where it functions as inoculum and is in this way brought back into the digester. The average retention time in the digester is about 25 days. The residue is partly deviated by the screws ES-01, ES-02 and ES-03 towards the extraction pump FP-02, which brings the residue towards the post treatment. The post treatment of the residue has to be done by the client.

2.4. Biogas treatment and valorisation

Because of the anaerobic digestion of organic material in the digester, biogas is continuously produced. The biogas accumulates in the digester above the residue and flows through difference in pressure to gas storage GS-01. The storage is a double membrane storage with a useful storage capacity of 340 m³. It has a double function: maintaining a minimum biogas amount so that biogas can always flow back to the digester in case of underpressure and levelling off of biogas peaks. After the biogas storage, the biogas is first cooled down to remove the condensate and subsequently the pressure is increased, suitable to be used in the gas engines (E/GE-01 & E/GE-02). In the gas engines, positioned in containers, the biogas is transformed into electricity. In emergency cases, when the gas valorisation units are not functioning or in case of a biogas surplus, the biogas can be burned off in the flare FL-01.

2.5. Control and operating

The DRANCO installation is fully automatically operated. The control and measuring system of the plant consists of a PLC and a PC connected to each other by means of a network. All digital and analogue signals coming from the installation are collected in the PLC, which transforms them and gives the necessary output signals. Communication between the plant supervisor and the PLC is possible by means of the PC. The operation of the different parts of the plant can be monitored by means of flow sheets on the screen.

	BUDGETARY OFFER DRANCO INSTALLATION FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 14036103G-D1
		Date: August 2015

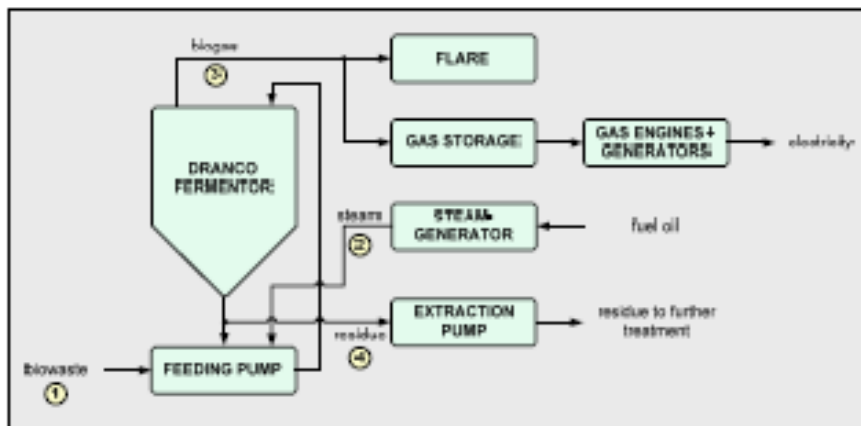
3. Specifications of the DRANCO installation

3.1. Capacity

The DRANCO installation has a processing capacity of 30.000 tons pretreated biowaste per year. This results in a weekly and daily capacity of 600 tons and 120 tons respectively, taking into account 50 working weeks per year and 5 working days per week. It is assumed that the biowaste is smaller than 60 mm and free of iron parts and other non-organic parts. The average composition is estimated at a total solids (TS) content of 40%, a volatile solids (VS on TS) content of 65%, a biodegradability (BVS) of 55 % and a C/N ratio between 25 and 30.

The following specifications are based on the above mentioned quantities and composition. Changes of these figures also lead to changes in the mentioned specifications.


3.2. Mass balance



	1	2	3	4
Tons/year	30.000	600	4.740	25.860
TS (%)	40,0	—	90,5	32,3

3.3. Operating hours

The DRANCO installation is operated during 8 hours per day and 250 days per year. The anaerobic digestion itself, with the belonging biogas production, and the valorisation of the gas take place continuously.

	BUDGETARY OFFER DRANCO INSTALLATION FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 140381030-D1
		Date: August 2015

3.4. Consumables

Below only the consumables, necessary for the good functioning of the DRANCO process are mentioned. Products such as oils & fats, fuel for the front-end-loader, salt for the water treatment etc. are not mentioned.

- Potable water: Potable water is used in the steam generator for the production of steam. The needed quantity is about 600 m³ per year;
- Fuel: Fuel is used in the steam generator for the production of steam. The needed quantity is about 49.500 litre per year;


3.5. Biogas production

The biogas production is about 112 Nm³ per ton waste going into the digester, resulting in 3.360.000 Nm³ biogas per year or 383 Nm³ biogas per hour. The biogas has an average methane content of about 55%, resulting in a heating value of about 5,45 kWh/Nm³.

3.6. Electricity production and consumption

In the DRANCO installation, electrical energy is used to operate the machines. The installed power is about 530 kW and the consumption is estimated at 825.000 kWh/year.

Two biogas engines are included in the offer, each with an installed electrical power of about 600 kW and a useful thermal power of about 588 kW. The average expected electricity production is about 7.200.000 kWh per year.

	BUDGETARY OFFER DRANCO INSTALLATION FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 140381030-01
		Date: August 2015

4. Economical data

4.1. Scope of works and services


The electromechanical part Includes:

- the engineering, delivery, transport, mounting and cold start-up of:
 - 1 digestion unit, being:
 - 1 dosing screw (DS-01)
 - 1 feeding pump (FP-01)
 - 1 DRANCO reactor (FE-01)
 - 3 extraction screws (ES-01, ES-02 & ES-03)
 - 1 extraction pump (FP-02)
 - 1 hydraulic group (HV-01)
 - 1 pneumatic group (PV-01)
 - 1 emergency ventilatorAlso included in this item are the necessary piping, instrumentation, appendages, valves, insulation, steel supports and access platforms.
 - 1 gas treatment unit, being:
 - 1 gas storage (GS-01, VE-01 & VE-02) with water seal as over pressure device
 - 1 flare (FL-01)
 - 1 steam generator (SG-01)
 - 2 blowers
 - 1 gas cooling unit
 - 2 biogas engine/generators (E/GE-01 & E/GE-02)Also included in this item are the necessary piping, instrumentation, appendages, valves, insulation, steel supports and access platforms.
 - the electrical installation, being:
 - the switch cabinets
 - the electrical wiring for power supply and instrumentation
 - 1 PLC and 1 PC with software
 - programming and visualization
- the warm start-up of the installation, being:
 - Inertisation of the reactor
 - delivery of the inoculum for the biological start-up of the reactor
 - supervision of OWS-staff during this period

4.2. Not included in the delivery

In the delivery is not included:


- pre-treatment of the biowaste
- post treatment of the residue

	BUDGETARY OFFER BUDGETARY OFFER FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 14036103G-D1
		Date: August 2015

- suction of the hall and of the equipment (except for emergency ventilation of the equipment)
- air treatment
- waste water treatment

- transformers and any high voltage electrical equipment
- lightning protection and central earthing
- integration of the OWS control system in the control system of the client/other suppliers
- video monitoring system for the process and/or for the complete site
- emergency lighting
- emergency power generator
- power factor correction system
- all the spare and wear parts
- all tackle paths and hoists for the maintenance of the equipment hoists (except on top of the digester)
- all mobile equipment (shovel loader, ...) and all containers
- completion of the site, ready for building
- all demolition and disassembly works
- organization of the site: all temporary site facilities for the client and others, all temporary site utilities connections, site security and monitoring, site fence, site announcement panel, site cleaning,...
- soil analysis
- all construction works such as: all the earthworks, all the foundations and piling, all the buildings, all the concrete works, all the roads and all modifications to roads, the complete sewerage system with necessary connections,...
- design, calculations and any engineering for the civil engineering and building works
- all building services such as: telecommunications, interior and exterior lighting, small power distribution and electrical sockets, heating, air conditioning equipment for certain rooms, fire detection and all the fire fighting equipment, all furniture, the complete sanitary installation, the complete workshop accommodation and all tools, the complete lab accommodation and all the lab equipment, an intrusion alarm system,...
- casting of all machine soles
- making and filling up of all ducts in walls, floors and roofs
- digging of all ducts for underground piping and cabling
- delivery and installation of empty pipes for underground cables
- fence around the gas equipment
- location, reposition and/or removal of existing cables and pipes
- supply and removal of water necessary for performing the water test of the digester
- personnel (except for supervision by OWS-staff), all consumables and maintenance necessary for the operation of the plant during start-up and test period
- obtaining of the permissions necessary for the construction and/or the operation of the plant
- exchange currency risk
- stock of consumables (oil, fats,...); the first filling of the machines is included
- import taxes and other taxes
- special measures when building in earthquake sensitive zones

- all activities, services, equipment, materials and documents, which are not explicitly mentioned in the scope of works and services of our proposal

	BUDGETARY OFFER BUDGETARY INVESTMENT FOR THE TREATMENT OF 30.000 TONS OF BIOWASTE PER YEAR	Offer no: 14036103G-D1
		Date: August 2015

4.3. Supply limits

Input:

- waste: The client brings the fresh waste (smaller than 60 mm) regularly and equally, during the operating hours of the installation, into the hopper of the dosing screw in front of the feeding pump;
- electricity: The client brings the supply cable to the low voltage installation and mounts it;
- potable water: The client brings the potable water pipe to about 1 m inside the building of the digestion part and provides sufficient potable water;

Output:

- air: The supply limits of the air extraction are the flanges, which are mounted on the equipment. These flanges will be DN100 till DN200, PN6, made in stainless steel, or can be tubes. Client/Partner delivers and installs the ventilators, piping, regulating valves, instrumentation (flow detection,...) and makes the connection with the air treatment system.
- biogas condensate: Because of the cooling down of the biogas, condensate, which is led to the condensate storage, is formed. The supply limit for the biogas condensate is the outlet flange of the condensate buffer. The excess condensate has to be able to run into the sewer system at any time or should be taken over at any time. The client provides the connection between the condensate buffer and the sewer system/takes care of the removal;
- electricity: The supply limit is at the terminals of each generator circuit breaker. The client takes care of the connection with the transformer.
- residue: The supply limit for the residue is the outlet flange of the extraction pump. The client takes care of the removal and further treatment.
- heat biogas engines: The supply limit is the outlet flanges of the heat exchangers. The client takes care of the connection and tuning with his heat circuit.

4.4. Budgetary investment price

The budgetary investment price is 5.900.000,00 Euro, without VAT and based on a project in Europe.

ANEXO: Procedimientos de estimación de productividad teórica de biogás

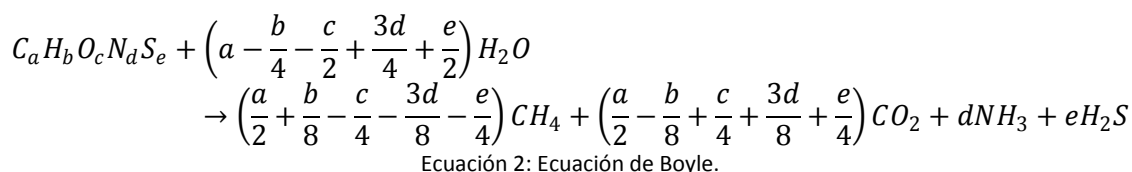
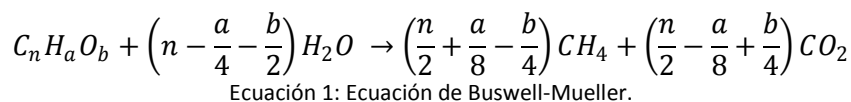
El presente documento pretende servir de ayuda metodológica para el cálculo estimativo de la producción de biogás que podría obtenerse a partir de un determinado sustrato. Dicho biogás sería el producto de la biodigestión anaeróbica de un sustrato orgánico.

Se deja constancia de que la productividad de generación de biogás por parte de un determinado sustrato debiera ser medida y no estimada; pero en el caso de requerir un valor numérico de generación aproximado, o de su máximo potencial teórico, para su uso al momento de realizar un cálculo preliminar de diseño de un sistema experimental o real, se considera válido su empleo, siempre que se tenga presente las consideraciones pertinentes.

A continuación se describen tres modalidades de cálculo, para un mismo fin.

Procedimiento estequiométrico: Ecuación de Buswell-Mueller y Ecuación de Boyle

Para poder hacer un cálculo estimativo de la producción de biogás que tendría el sustrato, debe poder definírsele y caracterizarlo. Para el caso particular que se presenta, es necesario poder contar con datos resultantes del análisis inmediato y elemental de dicho sustrato; esto es: humedad [% w/w, en base húmeda], SV [% w/w, en base seca], contenido de C, H y O [% w/w, en base seca], para el caso Buswell-Mueller (Ecuación 1); y adicionalmente de N y S [% w/w, en base seca], para el caso Boyle (Ecuación 2). Teniendo en cuenta que la capacidad de acceso a datos de composición elemental podría ser limitada, puede emplearse la correlación que se muestra en el ANEXO.



Como punto de partida, se procede a lograr una expresión estequiométrica de los ST del sustrato, partiendo de los valores conocidos de C, H y O. Para ello se transforma la participación porcentual de cada elemento en una contribución en peso [g], se afecta por su correspondiente peso atómico y luego se simplifica la relación resultante de números de átomos por mol.

Una vez obtenida la expresión del tipo $C_n H_a O_b$, se aplica la Ecuación de Buswell-Mueller, con lo cual se tendrá la relación másica entre los compuestos presentes en ambos miembros. Tomando las proporciones anteriores, se realiza un reemplazo en función del contenido de SV

del sustrato y se afecta luego por un cierto porcentaje de degradación (producto del proceso de biodigestión); este último valor se estima y sirve como variable de sensibilización.

Teniendo en cuenta las densidades del metano y del dióxido de carbono, puede conocerse las proporciones volumétricas del biogás; y con esto la producción de metano esperada por tonelada de sustrato incorporada, al igual que el contenido energético bruto del biogás.

Esta metodología de estimación se menciona y propone en el Capítulo 7 de la norma VDI 4630:2006.

Se procede a aclarar todo lo anteriormente mencionado con el siguiente ejemplo:

Ejemplo 1³⁷ (cálculo de productividad teórica mediante Ecuación de Buswell-Mueller)

Se trabajará a partir de una caracterización modelo de una FORSU extraída de la bibliografía, para luego fijar condiciones que formarán parte de dicho cálculo.

Se define entonces un FORSU con un contenido de humedad del 70 %, donde el 95 % de los sólidos son volátiles y la degradación de estos SV es del 70 % (que es el valor objetivo mínimo para un biodigestor bien diseñado). La composición de los ST es la siguiente: C 48,3 %; H 7,6 %; O 35,8 %; N 3,3 %; Cenizas 5 %.

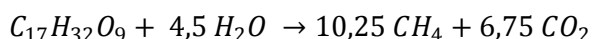
Se toma un contenido energético bruto de 37,78 MJ por cada Nm³ de CH₄³⁸.

A continuación se presentan los cálculos realizados.

Tabla 1: Tabla de cálculo para la obtención de la expresión estequiométrica de la FORSU.

Componente	[% w/w ST]	Contribución en peso por cada elemento [g]	Peso atómico	Número de átomos por mol	Relación molecular asimilada
Nitrógeno	3,3	33	14	2,36	1
Carbono	48,3	483	12	40,25	17
Hidrógeno	7,6	76	1	76,00	32
Oxígeno	35,8	358	16	22,38	9
Total SV	95,0	950			
Cenizas	5,0				

$$Si n = 17, a = 32, b = 9 \therefore$$



$$380 + 81 \rightarrow 164 + 297$$

³⁷ Extraído del libro *The biogas handbook: Science, production and applications*.

³⁸ 1 Nm³ de CH₄ = 1 m³ de CH₄ en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 0 °C).

461 → 461

Tomando las proporciones anteriores, se realiza un reemplazo en función de la cantidad de SV presentes por tonelada de sustrato.

$$\text{Humedad } 70 \% ; 95 \% \frac{SV}{ST} \therefore 300 \frac{kg ST}{t \text{ sustrato}} ; 285 \frac{kg SV}{t \text{ sustrato}} \therefore$$

$$285 kg SV + 61 kg H_2O \rightarrow 123 kg CH_4 + 223 kg CO_2$$

Considerando un 70 % de degradación de los SV:

$$200 kg SV_{degradables} + 43 kg H_2O \rightarrow 86 kg CH_4 + 156 kg CO_2$$

$$\text{Densidad del } CH_4, \text{ condiciones normales}^{39} = \frac{16}{22,412} \frac{Nm^3}{kg} = 0,714 \frac{kg}{Nm^3} ;$$

$$\text{Densidad del } CO_2, \text{ condiciones normales} = \frac{44}{22,412} \frac{Nm^3}{kg} = 1,96 \frac{kg}{Nm^3} \therefore$$

$$120 Nm^3 CH_4 + 80 Nm^3 CO_2 = 200 Nm^3 \text{ biogás} \therefore$$

$$\text{Proporción volumétrica de metano, en el biogás} = 60 \%$$

$$\text{Proporción volumétrica de dióxido de carbono, en el biogás} = 40 \%$$

Estos cálculos nos arrojan una producción teórica esperada de 423,17 Nm³ CH₄/t SV_{incorporado} ó 120,60 Nm³ CH₄/t sustrato_{incorporado}, con un contenido energético bruto de 22,78 MJ/ Nm³ biogás_{generado} ó 4556,44 MJ/t sustrato_{incorporado}.

Para el cálculo de productividad, empleando la Ecuación de Boyle, se procede de manera análoga.

Procedimiento basado en el potencial energético de los SV: Ecuación de Dulong modificada

El planteo, de estimación del potencial de generación de biogás del sustrato, se basa en el cálculo del contenido energético de los SV; empleando la mencionada Ecuación de Dulong modificada (Ecuación 3).

$$\text{Valor energético de } 1 kg SV \left[\frac{kJ}{kg SV} \right]$$

$$= 337 * C + 1419 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 93 * S + 23,26 * N$$

Ecuación 3: Ecuación de Dulong modificada.

³⁹ 0 °C (273,15 K) y 1 atm.

Donde C, H, O, S, N; son las proporciones de estos elementos en relación a los SV, expresados en porcentajes.

Una vez obtenido el valor del contenido energético por unidad másica de sustrato, se hacen los respectivos ajustes por proporción de SV en sustrato y por el porcentaje de degradabilidad de los mismos. Finalmente, se toma un contenido energético bruto de 37,78 MJ por cada Nm³ de CH₄⁴⁰ para la obtención del valor de productividad teórica.

Ejemplo 2

Se emplean los valores de análisis próximo y elemental del ejemplo anterior; aunque debe realizarse una corrección del dato, por expresión sobre contenido de SV (Tabla 2).

Tabla 2: Tabla de composición del sustrato.

Componente	[% w/w ST]	[% w/w SV]
Nitrógeno	3,3	3,5
Carbono	48,3	50,8
Hidrógeno	7,6	8,0
Oxígeno	35,8	37,7
Total SV	95,0	100
Cenizas	5,0	

C 50,8 %SV; H 8 %SV; O 37,7 %SV; N 3,5 %SV; ∴

$$\begin{aligned}
 & \text{Valor energético de 1 kg SV} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg SV}} \right] \\
 &= 337 * 50,8 + 1419 * \left(8 - \frac{37,7}{8} \right) + 93 * 0 + 23,26 * 3,5 \\
 &= 21882,35 \text{ kJ} / \text{kg SV} \cong 21,9 \text{ MJ} / \text{kg SV}
 \end{aligned}$$

Al considerar la proporción de SV presente en el sustrato y la degradabilidad de los mismos, se tiene entonces por este método un valor energético bruto de 4365,53 MJ/t sustrato_{incorporado}. Esto equivale a una producción teórica esperada de 405,44 Nm³ CH₄/t SV_{incorporado} ó 115,55 Nm³ CH₄/t sustrato_{incorporado}.

Procedimiento basado en la composición nutricional del sustrato

El mencionado procedimiento se extrae del Capítulo 7 de la norma VDI 4630:2006.

Si la composición es conocida, la cantidad máxima de gas que puede ser generada se visualiza a través de los valores mostrados en la Tabla 3.

⁴⁰ 1 Nm³ de CH₄ = 1 m³ de CH₄ en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 0 °C).

Tabla 3: Productividad teórica de biogás y composición teórica del mismo durante la fermentación de carbohidratos, lípidos y proteínas (esto asumiendo la total conversión del sustrato a biogás – en otras palabras, sin tener en consideración la producción biomásica a partir del sustrato en digestión)

Tipo de sustrato	Productividad teórica de biogás	Composición teórica CH ₄ /CO ₂	
	[NL/kg SV]	[% v/v]	
Carbohidratos	750	50 % CH ₄	50 % CO ₂
Lípidos	1390	72 % CH ₄	28 % CO ₂
Proteínas	800	60 % CH ₄	40 % CO ₂

Si tenemos en cuenta que las estructuras proteicas pueden ser muy diferentes, el contenido de metano del biogás producido puede variar considerablemente. A pesar de que el contenido de metano que se visualiza en la Tabla 3 responde a la formulación típica de aminoácidos, ya que muchas proteínas se presentan en una forma menos oxidada, durante la fermentación el biogás se genera frecuentemente con un contenido de metano de aproximadamente 70 % v/v. Cuando las proteínas son convertidas, no solo se produce en cantidades importantes metano y dióxido de carbono sino que también se libera amoníaco y sulfuro de hidrógeno. De todas maneras estos últimos no se han tomado en consideración.

Estos valores son teóricos, ya que lo que nos interesa conocer es el máximo potencial de biogás que se puede lograr. Parte del sustrato degradado, aproximadamente un 3 % a 10 %, es convertido en biomasa bacteriana y por lo tanto no se encuentra disponible para la formación de biogás.

En la realidad, para el caso de lípidos y carbohidratos de origen animal, se verifica aproximadamente un 85 % de conversión a biogás; y de un 50 % a 70 % para el caso de lípidos y carbohidratos de origen vegetal. Cuando estimamos una cantidad diaria de gas, debemos tener en cuenta que la conversión de los carbohidratos puede ser muy rápida (unos pocos días), pero que para el caso de las proteínas y lípidos esto puede requerir algunas veces de varias semanas.

Referencias bibliográficas

Verein Deutscher Ingenieure (2006). Norma: VDI 4630:2006 *Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.*

Wellinger, A; Murphy, J y Baxter, D. (2013). *The biogas handbook: Science, production and applications.* IEA Bioenergy. Woodhead Publishing. Oxford, Cambridge, Philadelphia y Nueva Delhi. 476 p.

Estimación de la composición elemental de un material orgánico partiendo de los valores de su análisis próximo o inmediato

Se opta por efectuar la estimación partiendo de las correlaciones publicadas por Shen et al (2010), para conocer la composición elemental del combustible en relación a los valores que arroja el análisis inmediato del mismo

Las correlaciones que permiten estimar el contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno, se exponen a continuación:

$$\begin{aligned}C &= 0,635 * CF + 0,460 * MV - 0,095 * Ce \\H &= 0,059 * CF + 0,060 * MV + 0,010 * Ce \\O &= 0,340 * CF + 0,469 * MV - 0,023 * Ce\end{aligned}$$

Ecuación 6: Fórmulas para estimar el contenido de C, H y O de un biocombustible sólido, partiendo de datos del análisis inmediato.

Donde,

C, H y O: son los contenidos de carbono, hidrógeno y oxígeno [% , peso en base seca].

CF, MV y Ce: los contenidos de carbono fijo, materias volátiles y cenizas [% , peso en base seca].

Dichas correlaciones se obtuvieron para los siguientes rangos de valores de entrada:

$$9,20 \% \leq CF \leq 32,79 \%$$

$$57,20 \% \leq MV \leq 90,60 \%$$

$$0,10 \% \leq Ce \leq 24,60 \%$$

$$36,20 \% \leq C \leq 53,10 \%$$

$$4,70 \% \leq H \leq 6,61 \%$$

$$31,37 \% \leq O \leq 48,00 \%$$

Todos estos valores anteriores, expresados en [% , peso en base seca].

Referencias bibliográficas

Andretich, M. y Bertero, J. (2014). *Proyecto Integrador de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Córdoba: Potencialidad de la valorización energética de los residuos de poda de la ciudad de Unquillo para su aprovechamiento como biocombustibles sólidos.* Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad nacional de Córdoba. Argentina.

Shen, J.; Zhu, S.; Liu, X.; Zhang, H. y Tan, J. (2010). *The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis.* Nanjing : Elsevier. Energy Conversion and Management (51), 983-987.

ANEXO: Resumen de métodos para la caracterización analítica de sustratos para biogás

En la siguiente tabla, extraída de Wellinger y col. (2013), puede obtenerse referencia de las normas técnicas aplicables a la determinación analítica de los parámetros de caracterización de un sustrato para su utilización en procesos de metanización, incluyendo al procedimiento de muestreo propiamente dicho y a los ensayos de bap (o de BMP).

Analysis	Standard	Title
Sample taking	VDI 4630	Fermentation of organic materials – Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests
	ISO 5667-13	Water quality – sampling – Part 13: Guidance on sampling of sludges from sewage and water treatment works
pH value	EN 12176	Characterisation of sludge – Determination of pH value
TS/DM	APHA 4500-H+ B EN 12880	pH value Electrometric method Characterisation of sludges – Determination of dry residue and water content
	APHA 2540 B	Total solids dried at 103–105°C
VS/ODM	EN 12879	Characterisation of sludges – Determination of the loss on ignition of dry mass
	APHA 2540 E	Fixed and volatile solids ignited at 550°C
COD	DIN 38 414 (S9)	German standard methods for the examination of water, wastewater and sludge; sludge and sediments (group S); determination of the chemical oxygen demand (COD) (S9)
	APHA 5220 B	Chemical oxygen demand (COD) – Open reflux method
TKN	ISO 5663	Water quality – Determination of Kjeldahl Nitrogen – method after mineralisation with selenium
	ISO 11261	Soil quality – Determination of total nitrogen – Modified Kjeldahl method
NH ₄ -N	APHA 4500-N _{org} B	Nitrogen (organic) – Macro-Kjeldahl method
	DIN 38 406 (E5)	German standard methods for the examination of water, wastewater and sludge; cations (group E) determination of ammonia-nitrogen (E5)
	APHA 4500-NH ₃ B	Nitrogen (ammonia) – Preliminary distillation step
	APHA 4500-NH ₃ C APHA 4500-NH ₃ F	Nitrogen (ammonia) – Titrimetric method Nitrogen (ammonia) – Phenate method
S	ISO 11885	Water quality – Determination of 33 elements by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy
P	EN 13346	Characterisation of sludges – Determination of trace elements and phosphorous – Aqua regia extraction methods
	DIN 38 414 (S12)	German standard methods for the examination of

Table 3.2 (Continued)

Analysis	Standard	Title
		water, wastewater and sludge; sludge and sediments (group S); determination of phosphorous in sludges and sediments (S12)
	ISO 6878	Water quality – Determination of phosphorous, ammonium molybdate spectrometric method
	APHA 4500–P B	Phosphorous – Sample preparation
	APHA 4500–P E	Phosphorous – Ascorbic acid method
Trace elements	ISO 11885	Water quality – Determination of 33 elements by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy
	EN 13346	Characterisation of sludges – Determination of trace elements and phosphorous – Aqua regia extraction methods
	APHA 3120 C	Metals by plasma emission spectroscopy – Inductively coupled plasma (ICP) method
BMP	EN 11734	Water quality – Evaluation of the ultimate anaerobic degradability of organic compounds in digested sludge – method by measurement of the biogas production
	DIN 38 414 (S8)	German standard methods for the examination of water, wastewater and sludge; sludge and sediments (group S); determination of the amenability to anaerobic digestion (S8)
	VDI 4630	Fermentation of organic materials – Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests
TOC	EN 1484	Water analysis – guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC)
	APHA 5310	Total organic carbon (TOC)

VDI, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany.

ISO, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

EN, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.

APHA, American Public Health Association, Washington DC, USA.

DIN, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Germany.