



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MINERA Y DE RECURSOS ENERGÉTICOS

TRABAJO FIN DE MASTER

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DE LA DIGESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANO.

León, Julio de 2015

Autor: Carlos Alonso Brasas

Tutor: Alberto González Martínez

El presente proyecto ha sido realizado por D. Carlos Alonso Brasas, alumno/a de la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas de la Universidad de León para la obtención del título de Máster en Ingeniería Minera y de Recursos Energéticos.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por D. Alberto González Martínez, profesor/a del Máster Universitario en Ingeniería Minera y de Recursos Energéticos.

Visto Bueno

Fdo.: D. Carlos Alonso Brasas
El autor del Trabajo Fin de Máster

Fdo.: D. Alberto González Martínez
El Tutor del Trabajo Fin de Máster

RESUMEN

En el presente trabajo de fin de Master se describe en primer lugar las características de la digestión anaeróbica, así como detalles de su proceso biológico y las principales tecnologías disponibles. Tras ello analizaremos un caso real de una planta de tratamiento de RSU y a través de un modelo en la plataforma Microsoft Excel buscaremos la optimización del proceso y analizaremos la posibilidad de la codigestión.

ABSTRACT

In the present Master final essay, we first described the characteristics of anaerobic digestion as well as details of their biological process and the main available technologies. After that we will analyze a real case of a MSW treatment plant and through a model in Microsoft Excel platform we will search for the optimization of the process and to discuss the possibility of co-digestion.

ÍNDICE

Tabla de contenido

RESUMEN	3
ABSTRACT.....	3
ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2 HISTORIA Y ANTECEDENTES.....	2
3 LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA	4
3.1 TIPOS DE ALIMENTACIÓN	4
3.1.1 RESIDUOS AGROPECUARIOS.....	4
3.1.2 RESIDUOS INDUSTRIALES.....	5
3.1.3 RESIDUOS URBANOS.....	6
3.1.3.1 GAS DE VERTEDERO	6
3.1.3.2 RESIDUOS SOLIDOS URBANOS.....	6
3.1.3.3 AGUAS RESIDUALES URBANAS.....	7
3.1.3.4 CULTIVOS ESPECIFICOS	7
3.2 FASES DEL PROCESO.....	8
3.2.1 PRETRATAMIENTO Y ALIMENTACIÓN.....	8
3.2.2 PROCESO BIOLÓGICO.....	9
3.2.2.1 HIDRÓLISIS.....	10
3.2.2.2 ACIDOGÉNESIS	11

3.2.2.3	ACETOGÉNESIS	12
3.2.2.4	METANOGÉNESIS	13
3.2.3	TRATAMIENTO Y REFINAMIENTO DEL GAS	13
3.3	TECNOLOGÍAS DE REFINAMIENTO DE BIOGAS	15
3.3.1	ELIMINACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	15
3.3.2	ELIMINACIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO	17
3.3.3	ELIMINACIÓN DE HIDROCARBUROS HALOGENADOS.....	18
3.3.4	ELIMINACIÓN DE SILOXANOS	18
3.4	DIGESTATO	19
3.4.1	USO DEL DIGESTATO.....	20
3.4.2	COMPOSTAJE DE DIGESTATO	21
3.5	FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA	22
3.5.1	TIPO DE SUBSTRATO:.....	22
3.5.2	TEMPERATURA DEL SUSTRATO	23
3.5.3	CARGA VOLUMÉTRICA.....	25
3.5.4	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH).....	25
3.5.5	EL NIVEL DE ACIDEZ (PH).....	27
3.5.6	LA RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO.....	27
3.5.7	LA CONCENTRACIÓN DEL SUSTRATO	28
3.5.8	EL AGREGADO DE INOCULANTES.....	28
3.5.9	EL GRADO DE MEZCLADO	29
3.5.10	LA PRESENCIA DE COMPUESTOS INHIBIDORES DEL PROCESO.....	30
4	TIPOS DE DIGESTORES	32
4.1	SEGÚN LA CARGA	32

4.1.1	SISTEMA BATCH	32
4.1.2	SISTEMA CONTINUO O SEMICONTINUO	33
4.2	SEGÚN LA INTENSIDAD DE LA MEZCLA.....	34
4.2.1	MEZCLA COMPLETA.....	34
4.2.2	MEZCLA PARCIAL O NULA.....	34
4.3	SEGÚN EL MANEJO DEL SUBTRATO	35
4.3.1	CONTACTO ANAERÓBICO	35
4.3.2	U.A.S.B.: (UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET).....	35
4.3.3	LECHO FLUIDIZADO.....	36
4.3.4	FILTRO ANAERÓBICO	36
4.4	SEGÚN MANEJO BIOQUÍMICO	36
4.4.1	UNA ETAPA	36
4.4.2	DOS ETAPAS	37
5	ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA.....	38
5.1	PLANTA REAL.....	38
5.1.1	CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA	38
5.2	MODELO UTILIZADO.....	39
5.2.1	DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO	39
5.2.1.1	HOJA "CALCULADORA"	40
5.2.1.2	HOJA "CIFRAS ANUALES"	42
5.2.1.3	HOJA "RESPUESTA SUPERFICIE-SV-TRH"	43
5.2.1.4	HOJA "RESPUESTA SUPERFICIE-TEMPERATURA-TRH"	44
5.2.1.5	HOJA "TEMPERATURA&TRH"	45
5.2.1.6	HOJA "SV&TRH"	46

5.2.1.7	HOJA "TEMPERATURA&SV"	47
5.2.1.8	HOJA "TRH&TEMPERATURA"	48
5.2.1.9	HOJA "CFST"	49
5.2.1.10	HOJA "FLUJO DE ENTRADA"	50
5.2.1.11	HOJA "COSTES (TEMPERATURA&TRH)"	51
5.2.1.12	HOJA "COSTES ENERGÉTICOS"	52
5.2.2	MODIFICACIONES	53
5.3	ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN	54
5.3.1	ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA ACTUAL	55
5.3.1.1	ANÁLISIS DE GRÁFICAS.....	55
5.3.1.2	CONCLUSIONES	59
5.3.2	ANÁLISIS CODIGESTIÓN	59
5.3.2.1	CONSIDERACIONES INICIALES	59
5.3.2.2	CASOS TEÓRICOS.....	60
6	CONCLUSIONES.....	63
7	REFERENCIAS.....	64
8	BIBLIOGRAFÍA.....	65
	Lista de referencias	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del proceso de biogás.....	8
Figura 3.2: Esquema general de transformaciones bioquímicas durante el proceso de digestión anaeróbica.....	9
Figura 3.3: Depuradora para lavado en agua.	16
Figura 3.4: Rendimiento de las bacterias según el rango de temperatura.	24
Figura 3.5: TRH según el contenido en celulosa.	26
Figura 3.6: Rango adecuado de PH.....	27
Figura 3.7: Crecimiento bacteriano en un bioreactor.	29
Figura 4.1: Producción de gas en un reactor tipo Bacht.....	33
Figura 4.2: recirculación de las bacterias para reducir el TPH.....	35
Figura 5.1: Hoja "Calculadora".....	40
Figura 5.2: Tabla de estiércoles de la hoja "Calculadora".....	41
Figura 5.3: Hoja "Cifras anuales".....	42
Figura 5.4: Hoja "Respuesta Superficie-SV-TRH".....	43
Figura 5.5: Hoja "Respuesta Superficie-Temperatura-TRH".....	44
Figura 5.6: Hoja "Temperatura&TRH".....	45
Figura 5.7: Hoja "SV&TRH".....	46
Figura 5.8: Hoja "Temperatura&SV".....	47
Figura 5.9: Hoja "TRH&Temperatura".....	48
Figura 5.10: Hoja "CFST".....	49
Figura 5.11: Hoja "flujo de entrada".....	50
Figura 5.12: Hoja "Costes (Temperatura&TRH)".....	51
Figura 5.13: Hoja "Costes energéticos".....	52

Figura 5.14: Modificación 1	53
Figura 5.15: Modificación 2	53
Figura 5.16: Optimización grafica 1.	55
Figura 5.17: Optimización grafica 2.	56
Figura 5.18: Optimización grafica 3.	57
Figura 5.19: Optimización grafica 4.	57
Figura 5.20: Optimización grafica 5.	58
Figura 5.21: Optimización grafica 6.	58
Figura 5.22: Caso teórico 1.	60
Figura 5.23: Caso teórico 2	61
Figura 5.24: Caso teórico 3.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Reacciones fermentativas para los carbohidratos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga.....	12
Tabla 3.2 Reacciones Acetogénicas	12
Tabla 3.3: Composiciones del gas natural, del biogás y del gas de vertedero.	14
Tabla 3.4: Datos ilustrativos de producción de biogás con estiércol animal.	23
Tabla 3.5: Clasificación del proceso de gasificación según el rango de temperatura.....	24
Tabla 3.6: Principales inhibidores del proceso fermentativo.....	30
Tabla 5.1: Caso teórico 4.....	62

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante último siglo, el uso de los combustibles fósiles se ha incrementado significativamente, lo que ha provocado un aumento alarmante en la emisión de gases que generan el denominado efecto invernadero. Por otra parte, millones de toneladas de desechos orgánicos biodegradables son generados cada año por los sectores agropecuarios, municipales e industriales en todo el mundo. Una posible solución a ambos problemas podría ser la digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica es un conjunto de procesos bioquímicos desarrollados en entorno libre de oxígeno. Tras los cuales se produce la desintegración, transformación y estabilización de la materia orgánica biodegradable debido la acción conjunta de varios grupos de microorganismos. Como productos finales de este proceso se obtienen una mezcla gaseosa conocida como biogás, la cual está compuesta principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Por otra parte, el residuo semisólido producido por este proceso, presenta gran cantidad de nutrientes, muy útil para la fertilización de terrenos cultivables. La digestión anaeróbica es un proceso sostenible que permite establecer una solución concreta a la problemática del manejo de los residuos orgánicos biodegradables y la generación de energía con un impacto ambiental mínimo.

En este presente estudio se presente describir las principales características del biogás, así come de su historia y producción. También se tratara la tecnología existente, su proceso químico-biológico y los principales parámetros que influyen en su producción.

Tras ello se presenta una planta real y un modelo de análisis a través de la plataforma Microsoft Excel y se analizara la planta, proponiendo posibles mejoras y optimizaciones.

2 HISTORIA Y ANTECEDENTES

El proceso anaerobio está presente y ocurre de forma espontánea en la naturaleza. Degrada la materia orgánica y produce, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes.

En el siglo XVIII Robert Boyle y Stephen Hale identificaron e investigaron el gas inflamable que emanaba de los pantanos tras perturbar el sedimento de los ríos y lagos. En 1808, Sir Humphry Davy, determinó que el metano estaba presente en los gases producidos por el estiércol del ganado, pero no fue hasta mediados del siglo XIX, cuando se tuvo certeza de la participación de organismos vivos unicelulares en el proceso, siendo Beauchamp, en 1868, quién estableció la presencia de microorganismos en los procesos de producción de metano. Más adelante, Pasteur descubrió que mediante la temperatura se podía favorecer o impedir el desarrollo de los microorganismos más interesantes para el proceso. Propoff, en 1875, descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias. En 1884, Pasteur investigó sobre la producción de biogás a partir de residuos animales, proponiendo la utilización del biogás para la iluminación de las calles.

En cuanto a las instalaciones, el primer digester anaeróbico fue construido por una colonia de leprosos en Bombay, India, en 1859. Más adelante, en 1895, la tecnología fue desarrollada en Exeter, Inglaterra, donde un tanque séptico fue usado para generar gas para las lámparas de gas a base del gas de alcantarillas. También fue en Inglaterra, en Hampton, donde en 1904 se construyó el primer tanque de doble función, tanto para sedimentación como para el tratamiento del fago. En 1907 en Alemania se patentó el tanque Imhoff, una versión temprana del moderno digester anaerobio.

La investigación de digestión anaerobia no empezó hasta la primera mitad del siglo XX, cuando se realizaron numerosas experiencias a escala laboratorio y piloto, alcanzando una especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Con el fin de la guerra y la fácil disponibilidad de combustibles fósiles la mayoría de las instalaciones fueron cesando en su funcionamiento.

En la India, a partir de la década de los 60, se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble objetivo del aprovechamiento energético y mantenimiento de las propiedades fertilizantes. En China se ha fomentado, también, desde la década de los 70, la construcción de digestores, mediante programas de ámbito nacional.

En los países industrializados la historia de la tecnología de biometanización ha sido diferente y el desarrollo ha estado motivado más por motivaciones medioambientales que puramente energéticas, siendo un método clásico de estabilización de lodos activos residuales de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. A partir de la crisis energética de 1973, y durante la década de los ochenta, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales.

Con la bajada de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados se han desarrollado importantes programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial, teniendo como objetivos principales la gestión de residuos, principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos, y el fomento de las energías renovables, para disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero. El principal exponente es Dinamarca, donde, en 1985, comenzó un programa demostración, desarrollado conjuntamente por los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente, en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica. Así, en 1997 se contabilizaban 19 grandes plantas que tratan conjuntamente residuos de origen industrial, residuos urbanos, lodos de depuradora y residuos ganaderos (Angelidaki y Ahring, 1997a), aunque en el año 2000 los objetivos eran duplicar la producción, y continuar aumentando hasta el año 2030.

3 LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. Este proceso genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes. A continuación procedo a desarrollar las distintas alimentaciones que pueden ser utilizadas, así como una introducción a los procesos que transcurren y los tratamientos y usos del producto final.

3.1 TIPOS DE ALIMENTACIÓN

A diferencia de muchos otros biocombustibles o formas de bioenergía, el biogás puede producirse a partir de muchos tipos de materias primas, con una preparación limitada de ellas y (en gran medida), independientemente de la composición y el contenido de humedad.

Un bioreactor puede ser alimentado con cultivos específicos para una mayor producción de metano, pero esta tecnología cobra especial importancia al poder aprovechar múltiples residuos para su alimentación. De esta forma, aparte del aspecto económico obvio de que un residuo siempre será más rentable que un producto, se suma la función de tratamiento sobre el propio residuo, de forma que podemos tratarlo a la vez que producimos biogás y un residuo efluente que además tiene propiedades fertilizantes. Actualmente existen una gran cantidad de residuos de todo tipo que pueden aprovecharse para la generación de biogás. Entre ellos podemos destacar los residuos agropecuarios, los industriales y los urbanos.

3.1.1 RESIDUOS AGROPECUARIOS

Los desechos agropecuarios comprenden un amplio conjunto de residuos orgánicos biodegradables, los cuales pueden ser clasificados en dos tipos generales: residuos agrícolas (frutas o plantas) y residuos ganaderos (estiércoles y purines).

Actualmente existe una gran producción de residuos orgánicos biodegradables, los cuales requieren de un manejo específico para evitar la generación de problemas ambientales que a la postre se reflejan en la salud pública y el deterioro de los ecosistemas naturales.

Tradicionalmente, este tipo de residuos se utilizan en pequeños digestores unifamiliares donde se recogían todos los residuos animales, vegetales y humanos en un tanque subterráneo para provocar su descomposición y digestión. Aunque este sistema no es muy eficiente, es barato y es la única opción viable en la mayoría de las granjas aisladas.

Actualmente se utilizan plantas más grandes en concentraciones agrícolas y ganaderas de forma que el rendimiento del reactor aumenta al estar más preparado y controlado mientras que la distancia para transportar los residuos sigue siendo pequeña.

Otra ventaja adicional de estos residuos es su elevada humedad y su alto contenido en las bacterias que son necesarias para el proceso.

3.1.2 RESIDUOS INDUSTRIALES

Hay gran variedad de residuos industriales que pueden ser utilizados en la digestión anaeróbica. Entre ellos podemos destacar los siguientes:

- Residuos de la industria papelera y maderera (como restos de pulpa, cortezas, serrín...)
- Residuos de la industria alimentaria (pieles, semilla, restos de tallos)
- Restos y subproductos de la industria Láctica
- Subproductos animales no destinados a consumo humano procedentes del sector primario y de industrias agroalimentarias (mataderos, granjas, conserveras...)
- lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales.

Muchos de estas alimentaciones son muy complicadas de utilizar por si solas, o dan escaso rendimiento, como por ejemplo los restos de madera, ya que la celulosa es complicada de romper en moléculas más pequeñas. Por ello muchos de estos residuos se

utilizan en la codigestión, que consiste en utilizar como alimentación dos o más tipos de residuos, aumentando el rendimiento al compensar entre ellos las carencias individuales.

3.1.3 RESIDUOS URBANOS

En cuanto a los residuos urbanos, podemos distinguir tres clases bien diferenciadas.

3.1.3.1 GAS DE VERTEDERO

Este gas se produce debido a la fracción orgánica de residuos urbanos enterrada en vertederos. Al estar enterrados en condiciones anaeróbicas estos desechos se van descomponiendo lentamente de la misma forma que en un bioreactor, pero en un periodo de 20-50 años. No se utiliza como método para obtener gas directamente, pero si se utiliza en los vertederos ya realizados para extraer el gas que queda encerrado, mejorando a su vez la estabilidad del vertedero.

Para extraerlo se realizan una serie de sondeos donde se introducen una serie de tubos con perforaciones laterales de forma que el gas fluya al exterior a través de ellos y pueda ser conducida a una planta de tratamiento a través de tuberías.

3.1.3.2 RESIDUOS SOLIDOS URBANOS

Los residuos sólidos urbanos consisten en todos los desperdicios que los habitantes producen a lo largo del desempeño de sus labores (papel, plástico, vidrio, restos de comida...). Aparte de la gran importancia que tienen el papel, el plástico y el vidrio en cuanto al reciclaje, la fracción orgánica de estos residuos, principalmente restos de comida, servilletas... tiene una gran capacidad de producción de biogás. Pero el punto crítico del proceso es la separación en el origen, que es esencial.

Una incorrecta separación puede dar lugar a graves problemas en los procesos, tanto de digestión como de reciclaje, por lo que para evitar una segunda separación, es importante concienciar a la población de separar no solo papel, envases y vidrio, sino también la basura orgánica de la que no lo es. Aunque esta última separación no está disponible en todas las ciudades, gracias a la posibilidad de la codigestión, es una práctica cada vez más usual.

3.1.3.3 AGUAS RESIDUALES URBANAS

En esta fracción se encuentran los desechos líquidos de la ciudad, es decir, todo lo que va por desagües y alcantarillas. Este residuo se recoge en las depuradoras y aunque su fracción de sólidos es muy baja, su volumen suele ser muy elevado.

La digestión anaeróbica de este tipo de residuos ya lleva bastante tiempo utilizándose como una parte más del proceso de depuración del agua antes de verterla de nuevo al río.

3.1.3.4 CULTIVOS ESPECIFICOS

Los cultivos energéticos poseen una gran producción de biogás, ya que se cultivan plantas como el maíz, sorgo, forrajes y otros cultivos seleccionados para ello. En cuanto a rendimiento y producción es de lo mejor, pero hay que tener en cuenta que estamos cultivando para ello en lugar de aprovechar residuos, con lo que la rentabilidad económica puede bajar. Además, en este caso habría que contemplar otros posibles efectos como la ocupación de tierras de cultivo y el uso de recursos hídricos y humanos. Aunque también puede ser un efecto positivo para dar trabajo y aprovechar tierras abandonadas.

Otro uso consiste en utilizar los cultivos energéticos como co-substrato en la digestión, junto a cualquiera de los anteriormente mencionados. Esto permite optimizar la producción de biogás gracias a su elevado contenido energético. Además, el substrato

digerido puede ser utilizado como fertilizante en los mismos terrenos donde estas plantas se han cultivado.

3.2 FASES DEL PROCESO

El proceso para la producción de biogás se detalla en la Figura 3.1, en ella se pueden ver las distintas etapas que tienen lugar en una planta de digestión anaerobia: pretratamiento y depósito para la alimentación; digestor donde tiene lugar el proceso biológico; gasómetro para recoger el biogás producido y otro depósito para el digerido (efluente).

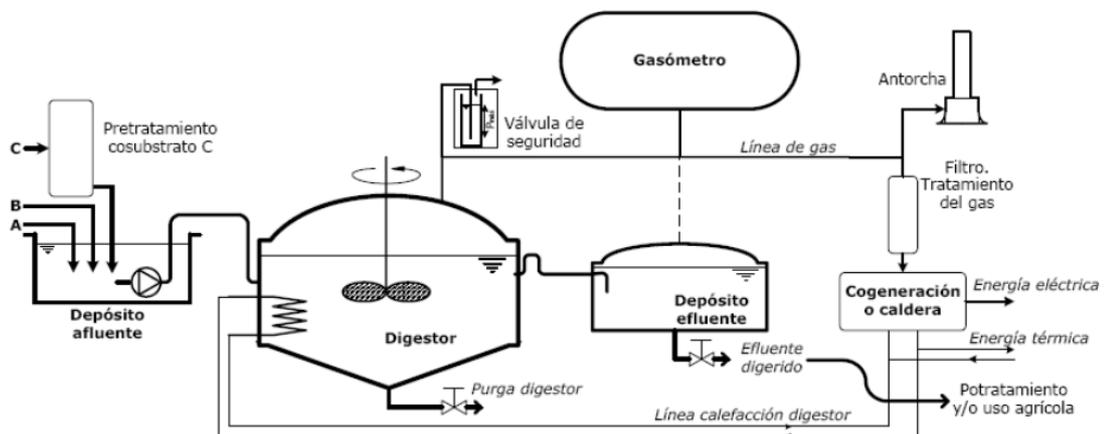


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del proceso de biogás

3.2.1 PRETRATAMIENTO Y ALIMENTACIÓN

La alimentación del proceso se lleva a cabo de forma que se introduzca material fermentable, que este tenga características adecuadas para el correcto funcionamiento de la planta según su diseño industrial, y que posea una composición y concentración relativamente estables. Además, al tratarse de un proceso biológico, se requiere asegurar una alimentación constante que no altere el metabolismo de los microorganismos implicados, y que por lo tanto no pueda afectar el rendimiento de la planta.

Mediante los conjunto de operaciones y procesos desarrollados para este fin, como el pretratamiento mecánico del sustrato (trititación), el ataque con ultrasonido, el

ataque químico (ácido o alcalino) y el pretratamiento térmico o termoquímico; se reduce el tamaño de partícula, facilitando la hidrólisis y la digestión. El pretratamiento de la alimentación y su retención antes de ser suministrado, homogeneiza el material e inicia el proceso, con lo que se evitan problemas posteriores.

Como se ha comentado anteriormente, la codigestión es una variante tecnológica del proceso que puede solucionar problemas o carencias de un material, si son compensadas por las características de otro. En este proceso de codigestión se combinan varias mezclas de sustratos orgánicos biodegradables, logrando aumentar el potencial de producción de biogás por kilogramo de mezcla degradado.

3.2.2 PROCESO BIOLÓGICO

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas, como por la gran variedad de grupos de bacterias involucradas en ellas. Ocurriendo muchas de ellas de forma simultánea, mientras que otras son secuenciales. En la Figura 3.2, se pueden observar las reacciones que transcurren durante la digestión.

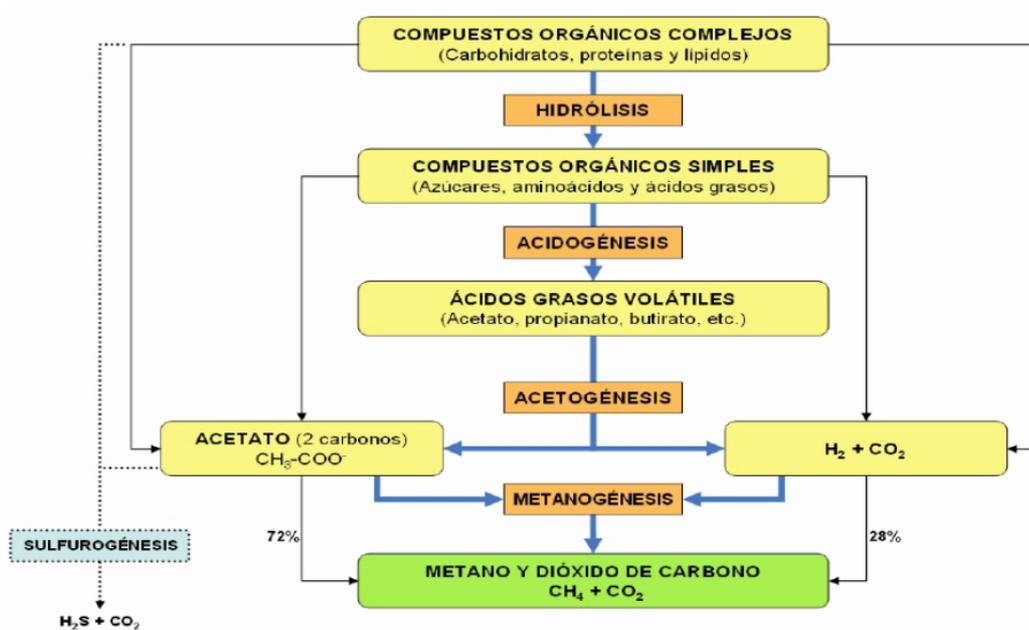


Figura 3.2: Esquema general de transformaciones bioquímicas durante el proceso de digestión anaeróbica

A pesar de la gran cantidad de reacciones, el proceso de degradación de la materia orgánica se divide generalmente en cuatro etapas:

- a) Hidrólisis.
- b) Etapa fermentativa o acidogénesis.
- c) Acetogénesis.
- d) Metanogénesis.

3.2.2.1 HIDRÓLISIS

La alta complejidad de la materia orgánica presente en los residuos biodegradables no permite que esta sea aprovechada directamente por los microorganismos presentes en el medio anaeróbico, por lo tanto se requiere la hidrolización de los compuestos solubles, para que sea posible el paso de estos a través de las membranas celulares de los microorganismos. Este proceso es desarrollado por las exoenzimas liberadas por ciertos grupos de bacterias como: Enterobacteriaceae, Bacillus, Bacteroides,...

La hidrolisis es además la etapa que limita la velocidad global del proceso, especialmente en residuos con alto contenido de sólidos, ya que se requiere que se desarrolle el ataque enzimático sobre el sustrato para que se liberen los compuestos orgánicos que las poblaciones microbianas pueden descomponer. Este proceso puede ser acelerado mediante la aplicación de pretratamientos físicoquímicos Como ya habíamos comentado.

Básicamente cualquier sustrato orgánico biodegradable está compuesto por tres tipos de macromoléculas: carbohidratos, proteínas y lípidos. En la etapa de hidrolisis las bacterias fermentativas convierten las macromoléculas procedentes de la etapa de desintegración en moléculas solubles: los polímeros complejos como los carbohidratos son hidrolizados a monómeros tales como azúcares y alcoholes, las proteínas a péptidos o amino ácidos y los lípidos a ácidos grasos de cadena larga. Los polisacáridos al ser hidrolizados producen azúcares más simples.

Cabe destacar que uno de los componentes más comunes de los residuos de origen agroindustrial son los materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Los principales productos de la hidrólisis de los materiales celulósicos son la celobiosa y la glucosa, mientras la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos irónicos. Sin embargo la lignina es un material orgánico altamente resistente a la degradación anaeróbica, lo cual afecta también la biodegradabilidad de la alimentación y a la velocidad a la cual se realiza la hidrólisis.

3.2.2.2 ACIDOGÉNESIS

La acidogénesis es la segunda etapa de la digestión anaeróbica, en la cual las moléculas orgánicas solubles son catabolizadas por varios grupos de microorganismos generando compuestos tales como ácido acético, ácido fórmico, hidrogeno y dióxido de carbono, que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas.

De acuerdo a la ruta metabólica utilizada durante la fermentación también se pueden generar compuestos orgánicos más reducidos como ácido láctico, etanol, ácido propiónico, ácido butírico, ácido valérico entre otros, los cuales deben ser oxidados por las bacterias acetogénicas en una etapa posterior antes de que puedan ser aprovechados por los microorganismos metanógenos.

Las proporciones entre los distintos productos de la fermentación varían en función del consumo de hidrogeno molecular (H_2) por parte de las bacterias que utilizan el hidrogeno. Cuando este es eliminado de manera eficiente, las bacterias fermentativas no producen compuestos reducidos, como etanol, favoreciendo la generación de hidrogeno y la consecuente liberación de energía en forma de ATP.

De acuerdo al tipo de metabolito disponible para la acidogénesis se desarrollan las siguientes fermentaciones: de carbohidratos solubles, de aminoácidos y de ácidos grasos de cadena larga.

La Tabla 3.1 muestra las reacciones totales de los carbohidratos solubles cuando se presentan a bajas presiones parciales de hidrogeno (a) y a altas presiones parciales de

oxígeno (b) respectivamente; de los aminoácidos (c) y de los ácidos grasos de cadena larga (d).

Tabla 3.1: Reacciones fermentativas para los carbohidratos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga.

a.	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O + 4ADP + 4P \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2 + 4ATP$
b.	$C_6H_{12}O_6 + 3ADP + P \rightarrow CH_3COOH + CH_3CH_2COOH + CO_2 + H_2 + 3ATP$
c.	$C_4H_6ON + 0.114HCO_3^- + 1.478H_2O \rightarrow 0.247C_5H_7O_2N + 0.3CH_3COO^-$ $+ 0.28CH_3CH_2COO^- + 0.286CH_3(CH_2)_2COO^- + 0.753NH_4^+ + 0.298CO_2$ $\Delta G^0 = -37.1 \text{ kJ/mol}$
d.	$CH_3(CH_2)_{14}COO^- + 14H_2O \rightarrow 8CH_3COO^- + 7H^+ + 14H_2 \quad \Delta G^0 = 345.6 \text{ kJ/mol}$

3.2.2.3 ACETOGENESIS

Mediante serie de procesos se realiza la conversión bioquímica de los productos de la acidogénesis para producir acetato, que puede ser utilizado por los organismos metanogénicos. Para ello hay dos mecanismos de reacción: la acetogénesis acetoclastica y la homoacetogenesis hidrogenotrófica.

Mediante el primer mecanismo algunos metabolitos como valerato, butirato y propionato, son transformados en acetato e hidrogeno. El segundo mecanismo de reacción implica la síntesis del acetato a través del consumo de hidrogeno y dióxido de carbono. La Tabla 3.2 presenta las principales reacciones que se suscitan durante la acetogénesis.

Tabla 3.2 Reacciones Acetogénicas

Reacción de ácidos grasos	$\Delta G(\text{kJ})$
$\text{Propionato} + 3H_2O \rightarrow \text{Acetato} + HCO_3^- + H^+ + 3H_2$	+76.1
$\text{Butirato} + 2H_2O \rightarrow 2\text{Acetato} + H^+ + 2H_2$	+48.1
$\text{Valerato} + 3H_2O \rightarrow 3\text{Acetato} + 2H^+ + 4H_2$	+48.1

3.2.2.4 METANOGÉNESIS

Las bacterias metanogénicas se clasifican dentro del género Archea y son las responsables de la formación del metano a partir de moléculas con uno o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente e hidrogeno, las moléculas más comunes son acetato, dióxido de carbono, formato, metanol y algunas metilaminas.

Es posible establecer una clasificación de acuerdo al sustrato que utilizan dentro de su metabolismo, dividiéndose en los grupos hidrogenotróficos, los cuales consumen hidrogeno y ácido fórmico; y los grupos denominados metilotróficos o acetoclasticos los cuales metabolizan los grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas. Este último grupo produce aproximadamente el 70% del metano generado durante el proceso de digestión anaeróbica

3.2.3 TRATAMIENTO Y REFINAMIENTO DEL GAS

El resultado de la digestión anaerobica es una mezcla de gases constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 50% y un 70 % en volumen según el tipo de alimentación utilizada, y dióxido de carbono (CO_2), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).¹ El biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 megajulios por metro cúbico (MJ/m^3), comparados con los 33 a 38 (MJ/m^3) del gas natural. En la tabla Tabla 3.3, se puede ver una comparación de los distintos gases contenidos en el biogás comparados con el gas natural y el gas de vertedero

Tabla 3.3: Composiciones del gas natural, del biogás y del gas de vertedero.

Constituents	Units	Natural Gas	Biogas	Landfill gas
Methane CH ₄	Vol%	91	55-70	45-58
Ethane C ₂ H ₆	Vol%	5.1	0	0
Propane C ₃ H ₈	Vol%	1.8	0	0
Butane C ₄ H ₁₀	Vol%	0.9	0	0
Pentane	Vol%	0.3	0	0
CO ₂	Vol%	0.61	30-45	32-45
Nitrogen (N ₂)	Vol%	0.32	0-2	0-3
Volatile Organic Compounds (VOC)	Vol%	0	0	0.25-0.50
Hydrogen (H ₂)	Vol%	0	0	Trace to less than 1%
Hydrogen Sulphide (H ₂ S)	ppm	~1	~500	10-200
Ammonia (NH ₃)	ppm	0	~100	0
Carbon Monoxide (CO)	ppm	0	0	trace

El principal uso del biogás es el de quemarse en la propia planta a fin de producir el calor necesario para mantener el proceso en sus óptimas condiciones y electricidad, tanto para el propio consumo de la planta como para verterla a la red. Estas instalaciones están adaptadas para quemar el biogás sin prácticamente ningún tratamiento, pero si se pretende utilizar el gas en otro tipo de instalaciones, vehículos o venderlo en botellas o a través de gaseoductos, es necesario tratarlo para mejorar sus propiedades.

Para su uso en otras instalaciones, el refinado dependerá del equipo que se vaya a utilizar. En el caso de calderas o equipos combinados de calor y electricidad similares a los de la propia planta, se recomienda condensar el vapor de agua que tenga y eliminar el sulfuro de hidrogeno (H₂S).

En caso de que se quiera utilizar en vehículos o venderse como gas, deberá cumplir los mismos requisitos que el gas natural:

- Un valor calorífico más alto, (generalmente aumentando el porcentaje de metano hasta el 95%)
- Una calidad del gas que permita una operación segura y un correcto funcionamiento de los equipos.

- Eliminar el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y el agua para evitar problemas de corrosión.
- Limpiar el gas de cualquier partícula física que pueda contener.

Además, el biogas debe ser comprimido. Una vez purificado se considera que es uno de los combustibles más limpios, con un impacto mínimo sobre el medio ambiente y la salud humana.

El metano contenido en el biogás también puede ser utilizado como combustible en células de combustible. Estas células son sistemas de generación de energía que producen electricidad en corriente continua mediante la combinación de combustible y oxígeno (del aire) en una reacción electroquímica. Al no haber un proceso intermedio de conversión en energía mecánica o calorífica, tienen emisiones extremadamente bajas. En principio, las pilas de combustible funcionan como una batería, pero, a diferencia de una batería no necesita recargarse, producirá electricidad siempre y cuando se la suministre combustible.

Para profundizar más en este aspecto nos iremos al apartado

3.3 TECNOLOGÍAS DE REFINAMIENTO DE BIOGAS

Existen una serie de tecnologías de refinamiento del gas se han desarrollado para el tratamiento de gas natural, gases de vertedero y gas ciudad, sin embargo, no todos ellos se recomiendan para el biogás por el precio excesivo o problemas medioambientales.

3.3.1 ELIMINACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

La eliminación de dióxido de carbono aumenta la concentración de metano, por lo que aumenta el poder calorífico del gas

En la actualidad, se utilizan cuatro métodos diferentes a nivel comercial:

- Lavado en agua
- Lavado en polietilenglicol
- Filtros moleculares de carbono
- Separación por membranas

Lavado en agua (Figura 3.3), elimina gran parte del dióxido de carbono y del sulfuro de hidrógeno, ya que estos gases tienen mayor solubilidad en agua que el metano. Es un proceso puramente físico. El agua utilizada puede ser regenerada y se recircula pero el método más eficaz es utilizar agua barata, como el agua de una planta de tratamiento de aguas residuales y evitar la recirculación.

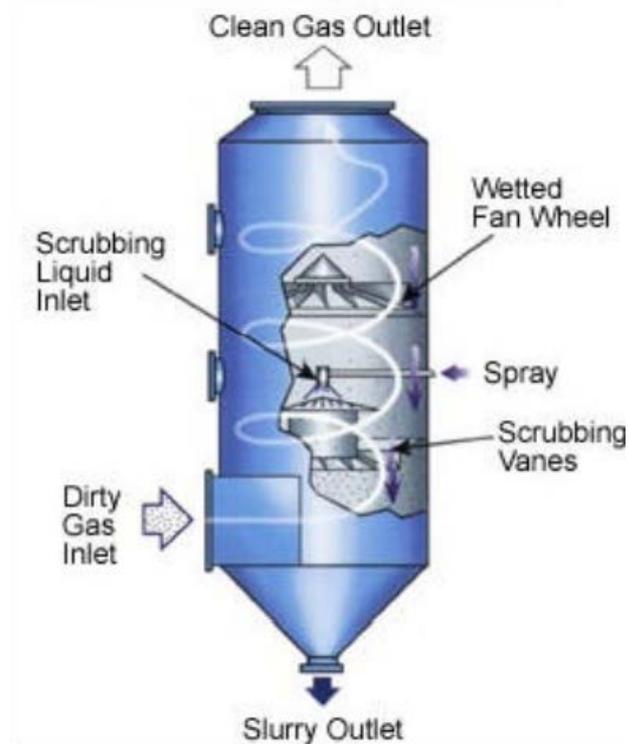


Figura 3.3: Depuradora para lavado en agua.

Lavado en polietilenglicol es un proceso físico muy similar al lavado con agua. La diferencia es que el dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno son más soluble en este disolvente y se requieren menores cantidades. Además, el agua y los hidrocarburos halogenados también se eliminan durante el este lavado, que se realiza siempre con recirculación.

Filtros moleculares de carbono, en este sistema, la moléculas se adsorben en las cavidades del filtro molecular de forma selectiva según la presión y el tamaño de las

cavidades. Al liberarse la presión, las partículas atrapadas escapan permitiendo su reutilización.

Membranas, Hay dos sistemas básicos de membrana de purificación de gas. Una de ellas es la de alta presión, que utiliza gas en ambos lados de la membrana. Las membranas (hechas de -acetato de celulosa) pueden separar las pequeñas moléculas polares, tales como el dióxido de carbono, el agua y el sulfuro de hidrógeno.

En las de baja presión, un líquido absorbe las moléculas que se difunden a través de la membrana. El elemento esencial es una membrana microporosa hidrófoba que separa la fase gaseosa de la fase líquida.

3.3.2 ELIMINACIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO

El sulfuro de hidrógeno se debe quitar para evitar la corrosión. Los métodos mas comunes para la eliminación de sulfuro de hidrógeno son]:

- Dosificación de Oxígeno al de biogás
- Dosificación de Cloruro de hierro a la alimentación del digestor
- Óxido de hierro
- Carbón activo
- Lavado en agua
- Lavado en sosa (NaOH)

La desulfuración biológica de biogás se puede realizar por microorganismos, es esencial para ello, agregar cantidades estequiométricas de oxígeno al digestor.

La dosificación de Oxígeno es el método más simple de desulfuración. Consiste en la adición de oxígeno o aire (2 a 6%) directamente en el digestor o en un tanque de almacenamiento que sirve al mismo tiempo como contenedor de gas. En este caso hay que tomar medidas de seguridad para evitar la sobredosificación de aire en el biogás, ya que este es explosivo en el intervalo de 6 a 12% dependiendo del contenido de metano.

En las grandes plantas de digestión, a menudo hay un procedimiento combinado de depuración de agua y desulfuración biológica.

Dosificación de Cloruro de hierro consiste en añadir directamente a la alimentación cloruro de hierro. Este reacciona con el sulfuro de hidrógeno para producir sulfuro de hierro en forma de partículas.

Óxido de hierro (o también hidróxido de hierro), este reacciona uniéndose al sulfuro de hidrógeno (H_2S). La reacción es ligeramente endotérmica (temperatura mínima de $12^\circ C$) y el biogás no debe ser demasiado seco, ya que la reacción necesita agua. El sulfuro de hierro formado puede ser oxidado posteriormente con aire de manera que el óxido de hierro se recupera. Este proceso es altamente exotérmico. Por lo general, una instalación tiene dos camas de reacción. Mientras que en el primero se desulfura el biogás, en el segundo se regenera el óxido con el aire.

El carbón activo también se utiliza para adsorber azufre. El sulfuro de hidrógeno (H_2S) tiene que ser convertido antes en azufre y agua para poder ser adsorbido.

3.3.3 ELIMINACIÓN DE HIDROCARBUROS HALOGENADOS

Los hidrocarburos halogenados causan corrosión en los equipos, por lo que los fabricantes especifican los límites máximos de hidrocarburos halogenados en el biogás.

Se pueden eliminar con un tubo intercambiador a presión, relleno de carbono activo. Las moléculas pequeñas como metano (CH_4), oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2) pasan a través, mientras que las moléculas más grandes son absorbidas.

3.3.4 ELIMINACIÓN DE SILOXANOS

Los compuestos orgánicos de silicio están presentes ocasionalmente en el biogás y pueden causar graves daños a los equipos. Estos pueden ser removidos por absorción en un medio líquido, formado por una mezcla de hidrocarburos compuestos con características específicas para absorber estos compuestos. Este medio se regenera por medio de calentamiento, provocando la desorción.

3.4 DIGESTATO

La digestión anaeróbica puede ser vista como un método para tratar los residuos orgánicos y para producir biogás, pero para extraer el máximo valor del proceso de recuperación de estos residuos, el digestato, es decir, el lodo que sale del digestor tras concluir el proceso, debe tener también un propósito útil y un beneficio derivado de su producción.

Su principal ventaja es que tiene un alto contenido de nutrientes. Su calidad debe ser adecuada para su propósito, como por ejemplo fertilizante, restauración de suelos o restauración paisajística. La calidad del digestato puede ser considerada según tres criterios: químicos, biológicos y físicos.

Los aspectos químicos están relacionados con la presencia de:

- Metales pesados y otros contaminantes inorgánicos
- los contaminantes orgánicos persistentes
- nutrientes

Los desechos agrícolas pueden contener contaminantes orgánicos persistentes, como pesticidas o antibióticos, Los residuos orgánicos industriales, lodos de depuradora y residuos urbanos pueden contener hidrocarburos aromáticos y halogenados, entre otros contaminantes.

El control de calidad de este tipo de biomasa es esencial en relación con el tratamiento biológico, ya que los daños que puede causar son muy elevados. Los principales problemas están relacionados con:

- Patógenos
- Semillas
- La encefalopatía espongiiforme transmisible (EET)

La presencia de impurezas físicas en el digestato puede causar además, una percepción pública negativa de esta tecnología, por no hablar que el daño estético al medio ambiente aumentaría los costes operacionales.

Las impurezas físicas más frecuentes son:

- Plásticos y gomas
- Metales
- Vidrios y cerámicas
- Arena y piedras
- Materiales celulósicos (madera, papel ...)

La contaminación del digestato depende inevitablemente de la naturaleza de las materias primas (residuos), los pretratamientos aplicados y de la digestión en sí.

3.4.1 USO DEL DIGESTATO

La digestión anaerobia consume el carbono, hidrógeno y oxígeno de la materia prima, pero los nutrientes esenciales para las plantas nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) permanecen en gran medida en el digestato.

La composición de los agentes fertilizantes depende de la materia prima utilizada y, por tanto, puede variar de un digestato a otro, pero la disponibilidad de nutrientes es mayor en digestato que en los residuos orgánicos sin tratar. Estos nutrientes (NPK) son mineralizados para permitir una mejor absorción por las plantas. Otra ventaja es que se reduce la molestia de olor en un 80%. El uso de digestato también beneficia el equilibrio de humus en el suelo. Por lo tanto, se puede utilizar fertilizante en agricultura y jardinería, permitiendo la creación de un ciclo de nutrientes y manteniendo o mejorando la estructura del suelo.

El uso de los digestatos depende de su calidad, así como el tipo de planta en el que se haya producido. Por ejemplo, para granjas e incluso cooperativas con digestores comunes utilizan el lodo digerido o digestato sin más tratamiento, como fertilizante en tierras de cultivo.

En ocasiones, el digestato puede ser deshidratado y así separado en dos fracciones: la fibra o substrato sólido y el licor o efluente líquido. Al desecar y extender la

fibra, no se hace necesario la aspersión y permite centrar mas la localización y reducir costes.

La fibra es voluminosa y contiene un bajo nivel de nutrientes de las plantas. Se puede utilizar como un acondicionador del terreno o como un fertilizante suave. Se puede utilizar tambien como una alternativa a la turba. El procesamiento posterior de la fibra a través de compostaje produce un compost de muy buena calidad.

El licor (efluente líquido) contiene una gran proporción de nutrientes y suele ser utilizado como fertilizante. Su alto contenido de agua facilita su aplicación a través de métodos convencionales de riego, lo que representa una ventaja sobre el compost, ya que se pueden aplicar durante todo el ciclo de cultivo.

El uso de la fibra y el licor de las plantas de biogás ha llevado a una mejora de los fertilizantes y, por tanto, un menor consumo de productos químicos en los sistemas de cultivo.

3.4.2 COMPOSTAJE DE DIGESTATO

Con el fin de obtener un producto de alta calidad, con un valor más alto, el digestato puede ser transformado en compost. De este modo se aseguraría una disociación completa de la materia orgánica, así como la fijación del nitrógeno mineral lo que reduciría la pérdida de nitrógeno.

Utilizado como un aditivo para otros procesos de compostaje, el digestato proporciona una buena fuente de nitrógeno para acelerar el proceso. Al mismo tiempo, se enriquece el compost en fósforo y micro nutrientes como magnesio (Mg) y hierro (Fe). El contenido de agua del digestato también es interesante para la gestión de la humedad en el proceso de compostaje.

3.5 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a la gran variedad de bacterias presentes y a que cada una de ellas interviene y se ve afectada de manera diferente no es posible dar valores cuantitativos del grado en el que las afecta cada uno de los factores respecto a la producción de gas. Por lo tanto nos limitaremos a dar una valoración cualitativa de los factores que pueden afectar en mayor medida al proceso. Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se encuentran los siguientes:

- El tipo de sustrato (nutrientes disponibles)
- La temperatura del sustrato
- La carga volumétrica
- El tiempo de retención hidráulico
- El nivel de acidez (pH)
- La relación Carbono/Nitrógeno
- La concentración del sustrato
- El agregado de inoculantes
- El grado de mezclado
- La presencia de compuestos inhibidores del proceso.

3.5.1 TIPO DE SUBSTRATO:

Las materias primas fermentables incluyen un amplio espectro de posibilidades, desde excrementos animales y humanos, aguas residuales de ciertas industrias, restos de cosechas y basuras de diferentes tipos.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales como azufre, fósforo, potasio, calcio...

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de ciertos compuestos o bien un post tratamiento aeróbico

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina.

En lo atinente a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. Presentando por ello grandes diferencias en los valores tanto de producción como de rendimiento de gas.

A modo ilustrativo se muestra a continuación en la Tabla 3.4 un cuadro indicativo sobre cantidades de estiércol producido por distintos tipos de animales y el rendimiento en gas de los mismos tomando como referencia el kilogramo de sólidos volátiles.

Tabla 3.4: Datos ilustrativos de producción de biogás con estiércol animal.

ESPECIE	PESO VIVO	kg ESTIERCOL/día	l/kg.S.V.	%CH ₄
Cerdos	50	4,5 - 6	340 - 550	65 - 70
Vacunos	400	25 -40	90 - 310	65
Equinos	450	12 - 16	200 - 300	65
Ovinos	45	2,5	90 - 310	63
Aves	1.5	0,06	310 - 620	60
Caprinos	40	1,5	110 - 290	-

3.5.2 TEMPERATURA DEL SUSTRATO

La temperatura es uno de los parámetros fisicoquímicos más importantes que afecta directamente el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica. Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4º a 5º C y no se debe sobrepasar una temperatura máxima de unos 70ºC. Se realiza generalmente una diferenciación en tres rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predominan en cada una de ellas. Podemos observarlo en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Clasificación del proceso de gasificación según el rango de temperatura

BACTERIAS	RANGO DE TEMPERATURAS	SENSIBILIDAD
Psicrofílicas	menos de 20°C	± 2°C/hora
Mesofílicas	entre 20°C y 40°C	± 1°C/hora
Termofílicas	más de 40°C	± 0,5°C/hora

Podemos observar en la Figura 3.4 que la actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura. Al mismo tiempo se deberá tener en cuenta que al no generar calor el proceso la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior. El cuidado en el mantenimiento también debe extremarse a medida que aumentamos la temperatura, dada la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones térmicas.

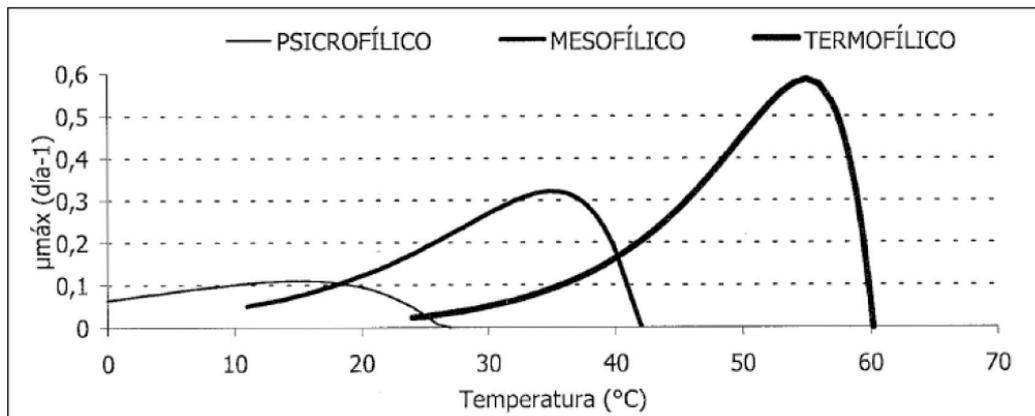


Figura 3.4: Rendimiento de las bacterias según el rango de temperatura.

Todas estas consideraciones deben ser evaluadas antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento de un digestor ya que a pesar de incrementarse la eficiencia y producción de gas paralelamente aumentará los costos de instalación y la complejidad de la misma.

Los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas poseen generalmente sistemas de calefacción, aislamiento y control los cuales son obviados en digestores rurales económicos que trabajan a bajas temperaturas.

La temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (Tiempo de retención Hidráulica, TRH). A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa.

3.5.3 CARGA VOLUMÉTRICA

Con este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que, al ser el volumen del digestor constante, a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. Generalmente se expresa como kg de material/día; kg de materia seca/día; kg de sólidos volátiles/día todos expresados por metro cúbico de digestor.

Un factor importante a tener en cuenta en este parámetro es la dilución utilizada, debido a que una misma cantidad de material biodegradable podrá ser cargado con diferentes volúmenes de agua; pero solamente la materia orgánica puede producir biogás. Parámetro que cobra especial importancia en casos como aguas residuales, purines, depuradoras...

3.5.4 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH)

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o batch” donde el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define

como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria.

El TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una actividad más elevada de las bacterias, y por lo tanto, una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente una disminución en los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos. En la Figura 3.5 podemos observar cómo se distribuye en función al tiempo de retención la producción diaria de gas para materiales con distintas proporciones de celulosa.

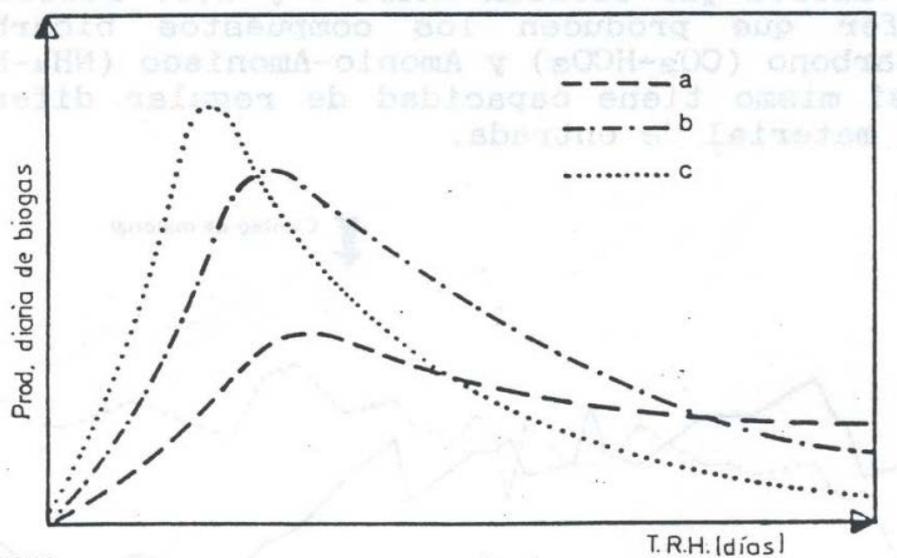


Figura 3.5: TRH según el contenido en celulosa.

El límite mínimo de los T.R. está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del reactor.

3.5.5 EL NIVEL DE ACIDEZ (PH)

Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7 y 8,5. Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono ($\text{CO}_2\text{--HCO}_3$) y Amonio-Amoníaco ($\text{NH}_4\text{--NH}_3$) el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada.

En la Figura 3.6, se puede observar el PH optimo se encuentra entre 6,5 y 7,5 y una desviación elevada de estos valores provocaría un rápido deterioro de las bacterias y un efecto negativo importante en el proceso fermentativo. Estas desviaciones son indicativas de un fuerte deterioro del equilibrio entre las bacterias de la faz ácida y la metanogénica provocado por severas fluctuaciones en alguno de los parámetros que gobiernan el proceso.

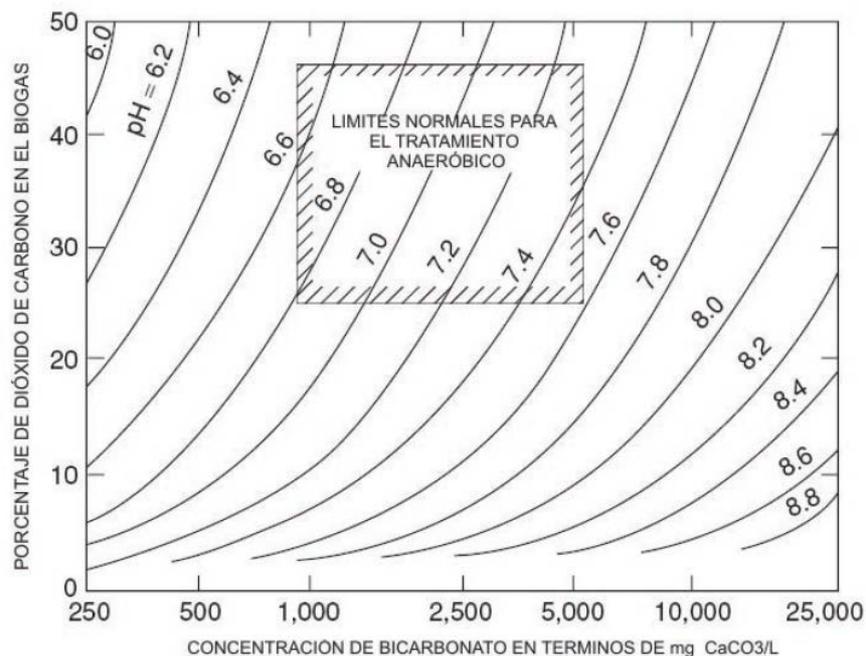


Figura 3.6: Rango adecuado de PH

3.5.6 LA RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO

El nitrógeno es esencial para el crecimiento y la actividad de las bacterias. La materia prima que contiene una baja razón carbono/nitrógeno es digerida fácilmente, pero los residuos agrícolas leñosos tales como la paja de trigo o de arroz, requieren un

suministro extra de nitrógeno para una digestión eficiente.

El alto contenido de celulosa de los pastos y residuos agrícolas hace que sean difíciles de digerir. Las heces humanas y orines, y también los desechos de animales son ricos en nitrógeno y nutrientes necesarios para el crecimiento y multiplicación de las bacterias anaeróbicas. Para una producción óptima de biogás, se deben alimentar los diversos tipos de biomasa en proporciones cuidadosamente balanceadas y mezcladas. Se recomienda que la razón carbono/nitrógeno de los materiales combinados de alimentación sea mantenida menor de 30:1.

3.5.7 LA CONCENTRACIÓN DEL SUSTRATO

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Mediciones realizadas utilizando mezclas de estiércoles animales en agua han determinado que para digestores continuos el porcentaje de sólidos óptimo oscila entre el 8% y el 12%.

3.5.8 EL AGREGADO DE INOCULANTES

El crecimiento bacteriano dentro de los digestores sigue desde su arranque la curva típica graficada en la siguiente figura.

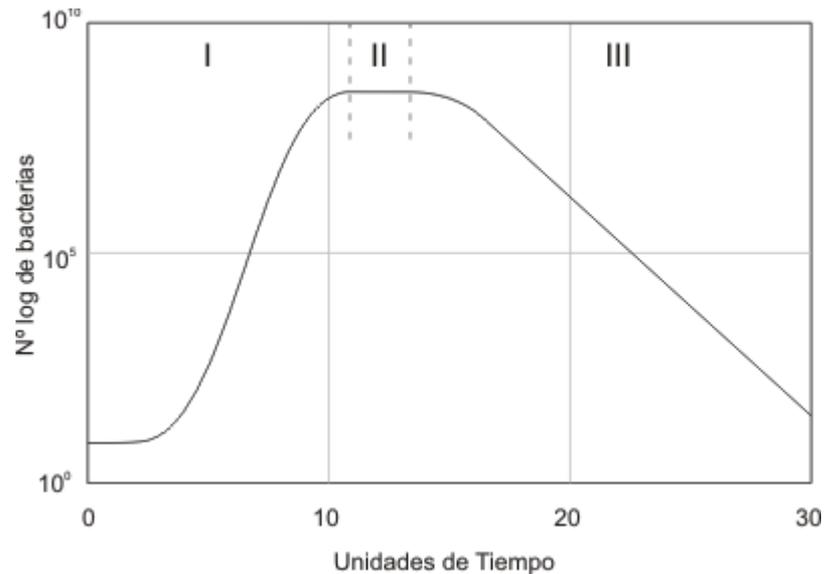


Figura 3.7: Crecimiento bacteriano en un bioreactor.

En la Figura 3.7 pueden distinguirse claramente tres etapas: La de arranque (I), la de estabilización (II) y la de declinación (III).

La primera etapa puede ser acortada mediante la inclusión de un determinado porcentaje de material de otro digestor rico en bacterias que se encuentran en plena actividad. Esto es particularmente importante en los digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente.

Al llegarse en forma más rápida a la estabilización puede incrementarse la producción de gas por kg. de estiércol. Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor es la proporción en que se agrega y la edad del mismo. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad mayor será la eficacia.

3.5.9 EL GRADO DE MEZCLADO

Los principales objetivos buscados con la agitación son: remover los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costras dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se deberán tener en cuenta que el proceso fermentativo involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio por un excesivo o deficiente agitación implicará una disminución en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de gas.

Existen varios mecanismos de agitación utilizados desde los más simples que consisten en un batido manual o el provocado por la entrada y salida de los líquidos hasta sofisticados equipos que involucran agitadores a hélice, recirculadores de sustrato e inyectores de gas.

3.5.10 LA PRESENCIA DE COMPUESTOS INHIBIDORES DEL PROCESO.

La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo.

Tabla 3.6: Principales inhibidores del proceso fermentativo.

INHIBIDORES	CONCENTRACION INHIBIDORA
SO ₄	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/l
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/l
Na	3.500-5.500 mg/l
K	2.500-4.500 mg/l
Ca	2.500-4.500 mg/l
Mg	1.000-1.500 mg/l

En la Tabla 3.6 se dan valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes. Valores que se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias intervinientes pueden con el tiempo adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba marcadamente. También se inhibirá la digestión cuando sea demasiado alta la concentración de ácidos volátiles (más de 2.000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3.600 ppm para la termofílica) o por una elevada concentración de Nitrógeno y Amoníaco que destruyen las bacterias metanogénicas.

4 TIPOS DE DIGESTORES

Según la aplicación que tendrá el gas, las características del material a ser digerido, a las exigencias de descontaminación del residuo y a la relación costo-inversión-beneficio ha permitido el desarrollo de diversos tipos de digestores.

A fin de simplificar el análisis de los distintos tipos de digestores se agruparan de distintas maneras según el siguiente esquema:

- Según la carga
 - Sistema batch
 - Sistema continuo o semicontinuo
- Según la intensidad de la mezcla
 - Mezcla completa
 - Mezcla parcial o nula
- Según el manejo del subtrato
 - Contacto anaeróbico
 - U.a.s.b.: (upflow anaerobic sludge blanket)
 - Lecho fluidizado
 - Filtro anaeróbico
- Según manejo bioquímico
 - Una etapa
 - Dos etapas

4.1 SEGÚN LA CARGA

4.1.1 SISTEMA BATCH

Consisten principalmente en un tanque cerrado con una salida para los gases. Es el sistema más antiguo y sencillo. Se caracterizan por una carga y vaciado total de la cámara de digestión en cada ciclo. De uso común en laboratorios y en el tratamiento de materias vegetales. Con o sin agitación. Se recomienda para acelerar su arranque de una

proporción de inóculo 20%. Su curva de producción de gas sigue la característica (arranque-estabilización-agotamiento).

Esto obliga a fin de mantener una producción de gas estable a lo largo del tiempo a poseer por lo menos tres o cuatro digestores de este tipo cada uno de los cuales se hallará operando en las distintas etapas. Lo que permite mantener la producción de biogas en un cierto nivel uniforme. La Figura 4.1 nos muestra la historia de la producción de gas en función del tiempo de un sistema Batch de 4 reactores.

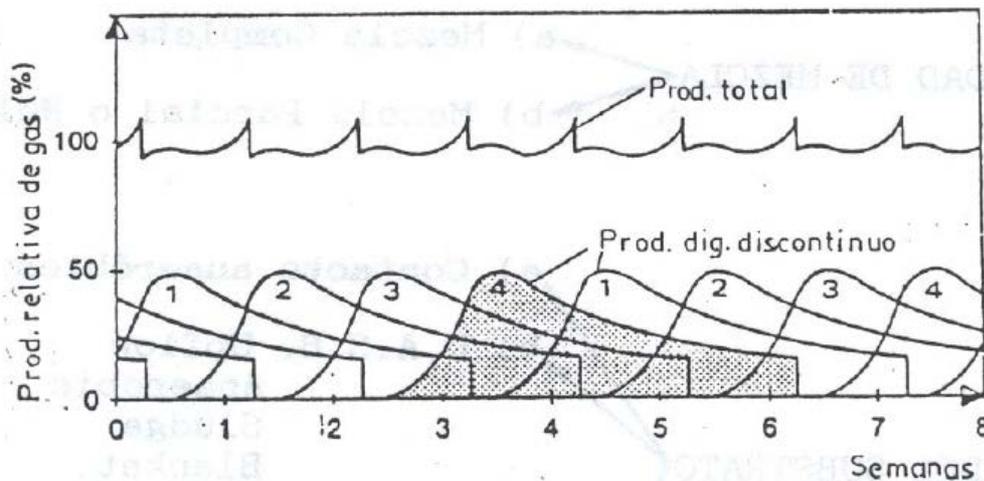


Figura 4.1: Producción de gas en un reactor tipo Batch.

Este tipo de digestores son eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. Su utilización no está muy difundida.

4.1.2 SISTEMA CONTINUO O SEMICONTINUO

En este tipo de digestores el volumen que se introduce, desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida. De este modo el volumen del substrato en la cámara de digestión se mantiene siempre constante.

Los continuos se cargan generalmente de forma diaria, a diferencia de los semicontinuos, que se descargan totalmente una o dos veces por año que generalmente coincide con el período de siembra para aprovechar los residuos de la digestión y de los lodos

fermentados como fertilizante para el campo, otra parte de estos últimos es utilizada en el nuevo arranque.

El TPH de la biomasa dentro del digestor estará dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de la carga diaria. Dicho valor no es exacto debido a que la parte del material introducido puede salir en un período más corto, lo que se trata de minimizar mediante un adecuado diseño de la cámara.

La mayor parte de los digestores difundidos a lo largo de todo el mundo pertenecen a esta categoría y existen dentro de ella enormes variaciones sobre el mismo principio.

4.2 SEGÚN LA INTENSIDAD DE LA MEZCLA

4.2.1 MEZCLA COMPLETA

En estos digestores se busca que el substrato en fermentación dentro de la cámara se mezcle de forma total, normalmente, de forma diaria. En el caso de los reactores calefaccionados, esta acción asegura una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen. Existen diversos medios para lograr este fin, entre los que podemos mencionar: la agitación de líquidos mediante bombas internas o externas al digestor y la reinyección de biogás dentro de la cámara produciendo un intenso burbujeo.

Se debe tener mucho cuidado en la intensidad y periodicidad de la agitación, para no afectar el delicado equilibrio bacteriano.

4.2.2 MEZCLA PARCIAL O NULA

En este grupo se encuentran los pequeños digestores rurales en los cuales los métodos de agitación son muy rudimentarios (agitadores del tipo manual o rotación de la campana gasométrica). Cuya principal función es evitar la formación de la perjudicial costra.

En otros casos como los digestores del tipo horizontal la agitación se logra mediante la circulación del substrato dentro de la cámara de digestión provista de una serie de tabiques

4.3 SEGÚN EL MANEJO DEL SUBTRATO

4.3.1 CONTACTO ANAERÓBICO

Tanto en este como en los siguientes sistemas se ha buscado algún medio para retener la mayor cantidad posible de bacterias activas dentro de la cámara de digestión para lograr menores tiempos de retención y por lo tanto, reducir el volúmen del digestor para tratar la misma cantidad de biomasa.

En estos digestores la pileta de sedimentación a la salida de los mismos le da la posibilidad a las bacterias que han salido con el efluente a asentarse y decantar para luego ser reintroducidas en forma de lodo, mezclado con material de carga como inoculo.

Existen también otros dos métodos para retener la masa bacteriana a la salida del reactor, como puede ser un sedimentador externo en el cual las partículas más pesadas son recirculadas. El otro consiste en un separador de membranas, que filtra y reintroduce las bacterias, proceso que se realiza mediante un bombeo externo del lodo de la parte inferior hacia la superior.

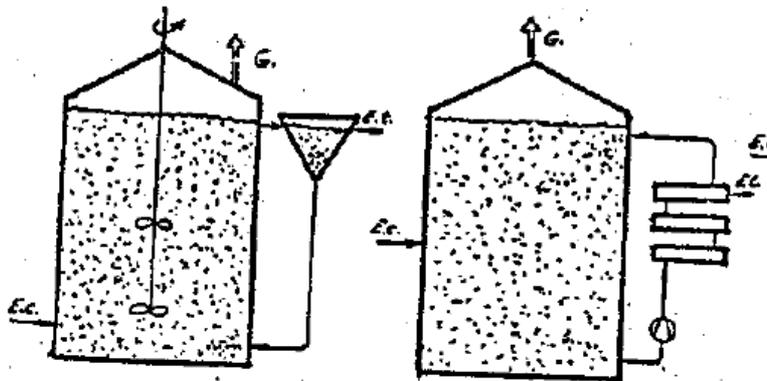


Figura 4.2: recirculación de las bacterias para reducir el TPH

4.3.2 U.A.S.B.: (UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET)

Este modelo de digestor contiene en su interior separadores y mamparas estratégicamente ubicadas que generan zonas de circulación muy lenta, en las cuales las bacterias se agrupan (floculación) y sedimentan, evitando así que salgan con el efluente que sale por la parte superior de la cámara de carga.

Este tipo de digestor es especialmente apto para el tratamiento de desechos agroindustriales como la vinaza, no admite partículas insolubles.

4.3.3 LECHO FLUIDIZADO

En este tipo de reactor unas pequeñas partículas se mantienen en suspensión dentro de la cámara de digestión. Las bacterias se adhieren a estas partículas y no las atacan, por lo que salen junto con ellas. Mediante el filtrado del efluente se pueden recuperar estas partículas junto con las bacterias y se reintroducen en el digestor. Este tipo de reactor está poco difundido y las mayores referencias son de plantas a nivel laboratorio o piloto.

4.3.4 FILTRO ANAERÓBICO

Estos reactores tienen la particularidad de ser alargados, en su interior poseen un medio fijo que no es atacable por las bacterias, que se adhieren las bacterias y así se evita su pérdida, lo que disminuye notablemente el TRH. Existen dos variantes: de flujo ascendente y de flujo descendente.

Debido a estos elementos filtrantes ubicados dentro de la cámara de digestión, no admiten líquidos con material insoluble en suspensión ya que dichos sólidos bloquearían el pasaje del substrato. Tanto este digestor, como los dos anteriores admiten tiempos de retención muy bajos (0,5 a 3 días) con muy altos niveles de eficiencia (se han llegado a valores de producción de biogás de 7 veces el volumen del reactor por día).

4.4 SEGÚN MANEJO BIOQUÍMICO

4.4.1 UNA ETAPA

Todos los tipos de digestores vistos hasta este momento se agrupan en esta categoría debido a que todas las etapas de la digestión anaeróbica se realizan en una única cámara, en la cual todas las bacterias están sometidas a las mismas condiciones.

4.4.2 DOS ETAPAS

Estos reactores se caracterizan por tener dos cámaras de digestión separadas, donde en la primera se desarrolla la etapa acidogénica y en la segunda la acética y la metanogénica. Esto permite optimizar las condiciones de desarrollo de cada tipo de bacterias y extraer los sólidos indigeribles antes que pasen a la etapa metanogénica.

Estos digestores no han sobrepasado la etapa experimental y de plantas piloto y aún resta solucionar una serie de problemas de funcionamiento a gran escala para llegar a una amplia difusión.

5 ANALISIS Y OPTIMIZACION DE UNA PLANTA

Una vez descritos los principios de la digestión anaeróbica, de los factores que más la influyen y de los tipos de tecnología utilizados, vamos a analizar a continuación una planta real a través de un modelo realizado en Excel sus posibles optimizaciones y cambios.

5.1 PLANTA REAL

La planta que se va a analizar se trata del centro de tratamiento de residuos de San Roman, en la cual se pretende producir la digestión anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, o FORSU para producir biogás con el fin de abastecer de energía a la planta y de vender el excedente.

5.1.1 CARACTERISTICAS DE LA PLANTA

La primera parte es la alimentación, donde se separa el metal del RSU y se tritura hasta un tamaño inferior a 40mm, tras ello se mezcla con agua y se mezcla en varios tanques para homogeneizar la mezcla, eliminar inertes y poner en suspensión la fracción orgánica, a fin de facilitar la digestión.

Originalmente tenía un tanque aparte para la hidrólisis, pero actualmente se utiliza como depósito de agua y al hidrólisis se realiza en conjunto al resto de procesos.

Tras ello se introducen en dos digestores que funcionan en serie, por lo que vamos a considerar para simplificar el cálculo en el modelo que se trata de un único tanque del doble de capacidad y altura.

Las principales características de este tanque serían:

- Volumen de 5200 m³.
- Diametro interno de 14,5 m.
- Altura: $17,78 \times 2 = 35,56$ m.
- Aislamiento: 50 mm.
- Producción de gas aproximada de 2000m³/dia.

- Temperatura en el reactor de aproximadamente 37,5°C pero en el modelo nos vamos al siguiente escalon que nos permite, por lo que consideraremos 40°C.
- Alimentación de 153,8 m³/día
- TRH de 34 días
- Porcentaje de metano (CH₄) en el biogás del 65%

Una vez recogido el gas se le condensa la humedad y se almacena para posteriormente quemarse para producir calor y electricidad.

5.2 MODELO UTILIZADO

El modelo que vamos a utilizar es el creado por Paul Harris en 2012 mediante la plataforma de cálculo Microsoft Excel. Lo he elegido por ser uno de los modelos que más información proporciona, tanto sobre varios de los factores que intervienen en el proceso como de aspectos económicos. Aunque originalmente está pensado para la digestión de diversos tipos de estiércol, he realizado algunas modificaciones para poder analizar la codigestión de mezclas de distintos residuos industriales.

El modelo está basado en el libro de Chen [1] y tiene en cuenta principalmente los sólidos volátiles, la temperatura de operación y el tiempo de permanencia hidráulico como principales variables de entrada. Supone un reactor de tipo continuo con alimentación diaria.

5.2.1 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

El libro de Excel está dividido en diferentes hojas de cálculo, que iré mostrando y explicando a continuación.

5.2.1.1 HOJA "CALCULADORA"

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	METHANE CALCULATOR		© Paul Harris, October 18, 2012	Version 23.0								
2												
3	Source		See Table Right									
4	Waste	Beef	Return to Response Surface			Vary the yellow cells						
5	Number	1				Can be varied if required						
6	Weight	500,00	kg									
7	Total Weight	500,00	kg									
8												
9	Manure											
10	Total	58,00	kg per 1000 kg LW per day									
11	TS	8,50	kg per 1000 kg LW per day									
12	VS	7,20	kg per 1000 kg LW per day									
13												
14	Output		Return to Instructions									
15	Total Manure	29,00	kg (per day)									
16	Total Solids	4,25	kg (per day)									
17	Volatile Solids	3,60	kg (per day)									
18	N (Kjeldahl Nitrogen)	0,17	kg (per day)									
19	P (Total Phosphorus)	0,05	kg (per day)									
20	K (Potassium)	0,11	kg (per day)									
21												
22	Gas											
23	Conv'n Eff.	51	% VS destroyed									
24	CH4/kgVS	0,50	m ³ per kg VS destroyed	l/kg manure								
25	CH4	0,93	m ³ per day	31,95								
26	% CH4	70,00										
27	CO ₂	0,40	m ³ per day									
28	Biogas	1,324	m ³ per day									
29	Fuel Val. (methane)	39,00	MJ/m ³									
30	TOTAL Energy	36,14	MJ per day									
31	TOTAL Power	0,42	kW									
32	Electricity	0,17	kW (% conversion efficiency= 40									
33	Electricity Price	14,00	c/kWhr									
34	Electricity Value	\$ 205	\$ per annum									
35												
36	Digester											
37	Dilution Rate	1,2	Times Manure volume(mass	Return to Response Surface								
38	Effluent Volume	0,06	m ³ per day									
39	Safety Factor	4	Recommended	Return to Response Surface								
40	Retention Time	71,0	days									
41	Digester Volume	4,53	m ³									
42	Operating Temperature	15	°C									
43	Volatile Solids Conc.	56,4	kgm ⁻³ (g/litre)									
44												
45	World Weather	http://uk.weather.com/global										
46												
47												

Per 1000kg liveweight (from ASEA Standard D384.1 D)							
No.	Waste	Weight(kg)	Total	TS	VS	N	P
1	Dairy	500	86	12	10	0,45	0,01
2	Beef	500	58	8,5	7,2	0,34	0,01
3	Veal	40	62	5,2	2,3	0,27	0,01
4	Pig	40	84	11	8,5	0,52	0,1
5	Sheep	60	40	11	9,2	0,42	0,01
6	Goat	50	41	13	9,5	0,45	0,1
7	Horse	400	51	15	10	0,3	0,01
8	Broiler	2,2	85	22	17	0,84	0,1
9	Layer	2	64	16	12	1,1	0,1
10	Turkey	8	47	12	9,1	0,62	0,2
11	Duck	3	110	31	19	1,5	0,5
12	human*	68	8,5	1,912	1,701	#N/A	#N
13	MSW						
14	Sewerage						
15	N/A						
16							

* Estimated from some published figures, PLH

Figura 5.1: Hoja "Calculadora"

En esta hoja, que es la principal de trabajo se selecciona el tipo de estiércol que se va a utilizar de la lista, y se escribe en la primera casilla amarilla el número de animales de ese tipo que se poseen, por defecto la hoja trabaja por cada 1000kg de animal vivo.

A continuación, en las siguientes casillas amarillas se introduciría el precio actual de la electricidad y se seleccionaría el factor de seguridad y la temperatura de operación

Tras ello se nos muestran en azul los principales resultados, que, de arriba abajo son:

- La producción de biogás
- La energía producida (total y eléctrica)

- las ventas de la electricidad
- El caudal diario
- El volumen necesario de digestor
- La concentración de sólidos volátiles.

Como ajuste adicional podemos cambiar las casillas en verde si disponemos de datos más precisos sobre el proceso. Entre ellos están:

- El porcentaje de sólidos volátiles destruidos
- El porcentaje de metano en el biogás
- La eficiencia del generador
- La dilución del residuo
- El tiempo de retención hidráulico.

Per 1000kg liveweight (from ASEA Standard D384.1 DEC93)																
No.	Waste	Weight(kg)	Total	TS	VS	N	P	K	VSred	TS/Tot	VS/TS	VS/Tot	OptDiln	Type	Bo	Source
1	Dairy	500	86	12	10	0,45	0,094	0,29	35	14%	83%	12%	1,2	1 Dairy	0,2	Hill, DT. Trans ASAE v2!
2	Beef	500	58	8,5	7,2	0,34	0,092	0,21	65	15%	85%	12%	1,2	2 Beef	0,35	Hill, DT. Trans ASAE v2!
3	Veal	40	62	5,2	2,3	0,27	0,066	0,28	35	8%	44%	4%	0,0	3 Veal	0,2	PLH suggestion
4	Pig	40	84	11	8,5	0,52	0,18	0,29	80	13%	77%	10%	1,0	4 Piggery	0,45	Hill, DT. Trans ASAE v2!
5	Sheep	60	40	11	9,2	0,42	0,087	0,32	60	28%	84%	23%	3,5	5 Sheep	0,35	PLH suggestion
6	Goat	50	41	13	9,5	0,45	0,11	0,31	60	32%	73%	23%	3,5	6 Goat	0,35	PLH suggestion
7	Horse	400	51	15	10	0,3	0,071	0,25	60	29%	67%	20%	3,0	7 Horse	0,35	PLH suggestion
8	Broiler	2,2	85	22	17	0,84	0,3	0,3	70	26%	77%	20%	3,0	8 Broiler	0,39	Hill, DT. Trans ASAE v2!
9	Layer	2	64	16	12	1,1	0,3	0,4	70	25%	75%	19%	2,7	9 Poultry (layer?)	0,39	PLH suggestion
10	Turkey	8	47	12	9,1	0,62	0,23	0,24	70	26%	76%	19%	2,8	10 Turkey	0,39	PLH suggestion
11	Duck	3	110	31	19	1,5	0,54	0,71	70	28%	61%	17%	2,4	11 Duck	0,39	PLH suggestion
12	human*	68	8,5	1,912	1,701	#N/A	#N/A	#N/A	30	22%	89%	20%	3,0	12 Human	0,3	PLH suggestion
13	MSW													13 Municipal Refuse	0,2	Chen Y.R. & Hashimoto
14	Sewerage													14 Sewerage Sludge	0,406	Chen Y.R. & Hashimoto
15	N/A													15		
16														16		
														17		

* Estimated from some published figures, PLH

Figura 5.2: Tabla de estiércoles de la hoja “Calculadora”

En esta tabla, que queda a la derecha de la hoja se ven los distintos tipos de residuos que contempla el modelo y a la derecha de ella la producción media de biogás por kg de sólidos volátiles consumido. Entraré más adelante en detalles.

5.2.1.2 HOJA "CIFRAS ANUALES"

	A	B	C	D	E
1	METHANE CALCULATOR		© Paul Harris, January 12, 2012		
2					
3	Source				
4	Waste	Beef			
5	Number	1			
6	Weight	500 kg			
7	Total Weight	500 kg			
8					
9	Outputs				
10	Total Manure	10,59 tonnes pa			
11	Total Solids	1,55 tonnes pa			
12	Volatile Solids	1,31 tonnes pa			
13	N (Kjeldahl Nitrogen)	0,06 tonnes pa			
14	P (Total Phosphorus)	0,02 tonnes pa			
15	K (Potassium)	0,04 tonnes pa			
16					
17	Gas				
18	Conv'n Eff.	51 %			
19	CH4/kgVS	0,50 m ³			
20	CH4	338 m ³ pa			
21	% CH4	70 %			
22	CO2	145 m ³ pa			
23	Biogas	483 m ³ pa			
24	Fuel Val. (methane)	39 MJm ⁻³			
25	TOTAL Energy	13191 MJ pa			
26	TOTAL Power	0,4 kW			
27	Electrical Power	0,2 kW			
28	Electrical Energy	1466 kWhr pa			
29	Electricity Price	14,00 c/kWhr			
30	Electricity Value	\$ 205 pa			
31					
32					

Figura 5.3: Hoja "Cifras anuales"

Esta hoja es un resumen de los datos de producción eléctricos y de biogás, así como de los principales parámetros de entrada y de salida.

5.2.1.3 HOJA “RESPUESTA SUPERFICIE-SV-TRH”

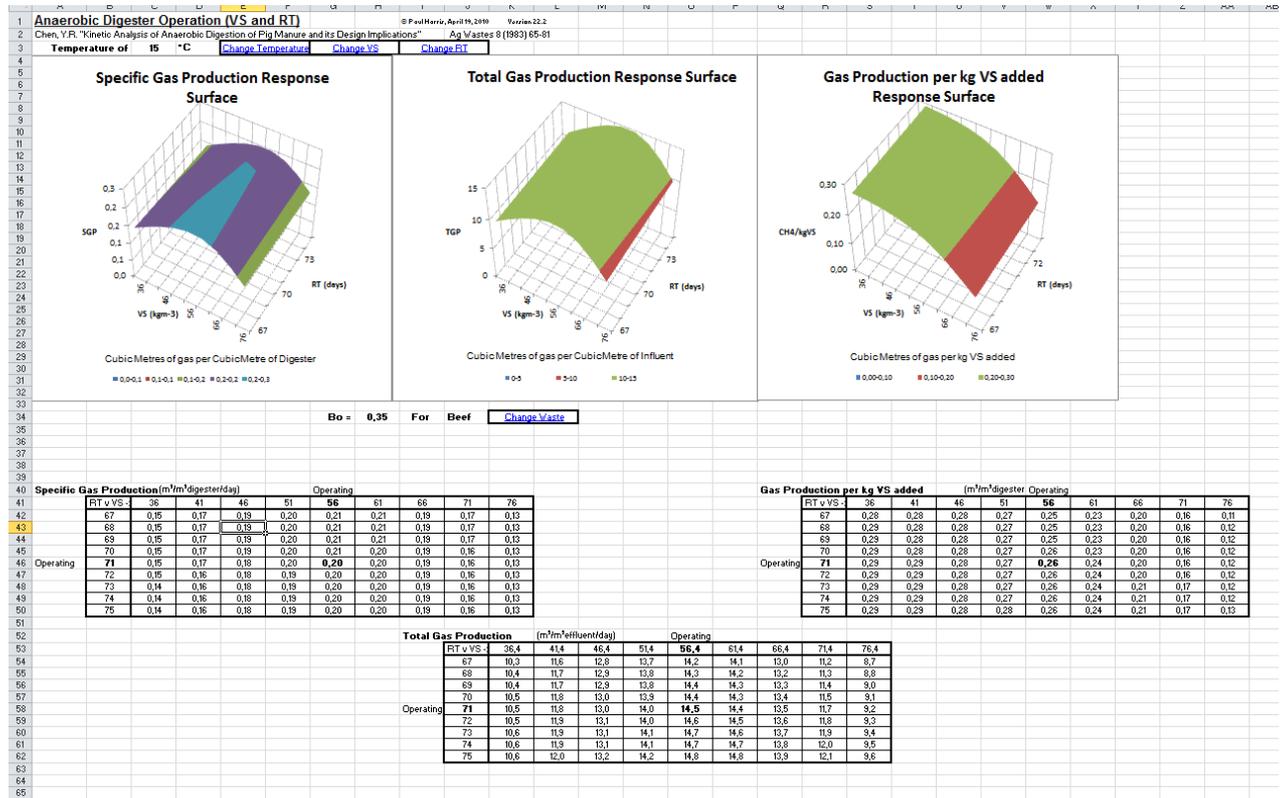


Figura 5.4: Hoja “Respuesta Superficie-SV-TRH”

En las tablas y las gráficas podemos observar los datos de producción de gas diaria según:

- El volumen del digestor
- El flujo de entrada
- El volumen de solidos volátiles

En el eje vertical está la producción de biogás en m³/día y en los otros dos ejes se encuentran la proporción de solidos volátiles expresado como kgSV/m³ y el TRH en días. En estas gráficas y todas las siguientes, además de los valores para la situación concreta especificada, muestran además un pequeño margen de valores que pueden tenerse en cuenta para optimizar la planta.

5.2.1.4 HOJA “RESPUESTA SUPERFICIE-TEMPERATURA-TRH”

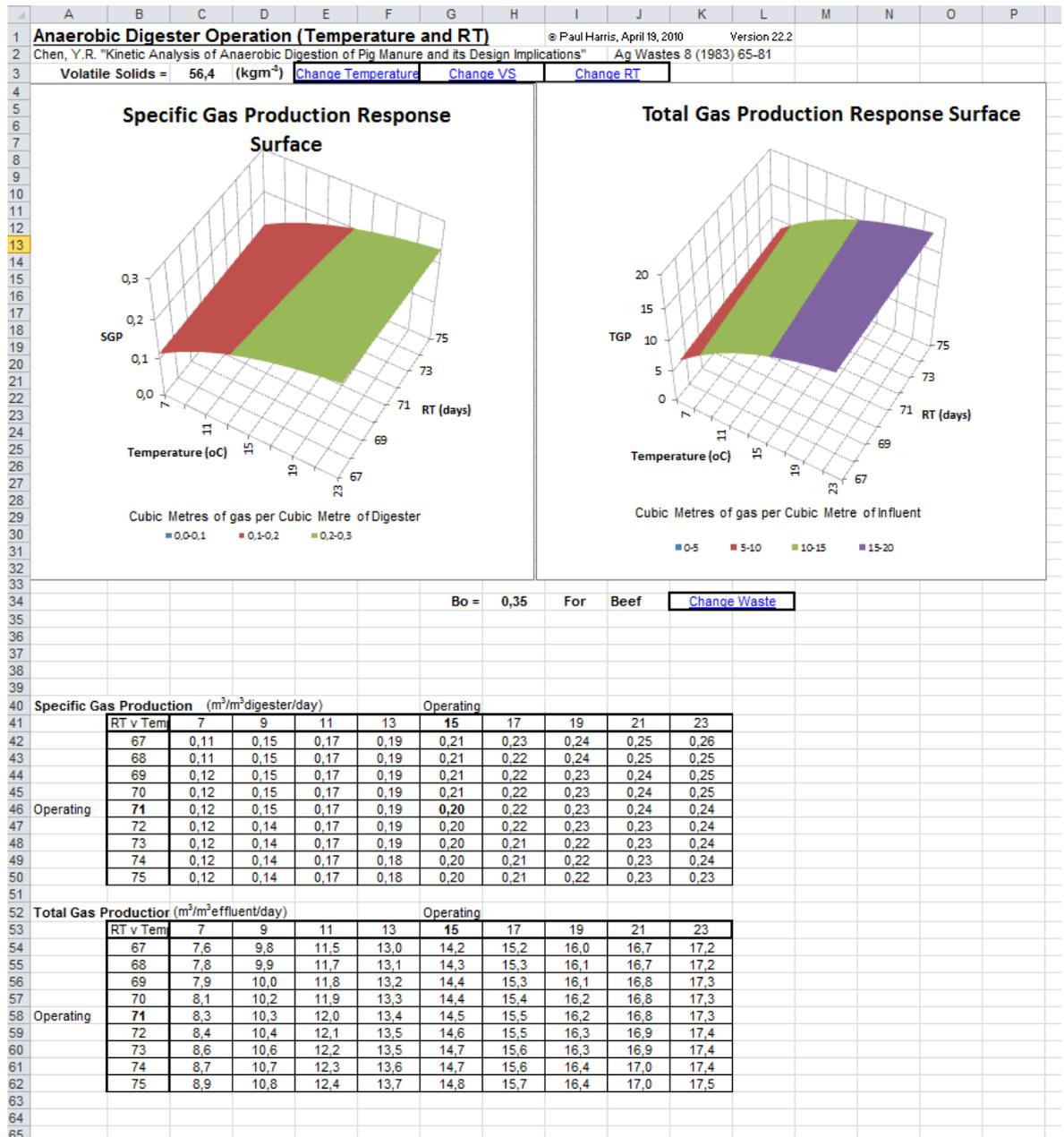


Figura 5.5: Hoja “Respuesta Superficie-Temperatura-TRH”

Al igual que en la hoja anterior se nos muestra la producción de biogás por m3 de digester y por m3 de flujo de entrada. Pero en este caso en los ejes horizontales se encuentra la temperatura en grados centígrados y el TRH.

5.2.1.5 HOJA "TEMPERATURA&TRH"

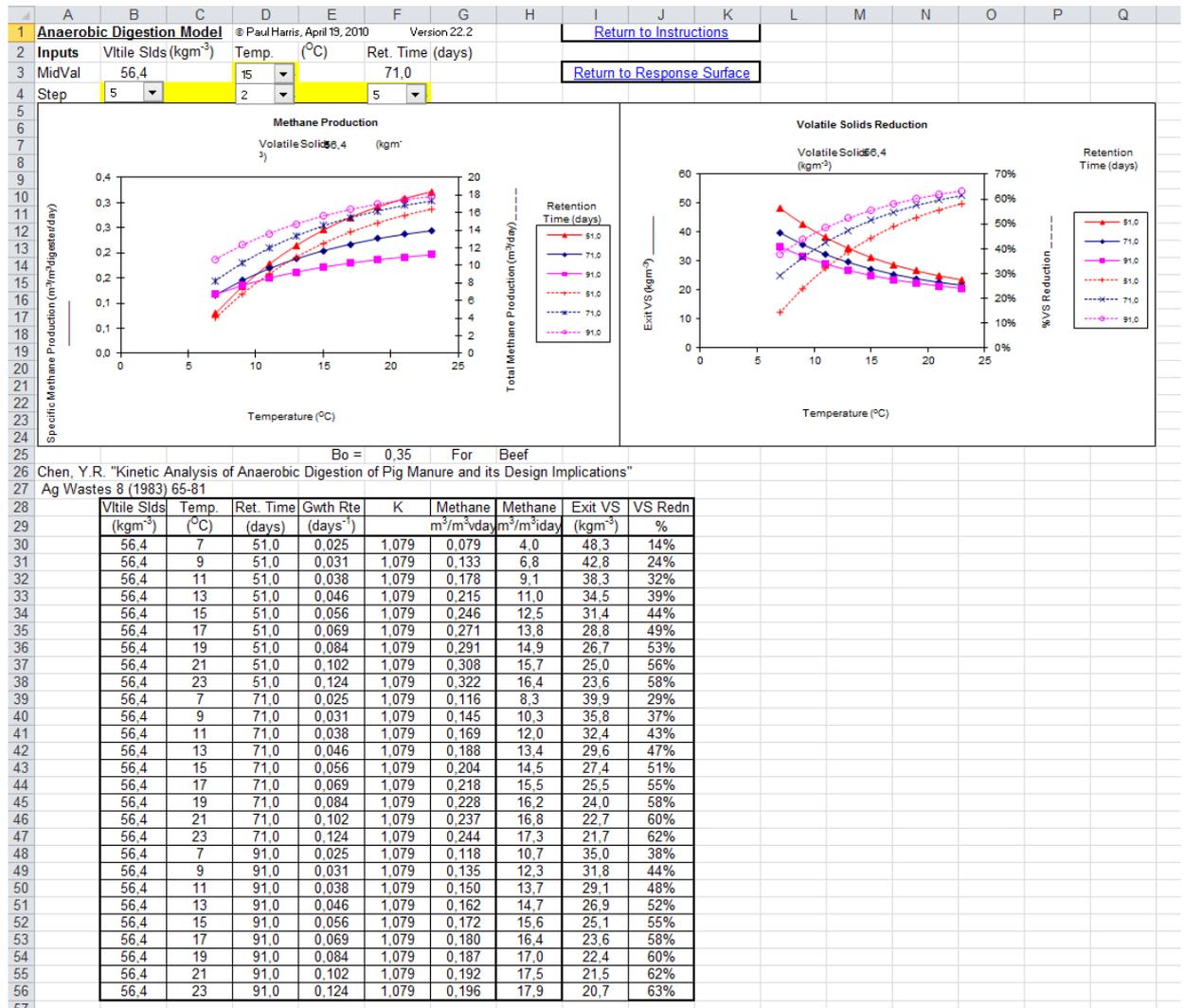


Figura 5.6: Hoja "Temperatura&TRH"

En esta hoja se pueden apreciar dos graficas que muestran la producción específica de gas (m3 de gas/m3 de digestor día) en línea continua y la producción total (m3/día) en línea discontinua en la gráfica de la izquierda y la proporción de SV en la salida (kg/m3) en línea continua y el porcentaje de reducción de SV en línea discontinua en la gráfica de la derecha. Ambas tienen en el eje horizontal la temperatura, y están dibujadas para tres TRH distintos.

Además de las gráficas, en las casillas amarillas podremos modificar la temperatura y el paso de las gráficas, permitiendo ajustarlas a un tamaño donde apreciar mejor todos los puntos.

5.2.1.6 HOJA "SV&TRH"

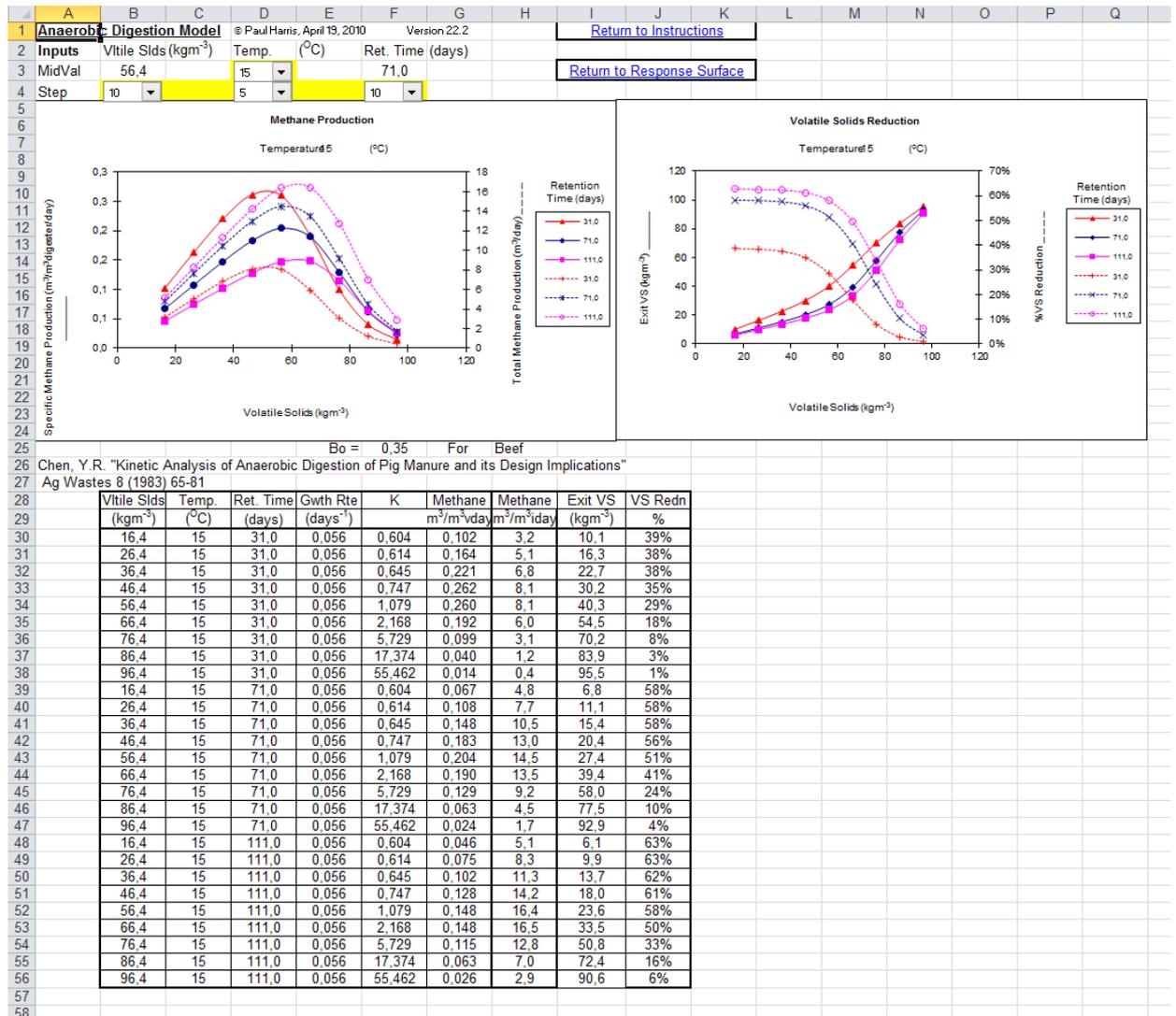


Figura 5.7: Hoja "SV&TRH"

En esta hoja la graficas son similares, salvo que el eje horizontal indica la concentración de SV en el reactor (kg/m3)

5.2.1.7 HOJA "TEMPERATURA&SV"

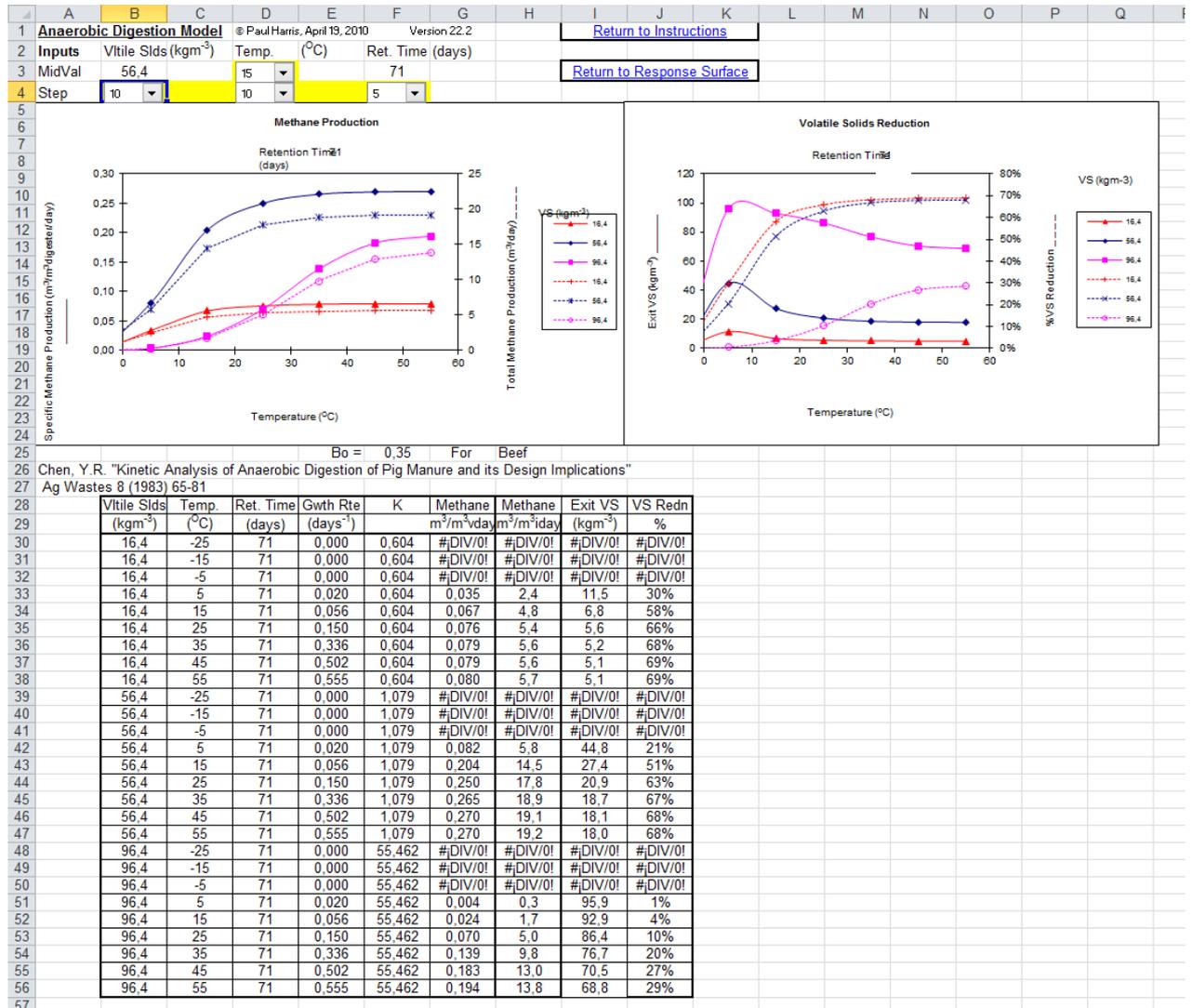


Figura 5.8: Hoja "Temperatura&SV"

En este caso el eje horizontal vuelve a tener la temperatura, pero las diferentes líneas dibujadas representan distintas concentraciones de SV en el reactor

5.2.1.8 HOJA "TRH&TEMPERATURA"

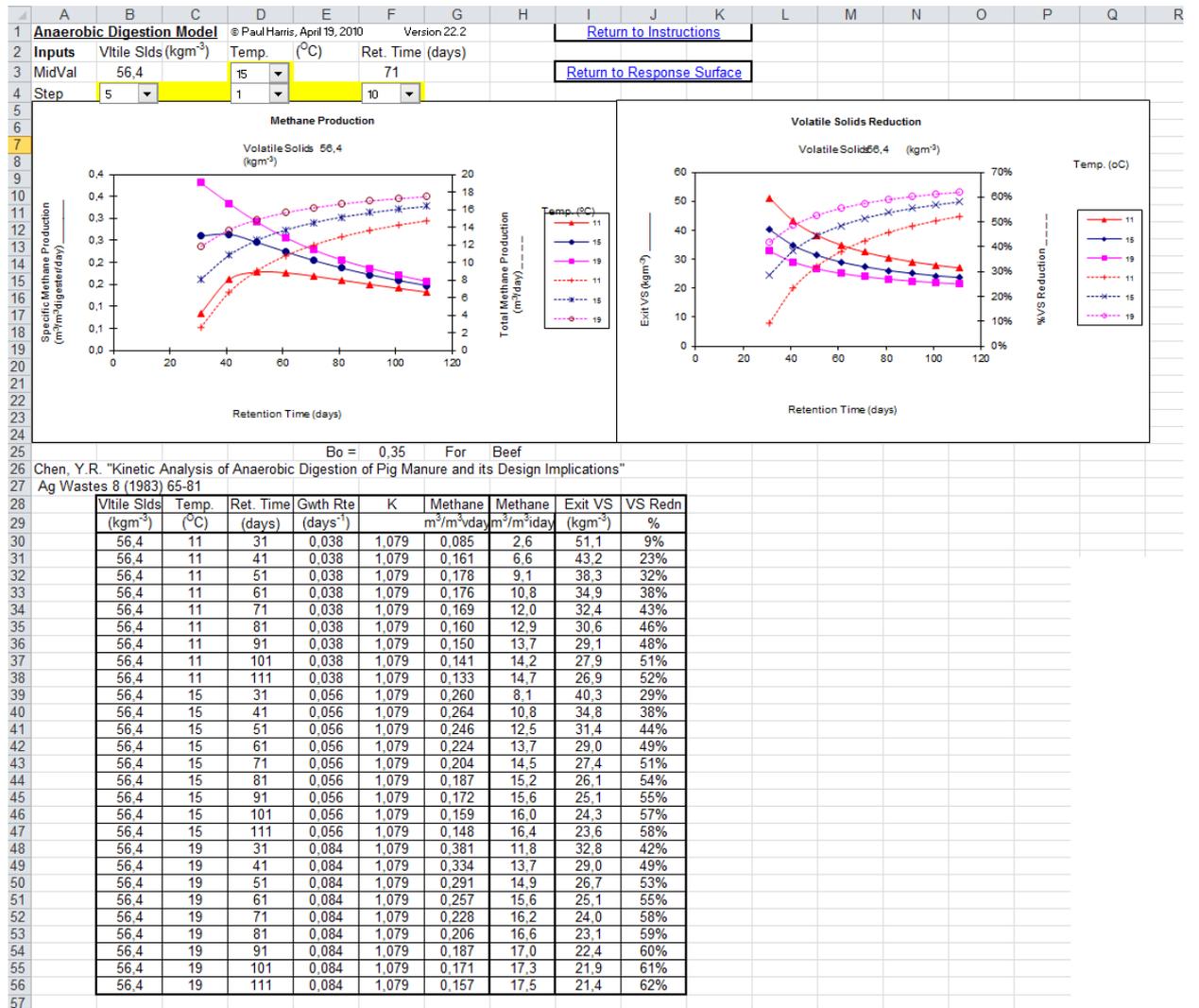


Figura 5.9: Hoja "TRH&Temperatura"

En esta última hoja de graficas se puede observar el TRH en el eje horizontal y diferentes temperaturas en los distintos dibujos.

5.2.1.9 HOJA "CFST"

	A	B	C	D	E	F
1	CFST Digester Design			Return to Instructions		
2	© Paul Harris, April 13, 2010		Version 22.2			
3	Inputs		Data	Value Used		
4	Effluent Volume per Day		(m ³)	0,064		
5	Digester Volume	5,0	(m ³)	4,983	Return to Plug Flow	
6	Mass of VS added per day		(kg)	3,60		
7	Digester Height		(m)	2,939		
8	Digester Diameter		(m)	1,469		
9	Height/Diameter Ratio	2		2,000		
10						
11	Ambient Temperature (Air)	15	(°C)			
12	Ambient Temperature (Effluent)	15	(°C)			
13	Insulation Thickness	0	(mm)			
14	Heater Efficiency	70	(%)			
15	Thermal Conductivity of Insulation	0,032	Wm ⁻¹ °C ⁻¹			
16	Calorific Value of Methane	39	(MJm ⁻³)			
17	Specific Heat of Effluent	4,16	(kJkg ⁻¹ °C ⁻¹)			
18						
19	Outputs					
20	Gross Methane Production	0,926	(m ³ day ⁻¹)	Biogas	1,297	(m ³ day ⁻¹)
21	Power to Heat Effluent	0,000	(kW)	Assuming	60	% Methane
22	Power Lost through Walls	0,000	(kW)			
23	Nett Methane Volume	0,926	(m ³ day ⁻¹)	Biogas	1,297	(m ³ day ⁻¹)
24	Nett Power	0,418	(kW)			
25						
26	Operating Parameters					
27	Input Volatile Solids Concentration	56,4	(kgm ⁻³)			
28	Temperature	15	(°C)			
29	Retention Time	71	(days)			
30	Output VS Concentration	27,4	(kgm ⁻³)			
31	Volatile Solids reduction	51,5	(%)			
32						
33	Costing					
34		(Oct 1997)		Actual		
35	Digester	\$ 100,00	per m ³)	\$ 498,28		
36	Heater	\$ 50,00	per kW)	\$ -		
37	Insulation/Cladding	\$ 20,00	per m ²)	\$ -		
38	Equipment	\$ 498,28		\$ 498,28		
39			TOTAL	\$ 996,56		
40	Expected Life of Digester	20	(years)			
41						
42	Cost of Methane	\$ 0,15	m ⁻³			
43						
44						

Figura 5.10: Hoja "CFST"

En esta hoja se definen los parámetros de digester, entre ellos la temperatura exterior, la capa de aislamiento, eficiencia del calentador; parámetros físicos del efluente como temperatura, calor específico y el valor calorífico del metano. También se pueden especificar otros valores para el digester, si se dispone de ellos, en caso contrario, se utilizan los calculados en la hoja "calculadora"

Tras ello nos proporciona de los datos de producción de metano descontando el utilizado para calentar el propio digestor y si le introducimos los datos de inversión, también nos proporciona el precio por m³ de gas.

5.2.1.10 HOJA “FLUJO DE ENTRADA”

	A	B	C	D	E	F
1	Plug Flow Design	Approximate costing		© Paul Harris, April 18, 2010	Version 22.2	
2					Return to Instructions	
3	Effluent Volume	0,064	cubic metres per day			
4					Return to CFST	
5		Anaerobic Digester				
6	INPUTS					
7	Retention Time (days)	71				
8	Depth (m)	1,100				
9	Length/width ratio	Decrease Dept				
10	Excavation cost (\$/m ³)	\$ 2,40				
11	Liner cost (\$/m ²)	\$ 13,00				
12						
13	OUTPUTS					
14	Capacity (Cubic Meters)	5,0				
15	Storage Width (m)	3,300				
16	Storage Length (m)	2,059				
17	Excavation Depth (m)	0,818				
18	Bank Height (m)	0,282				
19	Excavation Volume (m ³)	3,2				
20	Excavation Cost	\$ 7,75				
21	O/all Width (m)	9,4				
22	O/all Length (m)	8,2				
23	Liner Width (m)	10,51				
24	Liner length (m)	6,26				
25	Liner Area (m ²)	15,46				
26	Liner Cost	\$ 201,04				
27	Total Cost	\$ 208,79				
28						
29	Notes					
30	1) Flat site assumed					
31	2) All banks have 2.5 m wide crest for vehicle access and stability					
32	3) All batters are 1:1 as the lagoons are lined					
33	4) For digester, the bank forms part of support for liner					
34	5) Digester base width is equal to depth					
35	6) All spoil is used on site, but there is no allowance for bulking					
36	7) \$300 transport cost added to Cost of Excavation if actual cost is less than \$8000					
37	8) Liner Width and Length include allowances for trenches, pockets, overlaps etc					
38	9) Maximum practical liner length is 60 m.					
39						

Figura 5.11: Hoja “flujo de entrada”

En esta hoja se pueden observar y calcular las dimensiones de las zanjas y del montaje del digestor para el flujo de entrada calculado.

5.2.1.11 HOJA "COSTES (TEMPERATURA&TRH)"

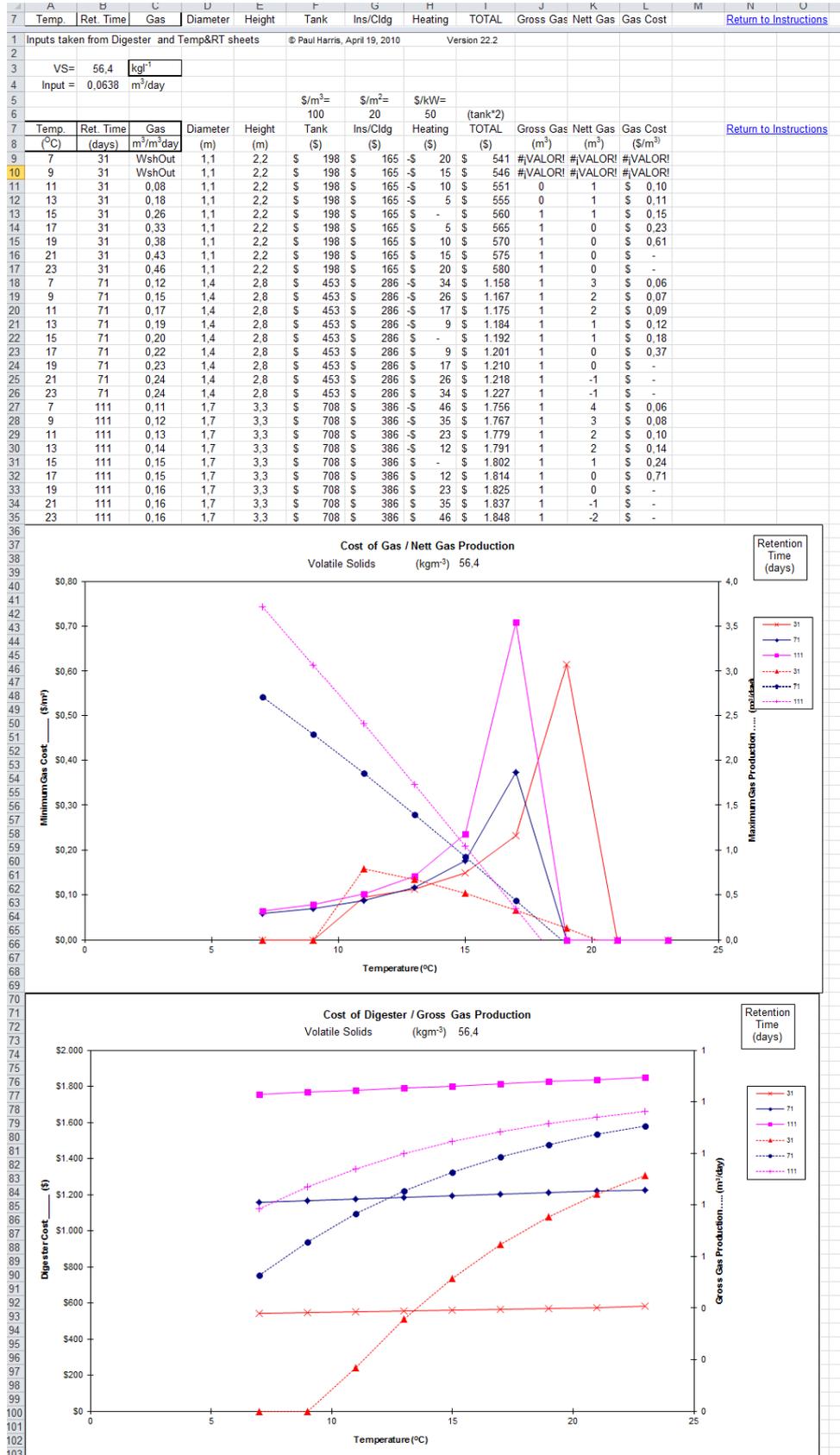


Figura 5.12: Hoja "Costes (Temperatura&TRH)"

En esta hoja se aprecian dos graficas; en la primera podemos observar en línea continua el coste unitario por m3 de gas y en discontinua la producción de gas total, una vez descontado el gas utilizado para calentar el reactor. En la segunda vemos en línea continua el coste del digestor y en discontinua la producción de biogás.

En ambas se encuentra la temperatura en el eje horizontal y distinto TRH en las líneas dibujadas.

5.2.1.12 HOJA “COSTES ENERGÉTICOS”

	A	B	C	D	E	F	G
1	Energy Costs			© Paul Harris, April 19, 2010			Version 22.2
2							
3	Based on 1997 figures in Adelaide, South Australia						
4	Electricity			Domestic			
5							
6		12,21 c/kWhr		430 kWhr in		100 days	
7		1 kWhr =	3600000 Joules				
8		3,39 c/MJ					
9							
10	Gas						
11		39,35 MJm-3					
12				18 m ³ in		90 days	
13		1,282 c/MJ					
14							
15	Biogas						
16							
17		3,779 c/MJ					

Figura 5.13: Hoja “Costes energéticos”

En esta última hoja se nos presenta una comparativa del precio en centimos/MJ entre electricidad, gas ciudad y biogás.

5.2.2 MODIFICACIONES

Una de las principales limitaciones de este modelo es que está preparado únicamente para tratar tipos concretos de estiércol. Para poder analizar otros tipos de residuos y poder considerar la codigestión es necesario modificar parte del modelo.

The screenshot shows a spreadsheet interface. A row labeled 'Mixed' is highlighted in green. Below it, a table titled 'Per 1000kg liveweight (from ASEA Standard D384.1 DEC93)' lists various waste types (No. 1-16) with columns for Weight(kg), Total, TS, VS, N, P, K, VSredn, TS/Tot, VS/TS, VS/Tot, and OptDiln. To the right of this table, another table lists waste types (1-15) with columns for Type, Bo, and S. The 'Mixed' row in the main table has values: 34, 1000.00 kg, 34177.81 kg, 1000.00 kg per 1000 kg LW per day, 625.00 kg per 1000 kg LW per day, 200.10 kg per 1000 kg LW per day, 34177.81 kg (per day), 21361.13 kg (per day), 6838.89 kg (per day), #N/A kg (per day), #N/A kg (per day), #N/A kg (per day), 36 % VS destroyed, 0.50 m³ per kg VS destroyed, 1300.00 m³ per day, 85.30 m³ per day, 700.00 m³ per day, 2000.000 m³ per day, 39.00 MJ/m³, 50700.01 MJ per day, 586.81 kW, 234.72 kW (% conversion efficiency= 30), 14.00 c/kWhr.

Figura 5.14: Modificación 1

Lo primero para poder trabajar es crear una nueva fila, en la Figura 5.14 la fila resaltada en verde, para poder modificarla y trabajar en el modelo y seleccionarla en el desplegable. Yo llame a esta fila “Mixed”, pero el nombre no tiene ninguna influencia.

Tras ello cree una nueva hoja de cálculo, en mi caso la hoja “MOD”, donde añadir las demás opciones de alimentación.

		Per 1000kg liveweight standard D384.1 DEC93) and Angelidaki														
X	No.	Desecho	Peso(kg)	Total	ST	SV	N	P	K	VSredn	ST/Tot	SV/ST	SV/Tot	Dilución	B ₀ m ³ /Kg SV	
0	1	Vacas lecheras	500	86	12	10	0.45	0.09	0.29	35	14%	83%	12%	1.2	0.2	
0	2	Vacas de carne	500	58	8.5	7.2	0.34	0.09	0.21	65	15%	85%	12%	1.2	0.35	% esteriles de los RSU 17.21%
0	3	Termeras	40	62	5.2	2.3	0.27	0.07	0.28	35	8%	44%	4%	0.0	0.2	
0	4	Cerdos	40	84	11	8.5	0.52	0.18	0.29	80	13%	77%	10%	1.0	0.45	
0	5	Ovejas	60	40	11	9.2	0.42	0.09	0.32	60	28%	84%	23%	3.5	0.35	% Inhibicion 3.33%
0	6	Cabras	50	41	13	9.5	0.45	0.11	0.31	60	32%	73%	23%	3.5	0.35	
0	7	Caballos	400	51	15	10	0.3	0.07	0.25	60	29%	67%	20%	3.0	0.35	
0	8	Poyos	2,2	85	22	17	0.84	0.3	0.3	70	26%	77%	20%	3.0	0.39	
0	9	Gallinas	2	64	16	12	1.1	0.3	0.4	70	25%	75%	19%	2.7	0.39	
0	10	Pavos	8	47	12	9.1	0.62	0.23	0.24	70	26%	76%	19%	2.8	0.39	
0	11	Patos	3	110	31	19	1.5	0.54	0.71	70	28%	61%	17%	2.4	0.39	
0	12	Humanos	68	8.5	1.91	1.7	#N/A	#N/A	#N/A	30	22%	89%	20%	3.0	0.3	
1	13	RSU	1000	1000	625	200	0.67				63%	32%	20%	3.5	0.2	
0	14	Alcantarillado	1000	1000	272	17.4	0.79				27%	6%	2%	1.0	0.406	
0	15	Acete de soja	1000	1000	950	900					95%	95%	90%	11.0	1	
0	16	Bebidas alcoholicas	1000	1000	500	400					50%	80%	40%	5.0	0.6	
0	17	Suero láctico	1000	1000	100	85					10%	85%	9%	1.0	0.6	
0	18	Acete de pescado	1000	1000	900	825					90%	92%	83%	11.0	0.57	
0	19	Mermeladas	1000	1000	650	500					65%	77%	65%	6.0	0.6	
0	20	Fangos de flotación	1000	1000	200	145					20%	73%	15%	1.0	0.74	
0	21	Hidrolizado de carne y huesos	1000	1000	200	125					20%	63%	13%	1.0	0.68	
1		Mixed	1000	1000	625	200	#N/A	#N/A	#N/A	0	63%	32%	20%	3.5	0.2	

Figura 5.15: Modificación 2

En esta hoja se encuentra una tabla, en ella están todos los desechos y estiércoles de la original, pero además he añadido otros desechos que pueden considerarse para la digestión o codigestión, como sueros lácticos o aceites de pescados. Los datos se han extraído de la ASEA [2] y de la página web biowatts [3] Pero la parte más importantes es la columna resaltada en verde, en la izquierda de la tabla. En ella podemos introducir las proporciones de mezcla que queremos combinar de los distintos sustratos para la codigestión.

En la fila resaltada en gris debajo de la tabla esta la combinación de los distintos sustratos seleccionados. Estos datos se introducirán en el modelo como el sustrato "Mixed".

Además, he añadido a la derecha dos parámetros, uno es el porcentaje de estériles (arena, plásticos...) que se encuentra en los RSU y otro el porcentaje de inhibición de los RSU, alcantarillado y fangos de flotación. Ambos parámetros reducen el porcentaje de SV, por lo que la producción de biogás se reduce.

5.3 ANALISIS Y OPTIMIZACIÓN

Para comenzar analizando la planta real lo primero es introducir todos los parámetros de nuestra planta en el modelo en las diferentes hojas de cálculo.

Hoja "Calculator"

- Temperatura de 40°C.
- TRH de 34 días.
- Porcentaje de metano (CH₄) en el biogás del 65%.
- Alimentación de 153,8m³/día.
- Volumen de 5200m³.

Hoja "CFST"

- Volumen de 5200m³.
- Diámetro interno de 14,5m.
- Altura de 35,56m.
- Aislamiento: 50mm.

Tras ello utilizamos el comando SOLVER para ajustar la producción a 2000m³/día. Para ello suponemos que solo se utilizan RSU y variamos los parámetros de inhibición y estériles de forma automática hasta aproximar a 2000.

Una vez que hemos introducido todos los datos del modelo procedemos al análisis del mismo. En este trabajo voy a realizar dos análisis, uno de optimización de la planta actual considerando seguir con el mismo substrato (RSU) y otro en el que analizare la posibilidad de codigestión.

5.3.1 ANALISIS DE LA OPTIMIZACION DE LA PLANTA ACTUAL

5.3.1.1 ANALISIS DE GRAFICAS

Empezamos a analizar las gráficas 3D que nos proporciona el modelo:

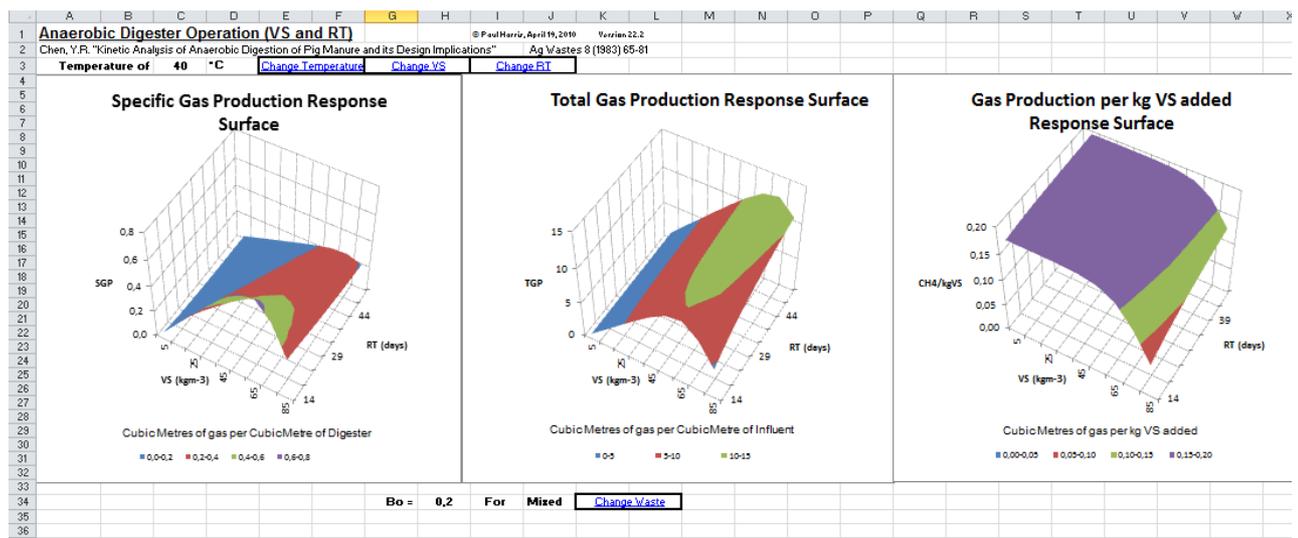


Figura 5.16: Optimización grafica 1.

En estas graficas podemos observar la producción de biogás por: m³,de digester; por m³ de substrato y por kg de SV añadidos. Todas ellas en referencia al tiempo de permanencia (TRH) y a la concentración de SV.

En la primera gráfica, podemos ver un pico que se produce a aproximadamente 65 kg/m³ de concentración de SV y 14 días de TRH, esto se explica porque esta representa la producción por m³ de digester, por lo que a menor TRH, mas materia fresca entra y más rendimiento tiene el digester, pero como observamos en la siguiente gráfica, la producción

por m^3 de influente disminuye con el TRH; también podemos observar en la 3ª grafica que al pasar de $65 kg/m^3$ de concertación la producción cae en picado.

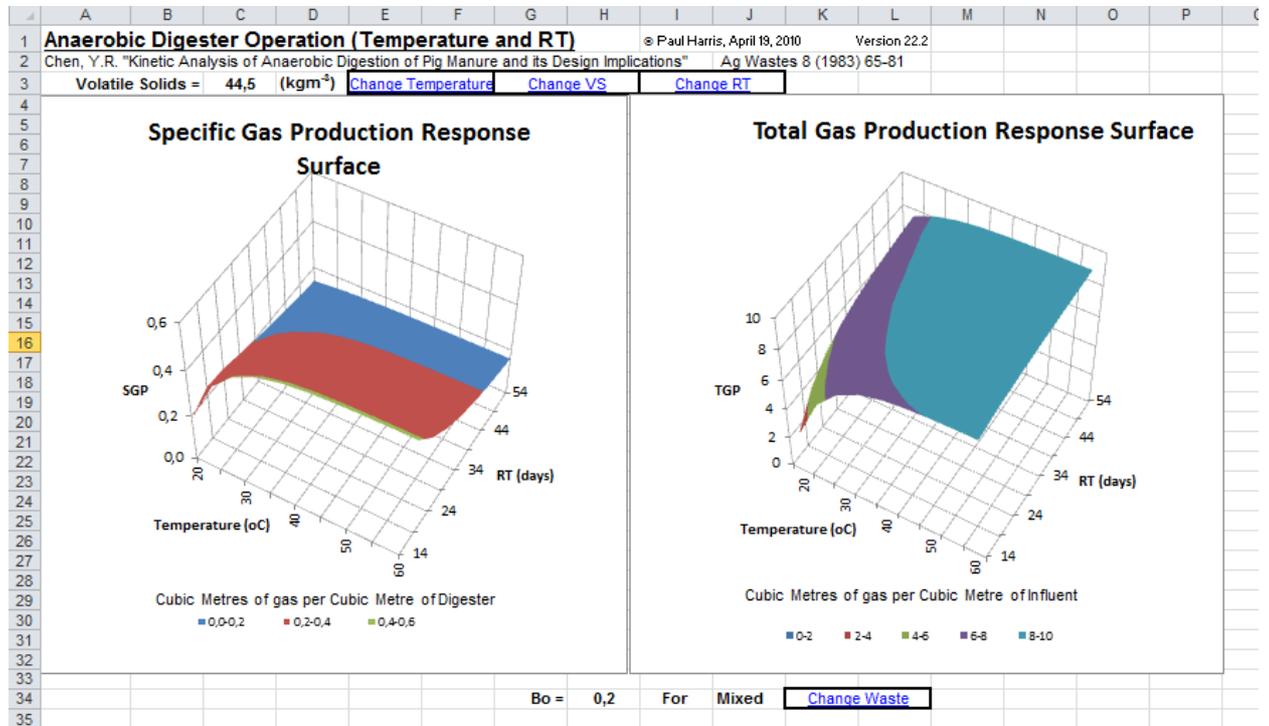


Figura 5.17: Optimización grafica 2.

En estas graficas 3D volvemos a ver la producción de biogás por m^3 de digester y por m^3 de substrato, pero esta vez en función de la temperatura y el TRH.

En estas graficas podemos observar que la temperatura tiene una influencia crítica, especialmente en TRH bajos, pero una vez alcanzados los 30-40°C el incremento de la producción es muy ligero

Por la parte del TRH seguimos viendo el mismo comportamiento, a mayor TRH mayor producción total pero menor producción por m^3 de digester al día.

A continuación veremos una serie de tablas que nos muestran en las tablas de la izquierda, la producción total de metano en línea discontinua y la producción específica por m^3 de digester en línea continua. En las gráficas de la derecha se muestra el porcentaje de SV que se ha consumido en línea discontinua y la concentración de SV a la salida.

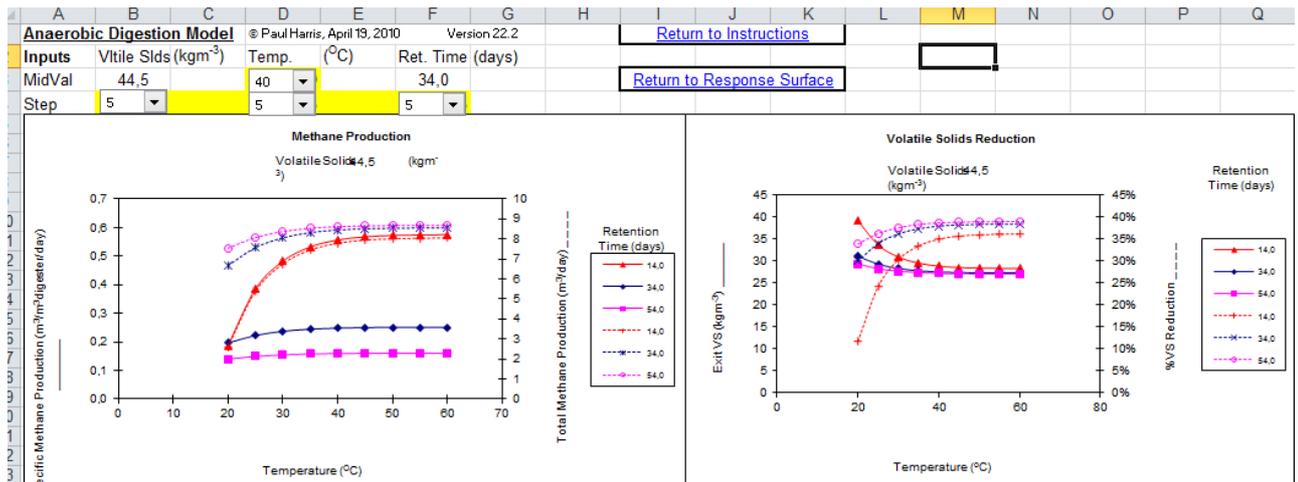


Figura 5.18: Optimización grafica 3.

En este primer conjunto de graficas estas están referidas a la temperatura en el eje horizontal y a distintos TRH. Podemos comprobar con mayor detalle lo que veíamos antes, al aumentar la temperatura aumentan ambas producciones, estancándose el aumento cerca de los 40°C. También comprobamos que a mayor TRH mayor producción total pero menor producción por m³ de digester al día.

Por otro lado vemos como a mayor temperatura y TRH el porcentaje de SV consumidos es mayor y por lo tanto la concentración de SV a la salida es menor.

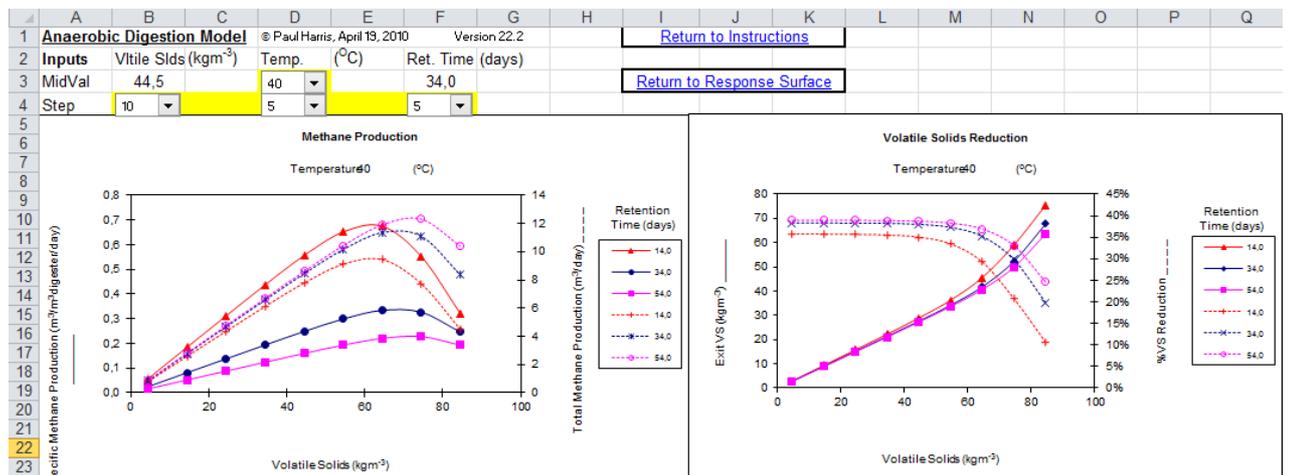


Figura 5.19: Optimización grafica 4.

En estas graficas el eje horizontal representa la concentración de SV. Podemos observar que a partir de 60 kg/m³, las producciones de gas caen significativamente y que esta bajada se produce antes cuanto menor sea el TRH.

Respecto a la otra gráfica, es lógico que mayor concentración de entrada, mayor concentración de salida y que a partir de 60 kg/m³ el porcentaje de SV consumidos cae, por lo que la producción se ve afectada.

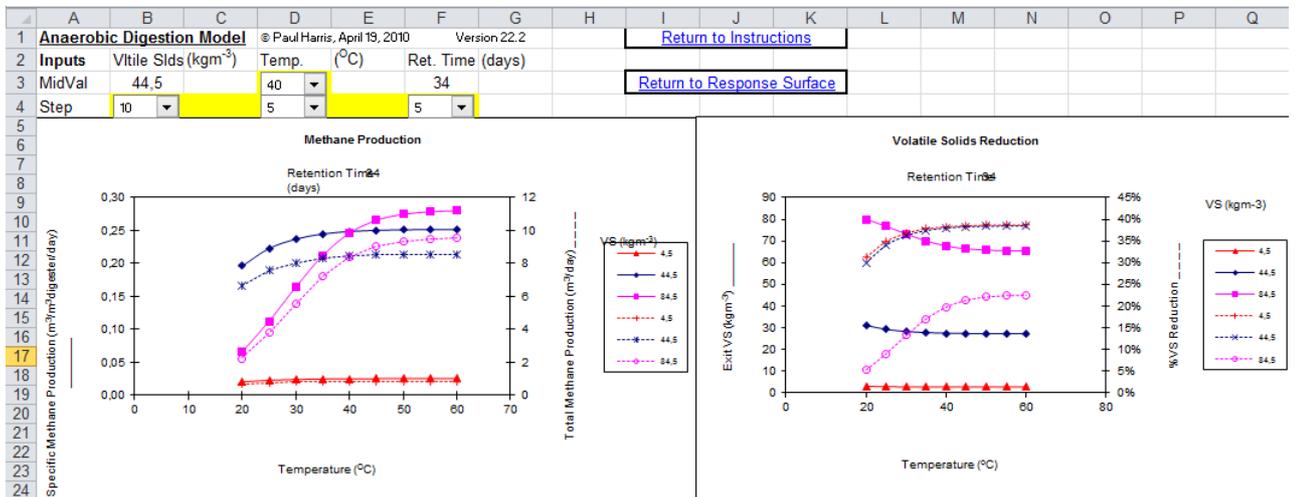


Figura 5.20: Optimización grafica 5.

En esta otra grafica volvemos a tener la temperatura en el eje horizontal pero las distintas líneas representan concentraciones de SV. Comprobamos nuevamente que aumentar la temperatura y la concentración aumentan la producción.

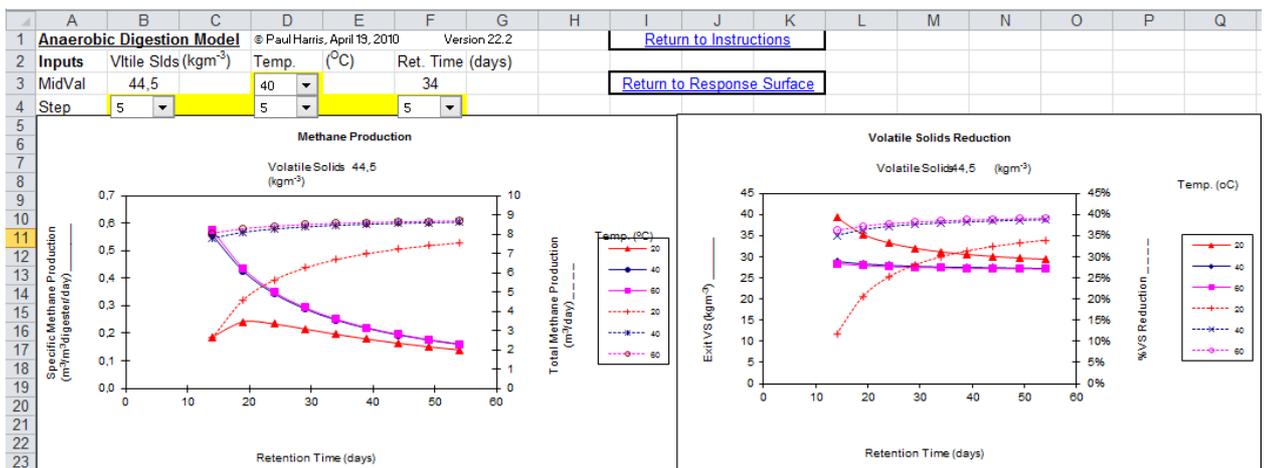


Figura 5.21: Optimización grafica 6.

En estas últimas graficas el TRH está en la recta horizontal y las temperaturas están en las distintas líneas. En estas graficas lo más significativo que podemos remarcar sin repetir lo anterior es que el cambio de 40 a 60°C prácticamente no tiene influencia.

5.3.1.2 CONCLUSIONES

Como conclusión en este apartado podemos decir aumentando la concentración de SV, mediante la separación de inertes o la adicción de otro sustrato y un aumento ligero en el TRH pueden proporcionar una mayor producción y un mejor rendimiento del proceso, permitiendo extraer mayor cantidad de gas del mismo sustrato.

Si por el contrario, se dispusiera de una cantidad muy alta de sustrato, se puede disminuir el TRH para conseguir una mayor producción por m³ de digestor, sabiendo que se sacrificara parte de la posible producción final.

Por otra parte, no compensa aumentar la temperatura de funcionamiento, ya que el incremento en la digestión no compensa con el gasto energético que produce.

5.3.2 ANALISIS CODIGESTIÓN

5.3.2.1 CONSIDERACIONES INICIALES

Para empezar a tratar la codigestión, tenemos que tener en cuenta varios aspectos fundamentales.

- **La disponibilidad de los sustratos:**

No podemos disponer de todos los sustratos en las condiciones óptimas, ya que incurriríamos en un caso de excesivos transportes y que algunos desechos no se producen en la cantidad requerida.

- **Concentración de los SV:**

En principio a mayor concentración de sólidos volátiles mayor producción de biogás, pero hay que tener cuidado, porque algunos restos, en particular los aceites tienen concentraciones tan elevadas que saturan a las bacterias y no son capaces de convertirlo en gas, con lo que el rendimiento cae en picado.

- Dilución:**

Algunos residuos, ya sea por concentraciones elevadas de SV o por aspectos físicos, como los RSU, deben ser triturados y/o mezclados con agua para facilitar su digestión o reducir la concentración de SV. Pero hay que tener en cuenta que el agua ocupa mucho volumen, requiere de mucha energía para calentarse y es un recurso costoso. Por esta razón, además de recircular el agua, se debe aprovechar residuos más líquidos como sueros para diluir otros más energéticos como el aceite.

5.3.2.2 CASOS TEORICOS

Para comenzar a estudiar las posibles mezclas debemos establecer varias condiciones. Por una parte las características de funcionamiento de la instalación se mantendrán constantes en todos los casos. Por otra parte, se utilizara la función SOLVER para calcular automáticamente los mejores valores. Esta operación se repetirá varias veces hasta que el resultado no varíe, ya que la función es limitada y requiere de varias iteraciones para llegar al resultado óptimo.

- Sin ninguna limitación**

En este caso se supone total disponibilidad de todos los substratos en la proporción que sea. Un caso irreal o económicamente inviable pero muy ilustrativo.

X	No.	Desecho	Peso(kg)	Per 1000kg liveweight										Dilución	B ₀ m ³ /Kg SV
				Total	ST	SV	N	P	K	VSred'n	ST/Tot	SV/ST	SV/Tot		
0	1	Vacas lecheras	500	86	12	10	0.45	0.09	0.29	35	14%	83%	12%	1,2	0,2
0.01	2	Vacas de carne	500	58	8.5	7.2	0.34	0.09	0.21	65	15%	85%	12%	1,2	0,35
0	3	Termeras	40	62	5.2	2.3	0.27	0.07	0.28	35	8%	44%	10%	0,0	0,2
0.02	4	Cerdos	40	84	11	8.5	0.52	0.18	0.29	80	13%	77%	10%	1,0	0,45
0.01	5	Ovejas	60	40	11	9.2	0.42	0.09	0.32	60	28%	84%	23%	3,5	0,35
0.01	6	Cabras	50	41	13	9.5	0.45	0.11	0.31	60	32%	73%	23%	3,5	0,35
0.01	7	Caballos	400	51	15	10	0.3	0.07	0.25	60	29%	67%	20%	3,0	0,35
0.02	8	Poyos	2,2	85	22	17	0.84	0.3	0.3	70	26%	77%	20%	3,0	0,39
0.02	9	Gallinas	2	64	16	12	1.1	0.3	0.4	70	25%	75%	19%	2,7	0,39
0.02	10	Pavos	8	47	12	9.1	0.62	0.23	0.24	70	26%	76%	19%	2,8	0,39
0.02	11	Patos	3	110	31	19	1.5	0.54	0.71	70	28%	61%	17%	2,4	0,39
0.01	12	Humanos	68	8.5	1.91	1.7	#N/A	#N/A	#N/A	30	22%	89%	20%	3,0	0,3
0.01	13	RSU	1000	1000	625	218	0.67				63%	35%	22%	3,5	0,2
0.03	14	Alcantarillado	1000	1000	272	17.4	0.79				27%	6%	2%	1,0	0,406
0.15	15	Aceite de soja	1000	1000	950	900					95%	95%	90%	11,0	1
0.06	16	Bebidas alcoholicas	1000	1000	500	400					50%	80%	40%	5,0	0,6
0.05	17	Suero láctico	1000	1000	100	85					10%	85%	9%	1,0	0,6
0.11	18	Aceite de pescado	1000	1000	900	825					90%	92%	83%	11,0	0,57
0.07	19	Mermeladas	1000	1000	650	500					65%	77%	50%	6,0	0,6
0.05	20	Fangos de flotación	1000	1000	200	145					20%	73%	15%	1,0	0,74
0.32	21	Hidrolizado de carne y huesos	1000	1000	200	125					20%	63%	13%	1,0	0,68
1		Mixed	1000	865.01	415	343	#N/A	#N/A	#N/A	9.4372	48%	83%	40%	4.450686	0.650211871

Figura 5.22: Caso teórico 1.

Utilizando las proporciones de la Figura 5.22, se pueden alcanzar producciones de unos 8340 m³ de gas al día, con un rendimiento de los SV del 92,7%, recordemos que en el caso real la producción era de 2000 m³ al día, lo que supone un incremento de más del cuádruple. Reitero que es la situación más ideal posible.

- Sin ningún tipo de estiércol

Para este caso no se consideran los estiércoles. Solamente los demás tipos de residuos. Sigue siendo un caso bastante irrealizable, pero no tan imposible.

		Per 1000kg liveweight standard D384.1 DEC93) and Angelidaki													
X	No.	Desecho	Peso(kg)	Total	ST	SV	N	P	K	VSred'n	ST/Tot	SV/ST	SV/Tot	Dilución	B ₀ m ³ /Kg SV
0	1	Vacas lecheras	500	86	12	10	0,45	0,09	0,29	35	14%	83%	12%	1,2	0,2
0	2	Vacas de carne	500	58	8,5	7,2	0,34	0,09	0,21	65	15%	85%	12%	1,2	0,35
0	3	Termeras	40	62	5,2	2,3	0,27	0,07	0,28	35	8%	44%	4%	0,0	0,2
0	4	Cerdos	40	84	11	8,5	0,52	0,18	0,29	80	13%	77%	10%	1,0	0,45
0	5	Ovejas	60	40	11	9,2	0,42	0,09	0,32	60	28%	84%	23%	3,5	0,35
0	6	Cabras	50	41	13	9,5	0,45	0,11	0,31	60	32%	73%	23%	3,5	0,35
0	7	Caballos	400	51	15	10	0,3	0,07	0,25	60	29%	67%	20%	3,0	0,35
0	8	Poyos	2,2	85	22	17	0,84	0,3	0,3	70	26%	77%	20%	3,0	0,39
0	9	Gallinas	2	64	16	12	1,1	0,3	0,4	70	25%	75%	19%	2,7	0,39
0	10	Pavos	8	47	12	9,1	0,62	0,23	0,24	70	26%	76%	19%	2,8	0,39
0	11	Patos	3	110	31	19	1,5	0,54	0,71	70	28%	61%	17%	2,4	0,39
0	12	Humanos	68	8,5	1,91	1,7	#N/A	#N/A	#N/A	30	22%	89%	20%	3,0	0,3
0,02	13	RSU	1000	1000	625	218	0,67				63%	35%	22%	3,5	0,2
0,12	14	Alcantarillado	1000	1000	272	17,4	0,79				27%	6%	2%	1,0	0,406
0,01	15	Aceite de soja	1000	1000	950	900					95%	95%	90%	11,0	1
0,15	16	Bebidas alcoholicas	1000	1000	500	400					50%	80%	40%	5,0	0,6
0,13	17	Suero láctico	1000	1000	100	85					10%	85%	9%	1,0	0,6
0,15	18	Aceite de pescado	1000	1000	900	825					90%	92%	83%	11,0	0,57
0,15	19	Mermeladas	1000	1000	650	500					65%	77%	50%	6,0	0,6
0,14	20	Fangos de flotación	1000	1000	200	145					20%	73%	15%	1,0	0,74
0,13	21	Hidrolizado de carne y huesos	1000	1000	200	125					20%	63%	13%	1,0	0,68
1		Mixed	1000	1000	429	320	#N/A	#N/A	#N/A	0	43%	75%	32%	3,971968	0,596887973

Figura 5.23: Caso teórico 2

En este caso la producción es ligeramente inferior, de unos 8090 m³ de gas al día, mientras que se produce un ligero aumento en el rendimiento, que alcanza el 96,3% de los SV Consumidos. Como se puede apreciar, el porcentaje de RSU es del 2% del total, con lo que se nos aleja bastante del caso real.

- Solo residuos y un mínimo del 60% de RSU

Este sería un caso bastante más cercano al real, aun así implicaría tener reservas del resto de residuos y combinarlos según la proporción indicada.

X	No.	Desecho	Peso(kg)	Per 1000kg liveweight						VSred'n	ST/Tot	SV/ST	SV/Tot	Dilución	B ₀ m ³ /Kg SV
				Total	ST	SV	N	P	K						
0	1	Vacas lecheras	500	86	12	10	0,45	0,09	0,29	35	14%	83%	12%	1,2	0,2
0	2	Vacas de carne	500	58	8,5	7,2	0,34	0,09	0,21	65	15%	85%	12%	1,2	0,35
0	3	Terreas	40	62	5,2	2,3	0,27	0,07	0,28	35	8%	44%	4%	0,0	0,2
0	4	Cerdos	40	84	11	8,5	0,52	0,18	0,29	80	13%	77%	10%	1,0	0,45
0	5	Ovejas	60	40	11	9,2	0,42	0,09	0,32	60	28%	84%	23%	3,5	0,35
0	6	Cabras	50	41	13	9,5	0,45	0,11	0,31	60	32%	73%	23%	3,5	0,35
0	7	Caballos	400	51	15	10	0,3	0,07	0,25	60	29%	67%	20%	3,0	0,35
0	8	Poyos	2,2	85	22	17	0,84	0,3	0,3	70	26%	77%	20%	3,0	0,39
0	9	Gallinas	2	64	16	12	1,1	0,3	0,4	70	25%	75%	19%	2,7	0,39
0	10	Pavos	8	47	12	9,1	0,62	0,23	0,24	70	26%	76%	19%	2,8	0,39
0	11	Patos	3	110	31	19	1,5	0,54	0,71	70	28%	61%	17%	2,4	0,39
0	12	Humanos	68	8,5	1,91	1,7	#N/A	#N/A	#N/A	30	22%	89%	20%	3,0	0,3
0,6	13	RSU	1000	1000	625	218	0,67				63%	35%	22%	3,5	0,2
0	14	Alcantarillado	1000	1000	272	17,4	0,79				27%	6%	2%	1,0	0,406
0,14	15	Aceite de soja	1000	1000	950	900					95%	95%	90%	11,0	1
0,04	16	Bebidas alcoholicas	1000	1000	500	400					50%	80%	40%	5,0	0,6
0,05	17	Suero láctico	1000	1000	100	85					10%	85%	9%	1,0	0,6
0,02	18	Aceite de pescado	1000	1000	900	825					90%	92%	83%	11,0	0,57
0,03	19	Mermeladas	1000	1000	650	500					65%	77%	50%	6,0	0,6
0,06	20	Fangos de flotación	1000	1000	200	145					20%	73%	15%	1,0	0,74
0,06	21	Hidrolizado de carne y huesos	1000	1000	200	125					20%	63%	13%	1,0	0,68
1		Mixed	1000	1000	595	325	#N/A	#N/A	#N/A	0	59%	55%	32%	4,407886	0,42997266

Figura 5.24: Caso teórico 3.

Aunque la producción y eficiencia son menores que en los otros casos, concretamente 5790 m³/día y 67,8%, el caso se aproxima más a la realidad y sigue siendo mucho más elevada que la situación actual.

- **Mínimo del 80% de RSU y codigestión con otro único residuo**

Es el caso más factible de realizar. En este caso se compara el 80% de RSU con el 20% del resto de residuos.

Tabla 5.1: Caso teórico 4.

substrato de codigestión	m ³ /día	%
Alcantarillado	2189,48	46,878
Aceite de soja	4427,11	47,545
Bebidas alcoholicas	3524,42	52,742
Suero láctico	2722,93	54,176
Aceite de pescado	3612,83	40,516
Mermeladas	3718,54	51,588
Fangos de flotación	3126,17	58,721
Hidrolizado de carne y huesos	2924,82	56,143

Según la Tabla 5.1, podemos comprobar que aunque los datos son menores que en otros casos, los incrementos son muy significativos, ya que en el mejor caso, con aceite de soja se consigue una producción superior al doble. Este caso es posiblemente el mas cercano a una posible aplicación, aunque en la realidad el cosustrato dependerá de la disponibilidad del mismo más que de la mejora en la producción.

6 CONCLUSIONES

Como resumen podemos concluir que la tecnología de digestión anaeróbica no puede desarrollar potencias y producciones como las formas tradicionales pero su principal valor es que utiliza residuos como materia prima, produciendo tanto energía (ya sea eléctrica o en forma de gas) como fertilizante para los campos. Por lo que no solo no genera residuos, si no que contribuye a reducirlos.

Además no solo funciona a escala industrial, como plantas de tratamiento de RSU y en depuradoras sino que también es ampliamente utilizada en pequeñas granjas de manera muy simple para producir gas y abono y reducir los residuos.

Por otro lado hemos visto un modelo en la plataforma Microsoft Excel que nos permite aproximarnos y optimizar los parámetros de funcionamiento de una planta existente o también que nos permite planificar la construcción de una planta nueva sabiendo el número de animales disponibles.

Tras ello hemos realizado unas modificaciones en el modelo que nos permiten mezclar y codigerir varios residuos en la simulación con lo que nos permiten plantear la codigestión en una planta real.

Por ultimo podemos concluir que en referente a nuestra planta real la optimización de los parámetros de funcionamiento es prácticamente la existente pero que la codigestión podría aumentar significativamente la producción.

7 LISTA DE REFERENCIAS

[1] Chen, Y.R. "Kinetic Analysis of Anaerobic Digestion of Pig Manure and its Design Implications" *Ag Wastes* 8 (1983) 65-81

[2] ASEA Standard D384.1 DEC93

[3] <http://biowattsonline.com/welcome/index>

8 BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.ows.be/es/installations-biogaz/>
2. <http://www.biodisol.com/>
3. <https://es.wikipedia.org/>
4. <http://web.udl.es/usuarios/r5213847/historia.html>
5. <http://www.urbaser.es/>
6. <http://www.energias-renovables.com/>
7. <http://www.ecobiogas.es/>
8. <http://www.cogersa.es/>
9. <http://www.agrowaste.eu/>
10. <http://www.aebig.org/>
11. <http://www.textoscientificos.com/>
12. <https://www.ecn.nl>
13. <http://biowattsonline.com/>
14. MANUAL PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS (Instituto de Ingeniería Rural - Ing. A. M. Sc. Jorge A. Hilbert)
15. Biogas from AD (BIOEXELL Training Manual)
16. Manual de estado del arte de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y agroindustriales (PSE Probiogas).
17. An introduction to anaerobic digestion of organic wastes (Remade Scotland).
18. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)
19. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable (Edwin Darío Cendales Ladino)
20. MANUAL PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS (Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. - Castelar)