



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Tiempo de residencia medio para  
diseño de digestores anaerobios de  
residuos orgánicos urbanos**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Alberto Valdovinos Lepine

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Oscar González Barceló



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., octubre 2018

## **Dedicatoria**

*A mis padres Alberto y Charis por todo su cariño y apoyo incondicional. Por siempre impulsarme a dar lo mejor de mí en todo lo que hago. Gracias por ser mi ejemplo a seguir, por esas noches aguantando mis desvelos, por esos días de estrés aguantando mi mal humor, por festejar conmigo después de algún triunfo y por estar ahí cuando las cosas se complicaron. Sus valores, ideales, esfuerzo, dedicación y sacrificio son lo que me motiva todos los días a salir y tratar de ser una mejor persona.*

*A mis hermanos Ricardo y Susana por acompañarme en todo momento. Ser un ejemplo para ustedes, ha sido también un motor que me mueve a dar lo mejor de mí. Sin embargo, ha sido al revés. Ustedes han sido un ejemplo del que he podido aprender más de lo que se imaginan. Veo con alegría cada éxito que van cosechando en el camino y me llena de orgullo saber que más que mis hermanos son mis más cercanos amigos. Espero ustedes me consideren lo mismo. Me emociona mucho poder acompañarlos en su futuro, que yo sé que estará rodeado de éxitos.*

*A mis abuelos que se han dedicado toda mi vida a consentirme. Cuando los abuelos entran por la puerta, la disciplina, las verduras y la tristeza salen por la ventana. Ustedes me han dado amor en todo momento y por eso estoy infinitamente agradecido con la vida.*

*A Fernanda quien me ha acompañado este último año y me ha motivado a cada paso de este proyecto. A ella que se merece todo por hacerme feliz todos los días. En momentos en donde me desesperaba o donde no veía el final ella siempre estuvo ahí para levantarme y ponerme en marcha de nuevo. Este proyecto no hubiera sido posible sin su amor y su apoyo incondicional.*

*A todos mis amigos les agradezco por haberme acompañado en cada paso que he dado. Me siento afortunado por sentirme rodeado de muchas personas muy valiosas. Desde aquellos que desde la primaria me acompañaron en cada recreo, en cada fiesta, en cada tarea y en cada estresante periodo bimestral del MAS. Hasta aquellos que en la carrera sufrieron y gozaron conmigo cada paso en nuestra peculiar y h. Facultad de Ingeniería. Me da gusto verlos a todos triunfar después de haber crecido y “madurado” juntos.*

*Esta tesis no hubiera sido posible sin la ayuda y la infinita paciencia del Dr. Oscar. Gracias por ayudarme a plantear la estructura de la tesis y a ayudarme a razonar todo el contenido de la misma. Después de incontables tardes de revisiones hemos alcanzado la meta, nada de esto hubiera sido posible sin su apoyo.*

*A la UNAM y al Instituto de Ingeniería que me han proporcionado las condiciones y las herramientas para desarrollarme en lo personal y en lo académico. Aquí he podido encontrar una vocación para ejercer mi profesión en beneficio de la sociedad, un espacio para pensar libremente, así como también un gran grupo de colegas y amigos que estoy seguro pondrán en alto el nombre de estas instituciones.*

## ***Reconocimientos***

Al proyecto Clúster de Biocombustibles Gaseosos, SENER-CONACYT 24006

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del  
09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| 1. ANTECEDENTES .....   | 3  |
| 1.1 Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU).....                        | 3  |
| 1.1.1 Generación de Residuos Sólidos Urbanos.....   | 3  |
| 1.1.2 Generación de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México .....                 | 3  |
| 1.1.3 Generación de residuos en Coyoacán .....  | 5  |
| 1.1.4 Disposición de residuos.....  | 5  |
| 1.1.5 Definición de concepto: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) ..... | 6  |
| 1.1.6 Características de la FORSU.....  | 7  |
| 1.1.7 Características químicas de la FORSU .....  | 9  |
| 1.2 Pretratamiento .....  | 12 |
| 1.2.1 Reducción del tamaño de partícula.....  | 12 |
| 1.2.2 Separación de materiales no orgánicos .....   | 12 |
| 1.3 Descripción del Proceso de Digestión Anaerobia.....                                   | 15 |
| 1.3.1 Descripción general.....  | 15 |
| 1.3.2 Bioquímica de la Cadena de Reacción Anaerobia .....                                 | 17 |
| -Hidrólisis y Acidogénesis .....  | 17 |
| -Acetogénesis .....   | 17 |
| -Metanogénesis.....   | 18 |
| 1.3.3 Parámetros de la digestión anaerobia .....  | 18 |
| -Definiciones.....  | 19 |
| -Temperatura .....  | 20 |
| -Nivel de pH.....   | 20 |
| -Potencial Redox: .....   | 21 |
| -Razón C:N e inhibición de Amoniacó .....   | 21 |
| -Carga orgánica.....  | 21 |
| -Tiempo de residencia hidráulico TRH .....  | 22 |
| -Tiempo de residencia celular TRC.....  | 22 |
| -Tasa de crecimiento específico .....   | 22 |
| 1.4 Características y uso del biogás generado .....                                       | 23 |
| 1.4.1 Beneficios ambientales del uso de biogás .....                                      | 23 |
| -Ejemplo de beneficio ambiental del uso de biogás en Alemania .....                       | 24 |
| -Ejemplo de beneficio de uso de biogás en Estados Unidos.....                             | 24 |

|   |    |
|---|----|
| -Ejemplo de beneficio de generación de digestato fertilizante .....         | 25 |
| 1.4.2 Características del biogás .....                                      | 25 |
| -Composición típica del biogás.....   | 25 |
| -Energía correspondiente.....   | 26 |
| -Potencial de metano .....  | 26 |
| 1.4.3 Métodos de mejoramiento del biogás crudo.....                         | 28 |
| 1.5 Reactores anaerobios para tratar FORSU .....                            | 29 |
| 1.5.1 Clasificación de los sistemas anaerobios.....                         | 29 |
| 1.5.2 Características generales del proceso húmedo .....                    | 29 |
| 1.5.3 Características generales del proceso seco.....                       | 32 |
| -Ventajas y desventajas del proceso seco.....                               | 33 |
| 1.5.4 Características generales de la tecnología semicontinua .....         | 34 |
| -Esquema de digestión básico semicontinuo (Dranco) (De Baere, 2010).....    | 35 |
| -Ventajas de la tecnología semicontinua (Dranco) (De Baere, 2010) .....     | 37 |
| -Ejemplos de plantas en operación sistema semicontinuo.....                 | 39 |
| 1.5.5 Características generales de la tecnología por lotes.....             | 40 |
| -Configuraciones diferentes de tecnología por lotes o de garaje .....       | 41 |
| -Esquema de digestión básico tecnología discontinua, por lotes (Bekon)..... | 43 |
| -Ventajas y desventajas de la tecnología de garaje o por lotes (Bekon)..... | 46 |
| -Ejemplos de plantas en operación sistema discontinuo o por lotes .....     | 47 |
| 2. METODOLOGÍA.....   | 48 |
| 2.1 Diseño básico de una planta para tratamiento de FORSU .....             | 48 |
| 2.1.1 Datos de la FORSU a tratar .....                                      | 49 |
| 2.1.2 Pretratamiento .....  | 50 |
| 2.1.3 Digestión Anaerobia .....   | 51 |
| 2.1.4 De biogás a energía .....   | 54 |
| 2.1.5 Tratamiento de digestato.....   | 56 |
| 3. RESULTADOS .....   | 58 |
| 3.1 Definición de TRS en reactores semicontinuos y por lotes.....           | 58 |
| 3.2 Principios del Reactor Semicontinuo .....                               | 59 |
| 3.3 Operación de reactor semicontinuo a partir de TRS y TRH.....            | 59 |
| 3.3.1 Independencia entre el TRS y el TRH .....                             | 62 |
| 3.3.2 Ejemplos con diferentes parámetros de operación .....                 | 63 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4 Diseño de una planta en Coyoacán.....  | 65 |
| 3.4.1 Datos de la FORSU a tratar.....  | 65 |
| 3.4.2 Datos de operación del sistema.....  | 67 |
| -Equipo de pretratamiento.....   | 67 |
| -Equipo de almacenamiento de biogás.....   | 70 |
| -Equipo de generación de energía.....  | 70 |
| 3.4.3 Datos de salida de las plantas 1 y 2 de digestión anaerobia.....               | 73 |
| 3.4.4 Datos de salida de la planta 3 de digestión anaerobia.....                     | 74 |
| 3.4.5 Hoja de cálculo del procedimiento para Plantas 1 y 2.....                      | 75 |
| 3.4.6 Diagrama de flujo del proceso.....   | 79 |
| 3.4.7 Diagramas de flujo de cada etapa del procedimiento para las plantas 1 y 2..... | 80 |
| 3.4.8 Localización de las plantas 1, 2 y 3.....                                      | 84 |
| -Superficie a utilizar.....  | 84 |
| -Localización de las plantas:.....   | 85 |
| 4. CONCLUSIONES.....   | 87 |

## Lista de Ilustraciones

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 1.1</b>  | Composición global de los residuos sólidos .....                                 | 3  |
| <b>Figura 1.2</b>  | Diagrama de flujo de los residuos en la CDMX .....                               | 4  |
| <b>Figura 1.3</b>  | Categorización de FORSU proyecto Greenfinch.....                                 | 7  |
| <b>Figura 1.4</b>  | Bioquímica de la digestión anaerobia .....                                       | 16 |
| <b>Figura 1.5</b>  | Generación total de Energía en Alemania en 2016 en TWh .....                     | 24 |
| <b>Figura 1.6</b>  | Esquema común de sistema húmedo de una etapa .....                               | 31 |
| <b>Figura 1.7</b>  | Esquema de Tanque Reactor Continuamente Mezclado CSTR.....                       | 31 |
| <b>Figura 1.8</b>  | Esquema incluyendo pre-tratamiento y post-tratamiento.....                       | 32 |
| <b>Figura 1.9</b>  | Esquema general de digestor con tecnología Dranco.....                           | 35 |
| <b>Figura 1.10</b> | Esquemas básicos de operación de un digestor Dranco.....                         | 36 |
| <b>Figura 1.11</b> | Vista de las tuberías de alimentación interna de un digestor Dranco. ....        | 37 |
| <b>Figura 1.12</b> | Esquema de operación de tecnologías secas continuas A-Kompogas y B-Valorga..     | 37 |
| <b>Figura 1.13</b> | Ejemplo de producción continua de biogás con varios digestores .....             | 40 |
| <b>Figura 1.14</b> | Esquema de Tecnología de garaje o por lotes .....                                | 41 |
| <b>Figura 1.15</b> | Configuración de recirculado de percolado en diferentes sistemas por lotes ..... | 43 |
| <b>Figura 1.16</b> | Esquema general de digestor con tecnología de garaje o por lotes (Bekon).....    | 45 |
|                    |  |    |
| <b>Figura 2.1</b>  | Diagrama de flujo de la planta de FORSU .....                                    | 49 |
| <b>Figura 2.2</b>  | Diagrama de flujo del pretratamiento de la planta de FORSU.....                  | 50 |
| <b>Figura 2.3</b>  | Composición de la FORSU durante digestión anaerobia.....                         | 52 |
| <b>Figura 2.4</b>  | Diagrama de flujo de la digestión en la planta de FORSU .....                    | 53 |
| <b>Figura 2.5</b>  | Diagrama de flujo del tratamiento de biogás .....                                | 55 |
| <b>Figura 2.6</b>  | Diagrama de flujo de la planta CHP generadora de energía .....                   | 55 |
| <b>Figura 2.7</b>  | Diagrama de flujo de la deshidratación del digestato .....                       | 56 |
| <b>Figura 2.8</b>  | Diagrama de flujo del tratamiento del efluente líquido .....                     | 57 |
| <b>Figura 2.9</b>  | Diagrama de flujo del tratamiento del efluente líquido .....                     | 57 |
|                    |  |    |
| <b>Figura 3.1</b>  | Diagrama de operación del reactor semicontinuo y definición de TRS. ....         | 59 |
| <b>Figura 3.2</b>  | Esquema 1 de reactor anaerobio semicontinuo (con respecto a la masa unitaria) .  | 62 |
| <b>Figura 3.3</b>  | Esquema 2 de reactor semicontinuo (con respecto a la masa unitaria).....         | 63 |
| <b>Figura 3.4</b>  | Esquema 3 de reactor semicontinuo caso específico discontinuo o por lotes .....  | 64 |
| <b>Figura 3.5</b>  | Distribución de los compuestos orgánicos de la FORSU .....                       | 67 |
| <b>Figura 3.6</b>  | Sistema de corte.....  | 68 |
| <b>Figura 3.7</b>  | Vista acercamiento a cuchillas del rotor .....                                   | 68 |
| <b>Figura 3.8</b>  | Equipos adicionales de la trituradora primaria .....                             | 69 |
| <b>Figura 3.9</b>  | Dimensiones de la trituradora primaria .....                                     | 69 |
| <b>Figura 3.10</b> | Gasómetro de doble membrana Sattler .....  | 70 |
| <b>Figura 3.11</b> | Catálogo de Wolf Power Systems de unidades CHP .....                             | 71 |
| <b>Figura 3.12</b> | Diagrama de flujo de la planta de tratamiento .....                              | 79 |
| <b>Figura 3.13</b> | Diagrama de Flujo completo de las plantas 1 y 2 de tratamiento de Coyoacán.....  | 80 |
| <b>Figura 3.14</b> | Diagrama de Flujo del pretratamiento de las plantas 1 y 2 .....                  | 81 |
| <b>Figura 3.15</b> | Diagrama de Flujo del mezclado de las plantas 1 y 2.....                         | 81 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 3.16</b> | Diagrama de Flujo de la digestión de las plantas 1 y 2 .....                     | 82 |
| <b>Figura 3.17</b> | Diagrama de Flujo de la generación de energía de las plantas 1 y 2 .....         | 82 |
| <b>Figura 3.18</b> | Diagrama de Flujo del tratamiento de residuos de las plantas 1 y 2 .....         | 83 |
| <b>Figura 3.19</b> | Captura de Google Earth de planta de tratamiento en Hengelo, Países Bajos.....   | 84 |
| <b>Figura 3.20</b> | Distribución en planta de planta de tratamiento en Hengelo, Países Bajos.....    | 84 |
| <b>Figura 3.21</b> | Captura de Google Earth de Bordo Poniente, localización propuesta de la planta.. | 85 |

## Lista de Tablas

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Tabla 1.1</b>  | Factores de emisión de CO <sub>2</sub> equivalente para varios esquemas de gestión de RSU ..... | 6  |
| <b>Tabla 1.2</b>  | Composición física de los RSU de la CDMX .....  | 8  |
| <b>Tabla 1.3</b>  | Densidades reportadas de FORSU.....   | 9  |
| <b>Tabla 1.4</b>  | Características químicas de FORSU y producción de metano.....                                   | 10 |
| <b>Tabla 1.5</b>  | Tamaños de partícula de la FORSU para digestión anaerobia a escala industrial .....             | 12 |
| <b>Tabla 1.6</b>  | Características de 17 plantas de pretratamiento de FORSU en Suecia.....                         | 14 |
| <b>Tabla 1.7</b>  | Condiciones ambientales requeridas .....  | 19 |
| <b>Tabla 1.8</b>  | Tiempo de regeneración de microorganismos .....   | 19 |
| <b>Tabla 1.9</b>  | Resumen de TRC según la tasa de crecimiento máxima de los microorganismos.....                  | 23 |
| <b>Tabla 1.10</b> | Análisis de los beneficios ambientales del uso de biogás .....                                  | 23 |
| <b>Tabla 1.11</b> | Comparación de composiciones típicas de biogás, gas de R.S. y gas natural .....                 | 26 |
| <b>Tabla 1.12</b> | Potenciales de metano según el tipo de sustrato .....   | 27 |
| <b>Tabla 1.13</b> | Resumen comparativo de diferentes tecnologías de mejoramiento del biogás .....                  | 28 |
| <b>Tabla 1.14</b> | Ventajas y desventajas del proceso seco .....   | 33 |
| <b>Tabla 1.15</b> | Ejemplos de plantas en operación con tecnología semicontinua (Dranco).....                      | 39 |
| <b>Tabla 1.16</b> | Ventajas y desventajas de la tecnología de garaje o por lotes .....                             | 46 |
| <b>Tabla 1.17</b> | Ejemplos de plantas en operación con Tecnología por lotes de Bekon.....                         | 47 |
| <br>              |   |    |
| <b>Tabla 2.1</b>  | Datos de caracterización de FORSU .....   | 49 |
| <br>              |   |    |
| <b>Tabla 3.1</b>  | Caracterización de la FORSU .....   | 66 |
| <b>Tabla 3.2</b>  | Datos de entrada a las plantas 1 y 2 de digestión anaerobia de Coyoacán .....                   | 72 |
| <b>Tabla 3.3</b>  | Datos de entrada a la planta 3 de digestión anaerobia de Coyoacán.....                          | 72 |
| <b>Tabla 3.4</b>  | Volúmenes de reactores en la industria de capacidad cercana a 40 000 ton/año .....              | 73 |
| <b>Tabla 3.5</b>  | Volúmenes de reactores en la industria de capacidad cercana a 20 000 ton/año .....              | 74 |



## INTRODUCCIÓN

En México se generan 53.1 millones de toneladas de residuos al año, con una generación per cápita de 1.2 kg/hab/día (SEMARNAT, 2015). A su vez, en México se generan 683 toneladas de CO<sub>2</sub>e. de GEI, de las cuales el 6.7 % proviene de la gestión de residuos. La tendencia actual marca que para el 2030 se generarán 973 ton de CO<sub>2</sub>e. de GEI, México se comprometió a reducir en un 22% las emisiones para ese año (INECC, 2017). Aunado a ese esfuerzo, México se comprometió a que el 40 % de la energía generada para el 2035 provenga de fuentes limpias o renovables (SENER, 2017).

Una alternativa para la gestión integral de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) es la digestión anaerobia, la cual estabiliza los residuos, mitiga la emisión de ton de CO<sub>2</sub>e. y además genera energía limpia utilizando el biogás generado como combustible (Charles et al., 2009). Permite la recuperación de energía en forma de metano, se reduce el volumen de residuos que son enviados a disposición final y es posible destruir organismos patógenos en procesos termofílicos (Angelidaki et al., 2006). Existen diversos procesos comerciales (Bekon, BTA, Valorga, Kompogas y Dranco entre otros) para la generación de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos. En Europa se han implementado restricciones a la disposición final de residuos en vertederos y rellenos sanitarios, estas medidas han provocado el crecimiento exponencial de procesos biológicos como alternativas para su tratamiento (Mata-Álvarez et al., 2003). Actualmente en Europa existen 244 plantas a escala comercial para el procesamiento de FORSU sola o en co-digestión con otros sustratos (Mattheeus, 2012). El objetivo de este trabajo es proponer un diseño básico de una planta de digestión anaerobia que trate la FORSU que se genere en Coyoacán.

Las tecnologías comerciales existentes se clasifican en: digestión seca y digestión húmeda, de acuerdo con el contenido de sólidos que se alimenta al reactor de digestión, así como también se clasifican por su continuidad de operación (De Baere et al., 2010). Los reactores anaerobios secos semicontinuos y discontinuos son los que competen a este trabajo. Es pertinente observar que la diferencia radica en que en el sistema semicontinuo, recibe el alimento en lotes con frecuencias que van desde diarias hasta el extremo de una sola en todo el tiempo que dura la reacción, situación en que se ubicaría el reactor por lotes (discontinuo). En el reactor por lotes se hace el recambio con nueva FORSU, en un tiempo en que al menos se duplica la población de microorganismos limitantes, en donde se extrae todo el material (digestato), una fracción es devuelta para lograr la digestión anaerobia del siguiente lote. El objetivo de este trabajo es definir la operación de ambos reactores basada en los tiempos de residencia de sólidos (TRS) y retención hidráulico (TRH).

En el capítulo uno se aborda el marco teórico necesario para entender el proceso de digestión anaerobia, se describe la microbiología del proceso, los parámetros de operación, las características de la FORSU analizada y se describen las tecnologías existentes. Posteriormente, en el capítulo dos se aborda la metodología empleada, en donde, se

describe el dimensionamiento a utilizar para la planta a diseñar. En el capítulo tres se esquematiza el funcionamiento de un digestor seco semicontinuo, con énfasis en las veces que se recircula el digestato mediante la relación entre TRS y TRH para evitar lavar los microorganismos. También se describe el reactor conocido como batch (discontinuo por lotes). En ese mismo capítulo se propone el diseño básico de la planta de digestión anaerobia de la FORSU generada en Coyoacán. Para finalizar, en el capítulo de conclusiones se describen los objetivos cumplidos, como el diseño de la planta modular de digestión anaerobia y la operación de operación de un reactor semicontinuo a partir de las definiciones de tiempo de residencia de sólidos y tiempo de retención hidráulico.

#### Objetivo general

- Diseñar una planta modular para la digestión anaerobia con base en la FORSU generada en Coyoacán.

#### Objetivos particulares

- Definir los tiempos de residencia de sólidos y de retención hidráulico a partir del funcionamiento de un reactor semicontinuo.
- Definir la tasa específica de crecimiento de los organismos metanogénicos que limitan la digestión seca, partiendo de la información de los digestores anaerobios secos documentados a escala industrial.
- Encontrar la relación de dependencia entre los tiempos TRH y TRS, analizando la operación del reactor.
- Encontrar un método para volumen de reactor combinando conceptos de producción diaria y fracción de recambio de FORSU.
- Definir la operación de un reactor semicontinuo y discontinuo a partir de las definiciones de tiempo de residencia de sólidos y tiempo de retención hidráulico.

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1 Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)

### 1.1.1 Generación de Residuos Sólidos Urbanos

La generación mundial de residuos sólidos urbanos (RSU) ha crecido exponencialmente en los últimos años, consecuentemente, el manejo de residuos es una cuestión crítica a enfrentar en todas las ciudades del mundo. Tan solo en 2012, la generación de RSU fue de 1,300 millones de toneladas métricas y se estima que para el 2025 la generación anual sea de 2,200 millones de toneladas. El contenido de compuestos orgánicos en la RSU es en promedio 46% (Hoornweg, 2012), ver figura 1.1. Según la FAO, la organización de la ONU dedicada a regular la Alimentación y la Agricultura, anualmente se producen 1.6 giga toneladas de residuos alimentarios, es decir, el 27 % del total de las 6 giga toneladas de la producción agrícola mundial se vuelve residuo alimentario (FAO, 2013).

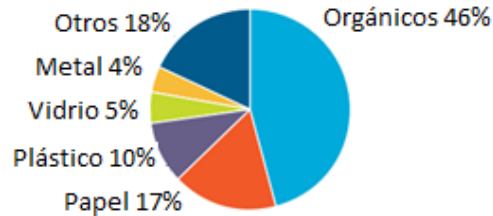


Figura 1.1 Composición global de los residuos sólidos  
Referencia: (Hoornweg, 2012)

### 1.1.2 Generación de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de México

La Ciudad de México es considerada la aglomeración urbana con más población en el continente americano. Por ello, es un gran reto disponer de todos los residuos sólidos generados en ella. Durante 2016, la población residente y la flotante, que diariamente transita por la entidad, generaron 12,920 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, es decir, un total de alrededor de 4.7 millones de toneladas de residuos al año. En cuanto a la clasificación por tipo de fuente los RSU en la ciudad, 46% es de origen domiciliario, 26% de comercios, 14% de servicios, 5% de residuos de manejo especial y residuo de áreas verdes, 4% de la central de abasto de la CDMX, y 3% controlados (de unidades médicas y terminales de transporte) (SEDEMA, 2017)

La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal establece, desde el 2004, la recolección selectiva obligatoria, de los residuos separados por el generador en orgánicos e inorgánicos. En la CDMX, la única manera de tratar los residuos orgánicos con una valorización, hasta el momento de la redacción de esta tesis, es a través de 8 plantas de composta, en donde los residuos se trituran y se degradan aerobiamente para producir un humus o composta. Aclaro hasta el momento porque la planta de termo-valorización de residuos aún no está en funcionamiento. En el 2016 se recibieron en las plantas de composta 484,872 toneladas de residuos orgánicos, de los cuáles el 95.35% se envió al Bordo Poniente. Se produjeron 92,391 toneladas de composta de las cuales sólo se aprovecharon 8,991 toneladas para parque, áreas verdes, y cultivos agrícolas (SEDEMA, 2017).

## Diagrama de flujo de los residuos en la CDMX

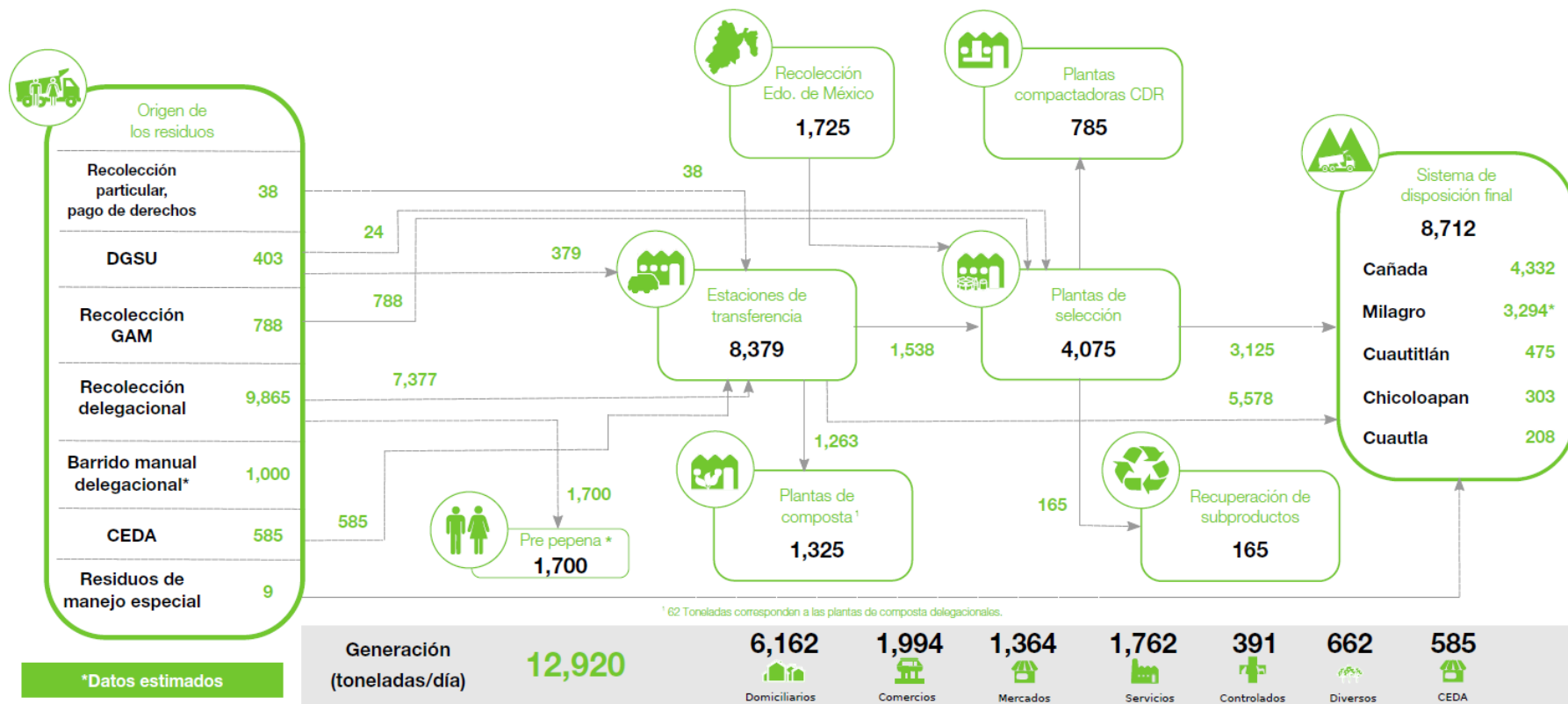


Figura 1.2 Diagrama de flujo de los residuos en la CDMX  
Referencia: (SEDEMA, 2017)

### 1.1.3 Generación de residuos en Coyoacán

Según el Inventario de RSU de la CDMX del 2016 se generaron solamente en Coyoacán 800 toneladas de RSU al día, es decir, alrededor de 290 000 toneladas en total en todo el año. Per cápita se están generando 1.31 kg/habitante/día en esta alcaldía. El nivel de eficiencia de recolección en Coyoacán es del 67%, bastante alto comparado con el promedio de todas las alcaldías que es de apenas el 34%. Tan sólo de Coyoacán se enviaron, en 2016, 95,866 toneladas de residuos orgánicos para la planta de composta, de los cuales 90,880 son residuos orgánicos combinados y 4,986 son residuos exclusivamente de poda (SEDEMA, 2017).

### 1.1.4 Disposición de residuos

La disposición de los RSU se hizo por muchos años en rellenos sanitarios, sin embargo, la tendencia mundial indica la reducción exponencial de la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios (Ranieri et al., 2018). Durante las últimas décadas se ha descubierto que tienen un alto impacto negativo al medio ambiente al liberar metano a la atmósfera. El metano tiene un potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés, Global Warming Potential) para un periodo de 100 años de 23 veces el de CO<sub>2</sub> (Browne y Murphy, 2013). Consecuentemente, en todo el mundo, las regulaciones para su disposición se han vuelto más estrictas. En Europa, muchos rellenos sanitarios se han cerrado debido a las nuevas regulaciones y en todo el mundo, se ha implementado cada vez más la separación, entre orgánico e inorgánico de los residuos, desde el origen (Fdez.-Güelfo et al., 2011).

Independientemente del día de la recolección, los residuos generados en la ciudad son llevados a una de las 12 estaciones de transferencia. Ahí llegan todos los residuos sólidos generados en la ciudad, ya sea de recolección pública o de servicios particulares. La Ciudad de México cuenta también con 2 plantas de selección y separación de residuos para filtrar materiales reciclables. Estas se encuentran ubicadas, una próxima a la estación de transferencia de San Juan de Aragón y la otra en las instalaciones del relleno sanitario Santa Catarina. Debido a que no es factible la habilitación de un nuevo relleno sanitario dentro de la CDMX para disponer los RSU generados diariamente, los residuos se envían en vehículos transfer a tres sitios en el Estado de México (Cañada, Cuautitlán y Milagro) y a dos ubicados en el estado de Morelos (Tepoztlán y Cuautla) (SEDEMA, 2015), ver figura 1.2.

Existen otras alternativas para tratar los RSU, por ejemplo, la incineración es una práctica común, ya que se recupera energía en el proceso de termovalorización de los residuos. Esta alternativa depende del potencial calorífico y el contenido de humedad del material a ingresar. Para tratar residuos orgánicos la práctica más común es compostaje, una degradación aerobia que permite reutilizar los residuos como fertilizante de suelos. Sin embargo, ambos procesos presentan emisiones mayores de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, causando impactos nocivos al ambiente (Mata-Álvarez, 2003). En la siguiente tabla se muestran los factores de emisión en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente sobre tonelada de RSU a tratar, ver tabla 1.1.

**Tabla 1.1** Factores de emisión de CO<sub>2</sub> equivalente para varios esquemas de gestión de RSU

| <b>Tratamiento de RSU</b>   | <b>Factor de emisión [t. eq. CO<sub>2</sub>/t. RSU]</b> |
|---|---|
| Relleno Sanitario   | 1.97  |
| Incineración  | 1.58  |
| Separación en fuente + Compostaje + Relleno Sanitario               | 1.61  |
| Separación en fuente + Compostaje + Incineración                    | 1.41  |
| Separación en fuente + Digestión Anaerobia Seca + Relleno Sanitario | 1.42  |
| Separación en fuente + DA Húmeda + Incineración + Relleno Sanitario | 1.19  |

Referencia: (Baldasano y Soriano, 2000)

Se observa que la disposición directa a rellenos sanitarios es la que presenta una emisión mayor de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes a la atmósfera como GEI. Las alternativas que incluyen una separación en la fuente presentan una reducción en la emisión de contaminantes. De todas las alternativas las que incluyen digestión anaerobia son las que presentan una menor cantidad de emisiones a la atmósfera. Aunado a ese beneficio ecológico, se recupera energía térmica y eléctrica al obtener metano en su degradación y aprovecharlo como fuente de energía. El digestato de estos métodos también puede ser utilizado como mejorador de suelos si se le da un tratamiento de compostaje.

En México, la primera acción legal encaminada a promover la recolección separada de los RSU ocurrió en 2003, cuando se publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF). Esta ley tiene como objetivo lograr una gestión integral de los RSU mediante políticas de reciclado y reutilización. Se han publicado programas para promover acciones encaminadas a aprovechar la FORSU mediante procesos biológicos, aerobio para compostaje y anaerobio para producción de biogás y generación de energía eléctrica (GDF, 2010 y Campuzano, 2015).

#### 1.1.5 Definición de concepto: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)

La digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), es una alternativa viable para estabilizar residuos y recuperar energía en el proceso. La producción de biogás, es decir, su degradabilidad anaerobia, depende de la cantidad y tipo de macromoléculas orgánicas, en términos de proteínas, lípidos, carbohidratos y lignocelulosa. Así, es importante conocer a profundidad la composición de la FORSU que se va a tratar para predecir lo más preciso posible como se va a producir metano y a recuperar energía a partir de la digestión anaerobia de dicho sustrato (Campuzano y González 2016).

La definición teórica de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales (FORSU) no está estandarizada. La producción y composición de la FORSU es dependiente de factores como zona geográfica, tipo de actividad productiva de la zona, la cantidad de habitantes en la zona, el régimen alimenticio de los habitantes, su poder adquisitivo, la temporada de muestreo y el sistema de recolección particular de su administración (VALORGAS, 2010).

¿Cómo acota la ley en México a los residuos orgánicos? En la Ciudad de México, la Ley de Residuos Sólidos, en el artículo 32, clasifica como residuos orgánicos a los residuos de jardinería, provenientes de poda de árboles y áreas verdes; a los provenientes de la preparación y consumo de alimentos; y aquellos residuos susceptibles de ser utilizados como insumo en la preparación de composta, (SEDEMA, 2008). En cuanto a la Norma Ambiental sobre separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal, define a los residuos orgánicos como todo residuo sólido biodegradable. A su vez, biodegradable lo define como todo material o compuesto químico que puede ser transformado en sustancias más sencillas por acción biológica (NADF-024-AMBT, 2013).

#### 1.1.6 Características de la FORSU

Hay una gran diversidad de criterios para para realizar una categorización de la FORSU. La compañía VALORGAS realizó un proyecto de valorización de residuos alimentarios a biogás, en donde se estudió la gestión y caracterización de la FORSU para la producción de biogás en cuatro países europeos, Reino Unido, Finlandia, Italia y Portugal. Se analiza el efecto del concepto de FORSU, el sistema de recolección y la forma de categorizarla (en que fracciones la podemos dividir) sobre sus características físicas. Para alcanzar tal objetivo, se compararon 5 formas de categorizar la FORSU en diferentes proyectos: Valorus, Greenfinch, UNIVE, WRAP, VALORGAS (VALORGAS, 2010). En la siguiente figura se pueden observar los diferentes compuestos que constituyen la FORSU de acuerdo con el criterio y categorización de Greenfinch, ver figura 1.3. Se pueden observar 15 fracciones de las 16 que conforman su clasificación, la fracción de semillas y piedras no aparece en la figura.



**Figura 1.3** Categorización de FORSU proyecto Greenfinch  
Referencia: (VALORGAS, 2010)

Se determinan como impurezas físicas en los sustratos para digestión anaerobia, a aquellos materiales no degradables, formados de plástico o metales, como bolsas, materiales de empaque y a residuos de jardinería voluminosos. La correcta separación en fuente evita la presencia de estos materiales, de no ser así el sistema de recolección, se tendrá que instalar un sistema de pretratamiento con barreras físicas en la planta (pantallas, tamices, rejillas etc.). Debido a la heterogeneidad de los compuestos que constituyen la FORSU es probable encontrar una cantidad considerable de residuos con dimensiones no aptas para el proceso, los cuales deben ser reducidos por maceración, trituración, picado, u otro medio (Al Saedi y Lukehurst, 2012).

**Tabla 1.2** Composición física de los RSU de la CDMX

| <b>Categoría</b>             | <b>Porcentaje en peso</b> |
|------------------------------|---------------------------|
| Orgánicos                    | 49.50                     |
| Plásticos                    | 13.16                     |
| Residuos sanitarios          | 10.77                     |
| Papel                        | 5.89                      |
| Otros                        | 4.19                      |
| Cartulina                    | 4.03                      |
| Textiles                     | 3.64                      |
| Vidrio                       | 2.65                      |
| Materiales para construcción | 1.88                      |
| Residuos especiales          | 1.41                      |
| Material ferroso             | 1.16                      |
| Materiales finos             | 0.80                      |
| Madera                       | 0.45                      |
| Aluminio y otros metales     | 0.29                      |
| Residuos peligrosos          | 0.18                      |

Referencia: (Duran et al., 2013)

En la tabla 1.2 se muestra la composición física de los RSU de la Ciudad de México. La composición de la FORSU y su biodegradabilidad no solo fluctúan de acuerdo a la región o al nivel socioeconómico, sino también entre estaciones del año más cálidas o más frías. Estas estaciones modifican los hábitos de consumo y, por consecuencia, la generación de residuos. Aunado a ese fenómeno, hay frutas, verduras u otros productos que son de temporada, lo cual incide en la composición de la FORSU (Hansen et al., 2007).

La densidad de los residuos es una característica física que es frecuentemente empleada para realizar cálculos en el proceso de diseño de plantas de digestión anaerobia, pero es poco común encontrar este valor en la bibliografía. En la tabla 1.3 se presentan algunos valores de densidad reportados en la literatura, los valores varían en un rango muy amplio, desde 328 hasta 933 kg/m<sup>3</sup>. Los residuos que presentan mayor densidad reportan una menor presencia de compuestos contaminantes. Por el contrario, los residuos con la menor densidad reportada, son los de Foster-Carneiro et al. 2008, son residuos de baja biodegradabilidad, lo que sugiere un alto contenido de contaminantes (Campuzano y González, 2016).



Tabla 1.3 Densidades reportadas de FORSU

| Fuente   | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Referencia                               |
|--|-------------------------------|--|
| FORSU recolectada en fuente.<br>Tamaño original. | 750                           | Antognoni <i>et al.</i> , 2013           |
| FORSU separada mecánicamente.                    | 790-810                       | Romero Aguilar <i>et al.</i> , 2013      |
| FORSU secada a 105°C.                            | 666                           | Fernández-Rodríguez <i>et al.</i> , 2013 |
| FORSU separada con sistema acuoso (pulper).      | 933                           | Dong <i>et al.</i> , 2010                |
| FORSU separada mecánicamente y triturada.        | 328                           | Forster-Carneiro <i>et al.</i> , 2008    |

Referencia: (Campuzano y González, 2016)

#### 1.1.7 Características químicas de la FORSU

Desde el punto de vista químico, la FORSU presenta diferentes variaciones en sus características como en los componentes que la constituyen. Hay parámetros que son comúnmente determinados en todos los trabajos que estudian el uso de la FORSU como sustrato en procesos de digestión anaerobia, como humedad, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y la relación SV/ST. Estos parámetros se usan para determinar una aproximación al contenido de materia biodegradable y a la relación de nutrientes en el sustrato (Campuzano, 2015).

La tabla 1.4 presenta las características químicas de la FORSU de 22 países. Estos estudios reportan un rango de valores de pH de 3.9 a 7.9 con un promedio de  $5.2 \pm 0.95$ . El intervalo de sólidos totales (ST) está entre 15.0% y 50.2%. De las 43 ciudades solo hay 15 valores de ST por debajo del 25%, la concentración más alta reportada fue por Zhu et al. (2010) con un 50.2%, derivado de su proceso de separación mediante aire comprimido. Los promedios reportados de ST y de humedad son  $27.2 \pm 7.6\%$  y  $72.8 \pm 7.6\%$ , respectivamente.

El contenido de sólidos volátiles (SV) varió de forma considerable desde un 7.4% hasta 36.1%, consecuentemente también se reportan variaciones importantes en la relación SV/ST de 61.6 % a 95%, excluyendo el valor anómalo de Foster-Carneiro et al., 2008. La relación promedio de todas las ciudades es de 84.6% con una desviación estándar de 9.9%.

La tabla 1.4 es muy representativa ya que registra valores de producción de metano de esa FORSU caracterizada. El rango de valores va de 61 LN/kg SV reportado por Forster-Carneiro a 580 LN/kg SV. Sin considerar el dato inferior que se encuentra muy por debajo del promedio, el siguiente límite inferior es de 177 LN/kg SV. El promedio general es de 418.5 LN/kg SV con una desviación estándar de  $\pm 124.5$  LN/kg SV.

En la tabla la mayoría de los experimentos realizados son de tipo por lotes (batch) o discontinuos, sin embargo, también se presentan valores de pruebas en modelos semicontinuos. Hay sistemas mesófilicos y termófilos, húmedos y secos, estas diferencias en las pruebas explican la gran variedad en los valores registrados. Es por ello que es difícil comparar los datos entre si.

Tabla 1.4 Características químicas de FORSU y producción de metano

| País            | Ciudad       | pH   | Humedad (%) | ST (%) | SV (%) | SV/ST (%) | NK (g/kg) | PT     | Metano    | Tipo de Reactor | Fermentación | Temperatura | Referencias                |
|-----------------|--------------|------|-------------|--------|--------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------------|--------------|-------------|----------------------------|
|                 |              |      |             |        |        |           |           | (g/kg) | (LN/kgSV) |                 |              |             |                            |
| Australia       | Brisbane     | -    | 70.6        | 29.4   | 22.7   | 77.1      | 8.6       | -      | -         | -               | -            | -           | Hla y Roberts, 2015        |
| Bélgica         | Gent         | -    | 74.5        | 25.5   | 24     | 94        | 11.9      | 0.7    | 319       | Semi            | Húmedo       | Meso        | Vrieze et al., 2013        |
| China           | Shanghái     | 4.7  | 78.8        | 21.2   | 19.7   | 92.8      | -         | -      | 465       | Semi            | Seco         | Meso        | Dai et al., 2013           |
|                 | Canton       | 5.3  | 81.6        | 18.4   | 11.3   | 61.6      | 4.2       | 0.4    | 314       | Batch           | Seco         | Meso        | Dong et al., 2010          |
| Colombia        | Bucaramanga  | -    | 84          | 16     | 15.1   | 94.4      | 7.7       | 2.2    | 297       | Semi            | Seco         | Meso        | Castillo et al., 2006      |
| Republica Checa | Praga        | 5.95 | 67.5        | 32.5   | 23.1   | 71        | 4.5       | 0.7    | -         | -               | -            | -           | Hanc et al., 2011          |
| Dinamarca       | Lynby        | -    | 84          | 16     | 14.9   | 93.4      | 5.2       | -      | 579       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Fitamo et al., 2016        |
|                 | Copenhague   | -    | 72          | 28     | 24.4   | 87        | 7         | 1.7    | 500       | Batch           | Húmedo       | Termo       | Davidsson et al., 2007     |
|                 | Vejile       | -    | 70          | 30     | 24     | 80        | 6.9       | 1.5    | 515       | Batch           | Húmedo       | Termo       |                            |
|                 | Kolding      | -    | 67          | 33     | 26.4   | 82        | 7.9       | 1.7    | 573       | Batch           | Húmedo       | Thermo      |                            |
|                 | Aalborg      | -    | 70          | 29.4   | 25.2   | 85.6      | -         | 1.5    | 485       | Batch           | Húmedo       | Termo       | Hansen et al., 2007        |
|                 | Kolding      | -    | 68.3        | 31.7   | 26.4   | 83.4      | -         | 1.6    | 468       | Batch           | Húmedo       | Termo       |                            |
|                 | Grindsted    | -    | 64.4        | 35.6   | 30.7   | 86.2      | 6.3       | -      | 373       | Batch           | Húmedo       | Termo       | Hartmann y Ahring, 2005    |
|                 | Gistrup      | 4.6  | 70          | 30     | 24.4   | 81        | 6.5       | -      | 580       | Batch           | Húmedo       | Termo       | Angelidaki et al., 2006    |
| Finlandia       | Forssa       | 5.3  | 73          | 27     | 24.9   | 92.3      | 6.5       | 0.7    | -         | -               | -            | -           | VALORGAS, 2010             |
| Francia         | Rennes       | 5.3  | 78.7        | 21.3   | 17.5   | 82.1      | 4.5       | -      | -         | -               | -            | -           | Adhikari et al., 2013      |
| Alemania        | Karlsruhe    | 5.1  | 74.5        | 25.5   | 22.5   | 88.2      | 7.8       | -      | 528       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Nayono et al., 2009        |
| Grecia          | Xanthi       | -    | 53.7        | 46.3   | 34.9   | 75.3      | 6.9       | -      | -         | -               | -            | -           | Komilis et al., 2012       |
| Groenlandia     | Sisimiut     | -    | 62.6        | 37.4   | 33.7   | 90        | 13.9      | 13     | -         | -               | -            | -           | Eisted y Christensen, 2011 |
| India           | Kerala       | 6.2  | 81.3        | 18.7   | 16.9   | 90.6      | 1         | -      | -         | -               | -            | -           | Sajeena Beevi et al., 2015 |
|                 | Indore       | -    | 85          | 15     | 13.3   | 88.5      | 1.7       | -      | 320       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Rao y Singh, 2004          |
| Irlanda         | Cork         | 4.1  | 70.6        | 29.4   | 28     | 95        | 10.4      | -      | 529       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Browne y Murphy, 2013      |
| Italia          | Padova       | -    | 69.5        | 30.5   | 28.1   | 92        | 7.7       | 1.16   | 490       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Alibardi y Cossu, 2015     |
|                 | Lacchiarella | 4.32 | 77.7        | 22.3   | 19.7   | 88.3      | 4         | -      | 336       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Pognani et al., 2015       |
|                 | Udine        | -    | 70          | 30     | 27.5   | 92        | 7.2       | 0.63   | 365       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Cabbai et al., 2013        |
|                 | Perugia      | -    | 81.1        | 18.9   | 15.8   | 84        | -         | -      | 0         | Batch           | Seco         | Termo       | Fantozzi y Buratti, 2011   |
|                 | Milán        | 4.38 | 75.8        | 24.2   | 22.2   | 91.6      | 5         | 0.5    | 410       | Batch           | PMB          | Meso        | Schievano et al., 2010     |
|                 | Verona       | -    | 71.2        | 28.8   | 22.8   | 79        | 28        | 2.4    | -         | -               | -            | -           | Bolzonella et al., 2005    |
|                 | Treviso      | 6.2  | 72.5        | 27.5   | 23.6   | 86.6      | 7         | 1      | -         | -               | -            | -           | VALORGAS, 2010             |

Referencia: (Campuzano y González, 2016)

Tabla 1.4 (Continuación)

| País               | Ciudad              | pH   | Humedad (%) | ST (%) | SV (%) | SV/ST (%) | NK (g/kg) | PT     | Metano    | Tipo de Reactor | Fermentación | Temperatura | Referencias                   |
|--------------------|---------------------|------|-------------|--------|--------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------------|--------------|-------------|-------------------------------|
|                    |                     |      |             |        |        |           |           | (g/kg) | (LN/kgSV) |                 |              |             |                               |
| Libano             | Beirut              | -    | 81.4        | 18.6   | 17.2   | 92.6      | -         | 0.7    | 350       | Semi            | Húmedo       | Termo       | Ghanimeh et al., 2012         |
| México             | Ciudad de México    | -    | 70.3        | 29.7   | 22.3   | 75.1      | 5.4       | 1.8    | 545       | Semi            | Húmedo       | Meso        | Campuzano y González, 2015    |
| Portugal           | Lisboa              | -    | 66.2        | 33.8   | 27.6   | 81.7      | 5.1       | 1.7    | -         | -               | -            | -           | VALORGAS, 2010                |
| República de Corea | Daejeon             | 3.9  | 78.9        | 21.1   | 17.4   | 82.5      | 13        | -      | 502       | Semi            | Seco         | Meso        | Cho et al., 2013              |
| España             | Barcelona           | -    | 71          | 29     | 22.3   | 77        | 5.3       | -      | 382       | Batch           | Húmedo       | Meso        | Ponsá et al., 2011            |
|                    | Diferentes ciudades | 5.26 | 70.8        | 29.2   | 24.9   | 85.2      | 7.7       | -      | -         | -               | -            | -           | López et al., 2010            |
|                    | Cádiz               | 7.9  | 82.8        | 17.2   | 7.4    | 43        | 26        | -      | 61        | Batch           | Seco         | Termo       | Forster-Carneiro et al., 2008 |
| Turquía            | Ankara              | -    | 64.4        | 35.6   | 33.8   | 94.9      | 7.2       | -      | -         | -               | -            | -           | Cekmecelioglu y Uncu, 2013    |
| Reino Unido        | Luton               | 5.1  | 76.3        | 23.7   | 21.8   | 91.3      | 7.4       | 1.2    | -         | -               | -            | -           | VALORGAS, 2010                |
|                    | Eastleigh           | 5.7  | 71.4        | 28.6   | 26.8   | 94.2      | 7.8       | 0.8    | -         | -               | -            | -           |                               |
|                    | Southampton         | -    | 72.3        | 27.7   | 24.4   | 88        | 8.9       | 1.9    | 402       | Semi            | Seco         | Meso        | Banks et al., 2011            |
| USA                | Wooster             | 4.1  | 84.8        | 15.2   | 13.8   | 90.8      | -         | -      | -         | -               | -            | -           | Brown y Li., 2013             |
|                    | Arizona             | 5.4  | 49.8        | 50.2   | 36.1   | 71.9      | 1.9       | 0.5    | 177       | Semi            | Húmedo       | Termo       | Zhe et al., 2010              |
|                    | San Francisco       | -    | 69.1        | 30.9   | 26.4   | 85.3      | 9.8       | 1.6    | 435       | Batch           | Húmedo       | Termo       | Zhang et al., 2007            |

Referencia: (Campuzano y González, 2016)

## 1.2 Pretratamiento

Existe una gran variedad de sistemas para la separación, recolección y pretratamiento de la FORSU antes de su digestión anaerobia. Se necesitan estos sistemas para eliminar los contaminantes presentes en la FORSU que podrían dañar las instalaciones de bombeo o inhibir los procesos de digestión.

### 1.2.1 Reducción del tamaño de partícula

Hay varios artículos que hablan de la influencia del tamaño de la partícula sobre el proceso de digestión anaerobia. En general, se acepta que el tamaño promedio de las partículas que componen la FORSU afecta la transformación biológica de los residuos y el dimensionamiento de los equipos que manejan el sustrato. El tamaño promedio común de la FORSU sin triturar o macerar retarda el proceso de digestión de manera considerable, por lo que se considera necesaria la reducción del tamaño promedio de las partículas. Al reducir el tamaño, se aumenta el área superficial expuesta total disponible para la digestión por parte de los microorganismos lo que aumenta la eficiencia del reactor (Ignoni, 2008). Ver tabla 1.5 en donde se presenta el tamaño de partícula que manejan diferentes procesos industriales.

**Tabla 1.5** Tamaños de partícula de la FORSU para digestión anaerobia a escala industrial

| <b>Ubicación de la planta</b> | <b>Tecnología</b> | <b>Tamaño de partícula</b> | <b>Referencia</b> |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Bassano, Italia               | Valorga           | 10 mm                      | CEPA, 2008        |
| Holsworthy, Reino Unido       | Andigestion       | 12 mm                      | Andigestion, 2015 |
| Manchester, Reino Unido       | BTA               | < 60-80 mm                 | BTA, 2015         |
| Todas las plantas             | Dranco            | <40 mm                     | OWS, 2015         |

En la tabla se puede observar que el tamaño de la partícula varía mucho según la tecnología que se esté empleando. Las tecnologías que utilizan tuberías y equipos de bombeo para mover el sustrato son más sensibles a partículas de mayor tamaño, por ejemplo, Valorga y Andigestion.

### 1.2.2 Separación de materiales no orgánicos

La FORSU inevitablemente presenta impurezas en su composición. Aun cuando esta ha sido separada y recolectada de forma correcta, suele contener bolsas de plástico, papel y metales. La separación de los residuos mediante equipos mecánicos se basa en procesos de separación por magnetismo, densidad y tamaño (CEPA, 2008). En los trenes de pretratamiento se busca remover bolsas de plástico mediante un rompedor de bolsas de plástico, reducir el tamaño de la partícula mediante un molino, o un *pulper*, o una prensa o un triturador, también separar metales mediante una banda magnética y cribar el sustrato para no admitir partículas mayores al tamaño permitido. Otras configuraciones reportadas para la separación de compuestos inorgánicos son: molino-*pulper*-prensa, triturador-prensa, prensa-criba, rompedora de bolsas-trómel-*pulper*-dispersión-criba. Cada configuración se adapta al sistema de gestión de residuos local (Bernstad et al., 2013).

La etapa de pretratamiento es indispensable en todas las plantas de digestión anaerobia de FORSU, sin embargo, un pretratamiento ineficiente puede llevar a la falla de la planta. Si el pretratamiento es inadecuado, un porcentaje considerable de la producción de metano se puede perder en el material de rechazo del pretratamiento, ya que el porcentaje de materia orgánica que es desechada en algunos trenes de pretratamiento es muy alto.

Bernstad et al. (2013), llevaron a cabo un estudio en donde se evaluaron las características de 17 plantas de digestión anaerobia en Suecia. La cantidad de material de rechazo varía en un rango amplio del 2% al 45% en peso húmedo, con un promedio de 20%.

En la tabla 1.6 se muestran los trenes de tratamiento que cada una de esas 17 plantas utiliza, así como las características de cada uno. La información se recopiló mediante entrevistas a los operarios de las plantas de tratamiento. Se observa en la tabla que las configuraciones de trenes de pretratamiento que presentan menor porcentaje de rechazo fueron triturador-*pulper* (2-5%) y separador óptico-*pulper*-criba (5%). Las configuraciones que muestran mayores porcentajes de rechazo fueron: separación óptica-mezclado-prensa (30-35%) y trituración-separación magnética-criba-prensa (45%). Este material usualmente se lleva a rellenos sanitarios o es incinerado, ver tabla 1.6.

De las 17 plantas del estudio, se seleccionaron 4 de donde se tomaron muestras de los residuos recibidos antes y después de la separación. Esas muestras se caracterizaron y posteriormente se les hizo una prueba de potencial bioquímico de metano. Determinaron que entre el 9 y 28% del potencial de producción de metano de los residuos que llegan a la planta se pierde en la fracción de rechazo (Bernstad et al., 2013). Es evidente que se necesita incrementar la eficiencia de estos sistemas para aprovechar mejor la FORSU.

Tabla 1.6 Características de 17 plantas de pretratamiento de FORSU en Suecia

In.=Incineración, C=Compostaje, R.S.=Relleno Sanitario, n.d.=No determinado, P=*Pulper* o despulpadora, D=Dispersión, SP=*Screwpress* o Prensa de tornillo, De.=Separación por densidad, CD=Criba de discos,

| Problemas de mantenimiento | Problemas de calidad de sustrato | Uso de energía (kWh/ton) | Cantidad de material de rechazo (%) | Tratamiento de material de rechazo | Tecnologías de pretratamiento |             |          |           |                 |                       |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------|----------|-----------|-----------------|-----------------------|
|                            |                                  |                          |                                     |                                    | Separación óptica             | Trituración | Mezclado | Fresadora | Banda magnética | Técnica de separación |
| Alto                       | Sí                               | n.d.                     | 2–5                                 | In.                                |                               | X           | X (P)    |           |                 | Ninguno               |
| Alto                       | No                               | n.d.                     | 30–35                               | In.                                | X                             |             | X        |           |                 | SP                    |
| Bajo                       | No                               | n.d.                     | 45                                  | n.d.                               |                               | X           |          |           | X               | Tamiz, SP             |
| Alto                       | Sí                               | Diesel                   | n.d.                                | n.d.                               |                               |             | X (P)    | X         |                 | SP                    |
| Medio                      | No                               | 44                       | 22                                  | R.S.                               |                               | X           |          |           |                 | SP                    |
| Medio                      | Sí                               | 35                       | 8–10                                | In.                                |                               | X           |          | D         |                 | Tamiz, De.            |
| Bajo                       | No                               | 30                       | 30                                  | In.                                |                               | X           | X        | X         |                 | Tamiz                 |
| n.d.                       | n.d.                             | 7.5                      | 10                                  | R.S.                               |                               |             | X        | X         |                 | Ninguno               |
| Alto                       | No                               | 22                       | 27                                  | In.                                |                               | X           | X        |           |                 | SP                    |
| Medio                      | Sí                               | 8–14                     | 15                                  | R.S.                               |                               |             | X        | X         |                 | De.                   |
| n.d.                       | n.d.                             | 36                       | 3–6                                 | n.d.                               |                               |             | X        | D         |                 | Tamiz                 |
| Alto                       | No                               | 84                       | 19                                  | In./C                              |                               | X           | X (P)    | D         |                 | CD, Tamiz, De.        |
| Bajo                       | No                               | n.d.                     | 5                                   | R.S.                               | X                             |             | X (P)    |           |                 | Tamiz                 |
| n.d.                       | Sí                               | Diesel                   | 19                                  | In.                                | X                             |             |          | X         |                 | CD                    |
| Alto                       | No                               | 36.4                     | 11                                  | In./C/R.S.                         |                               | X           | X        | X         |                 | Tamiz, De.            |
| Alto                       | Sí                               | n.d.                     | n.d.                                | n.d.                               |                               | X           | X (P)    | X         | X               | Ninguno               |
| Bajo                       | No                               | n.d.                     | 25                                  | R.S.                               |                               |             |          |           |                 | SP                    |

Referencia: (Bernstad et al., 2013)

## 1.3 Descripción del Proceso de Digestión Anaerobia

### 1.3.1 Descripción general

La digestión anaerobia es un proceso en donde se degrada material orgánico a través de la actividad biológica de varios microorganismos en ausencia de oxígeno, dicho proceso resulta en la generación de biogás. Este biogás puede ser utilizado para generar calor, electricidad o, si se somete a un proceso de mejoramiento, como gas natural. El sustrato que queda al terminar el proceso puede ser utilizado como fertilizante. Las condiciones de contenido de agua, temperatura y presencia de nutrientes tienen que ser propicias para que cada grupo de microorganismos pueda desarrollar su función (Joy, 2012).

En el proceso de digestión anaerobia son compuestos inorgánicos como el  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{CO}_2$  los que actúan en el proceso de oxidación como receptores de electrones. La formación de metano no es posible en medios que contengan oxígeno, nitratos o sulfatos como receptores de electrones. Este proceso se da de forma natural en algunos ecosistemas, por ejemplo, en pantanos, lagos, mares, suelos, sedimentos de ríos y en los órganos digestivos de animales rumiantes (de Lemos Chernicharo, 2007).

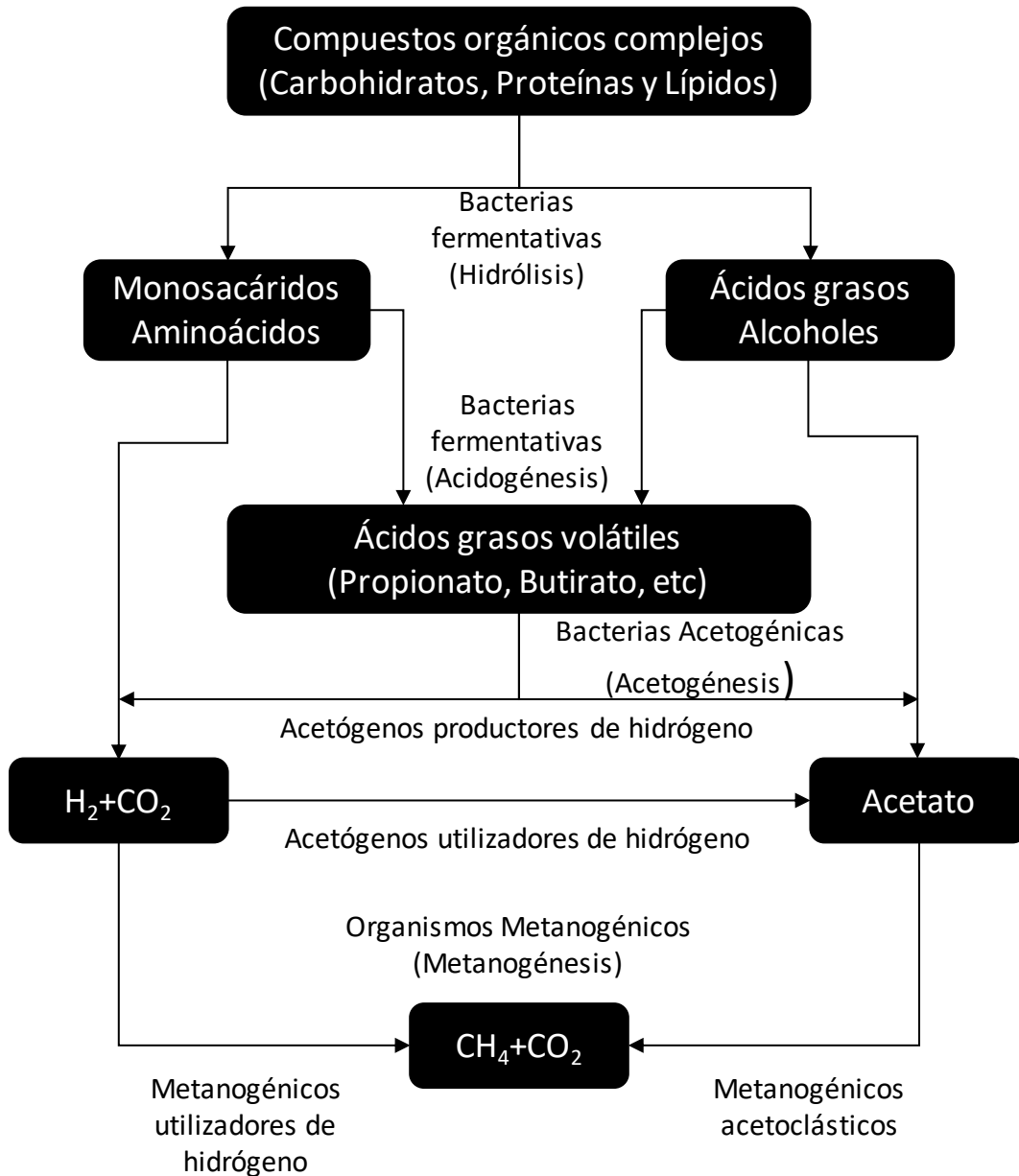
Diferentes tipos de biomasa pueden introducirse en los reactores anaerobios para producir biogás, por ejemplo, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, los residuos orgánicos industriales, residuos orgánicos gastronómicos, lodos de aguas residuales, residuos agrícolas y cultivos energéticos. El sustrato que se utilice como insumo para el reactor debe proveer de todos los componentes necesarios para llevar a cabo el proceso metabólico, es decir, C, N, O, H, S, P, K, Ca y Mg. El material no debe contener sustancias inhibitoras del proceso, como lo son, desinfectantes, antibióticos y metales pesados, entre otros. Las condiciones del proceso deben ser controladas y reguladas en todo momento ya que algunos de los productos de las etapas intermedias tienen efectos inhibitorios, por ejemplo,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , ácidos grasos volátiles y  $\text{H}_2$  principalmente (Kusch et al., 2011).

La digestión anaerobia es un ecosistema balanceado en donde diferentes poblaciones de microorganismos realizan funciones especializadas; suele ser considerada un proceso de 2 etapas. La primera etapa consiste en la conversión de compuestos orgánicos complejos, tales como, carbohidratos, proteínas y lípidos, en materia orgánica más simple, principalmente, ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono y gases de hidrógeno. El proceso se lleva a cabo por medio de hidrólisis y fermentación, y es realizado por bacterias anaerobias y facultativas. La segunda etapa consiste en la conversión de los ácidos orgánicos e hidrógeno, formados en la etapa anterior, en metano y dióxido de carbono. El proceso lo realiza un grupo de microorganismos Arquea metanogénicos, procariontes anaeróbicos.

Estos organismos metanogénicos tienen dos funciones principales. En primer lugar, permiten la formación de un gas insoluble, metano, que permite remover el carbono orgánico. Y en segundo lugar regulan la presión parcial de  $\text{H}_2$  en el medio para mantenerla

lo suficientemente baja para que los procesos fermentativos y acidogénicos puedan seguirse llevando a cabo. La tasa de crecimiento inherente a estos organismos metanogénicos por lo general marca un factor limitante en el proceso de digestión anaerobia (de Lemos Chernicharo, 2007).

Este proceso puede ser subdividido en varios caminos metabólicos en donde participan diferentes poblaciones de microorganismos con necesidades y comportamiento fisiológico particulares. En la figura 1.4 se ilustra mejor el proceso global.



**Figura 1.4** Bioquímica de la digestión anaerobia  
Referencia: (adaptado de Lettinga et al., 1996)



### 1.3.2 Bioquímica de la Cadena de Reacción Anaerobia

#### *-Hidrólisis y Acidogénesis*

La primera parte del proceso metanogénico es la hidrólisis de las partículas orgánicas complejas. La hidrólisis es la descomposición y disolución de partículas orgánicas por medio de la acción del agua. Es necesaria, ya que los microorganismos de las etapas posteriores en la cadena de reacción anaerobia son incapaces de asimilar materia orgánica compleja. Así, primero se rompen las cadenas de partículas complejas de materia orgánica, polímeros, en sus componentes de materia orgánica más simple, es decir, en moléculas de menor tamaño, o monómeros, para que éstas puedan penetrar en la membrana de las bacterias fermentativas. Esta descomposición se lleva a cabo por la acción de exoenzimas excretadas por bacterias fermentativas hidrolíticas (de Lemos Chernicharo, 2007).

La hidrólisis de polímeros se ve afectada por varios factores que agilizan o inhiben el grado en que el sustrato es hidrolizado (Lettinga et al., 1996):

- Temperatura de operación del reactor.
- Tiempo de residencia del sustrato en el reactor.
- Composición del sustrato (Proteínas, carbohidratos, lípidos, lignina).
- Tamaño de las partículas.
- Nivel de pH en el medio.
- Concentración de  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ .

Los acetatos e hidrógenos que se produzcan en estas primeras etapas pueden ser utilizados directamente por las arqueas metanogénicas, sin embargo, existen otros compuestos con cadenas aún demasiado grandes que necesitan un tratamiento posterior de catabolización en compuestos más sencillos para que puedan ser utilizados por los metanogénicos.

Acidogénesis es el proceso en el que dichos compuestos son catabolizados por bacterias fermentativas acidogénicas que producen los siguientes compuestos: Ácidos grasos volátiles, alcoholes, ácido láctico, amoníaco, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico, principalmente (Zupancic y Grilc, 2012).

#### *-Acetogénesis*

En esta tercera etapa, las bacterias acetogénicas son responsables de oxidar los productos generados en la fase acidogénica en un sustrato digerible para los microorganismos metanogénicos. Los productos que se generan en esta fase intermedia son: ácido acético (o sus sales), dióxido de carbono e hidrógeno. De todos los productos metabolizados por las bacterias acidogénicas, solo el hidrógeno y el acetato pueden ser utilizados directamente por los microorganismos metanogénicos. Sin embargo, por lo menos el 50% de la demanda química de oxígeno biodegradable es transformada en ácidos orgánicos, como el butírico y el propiónico. Estos ácidos son los que las bacterias acetogénicas convierten

posteriormente en acetato e hidrógeno en la tercera fase del proceso (De Lemus Chernicharo, 2007).

#### -*Metanogénesis*

Es la última fase del proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica. En esta fase arqueas metanogénicas se encargan de transformar los productos de las fases anteriores en metano y dióxido de carbono. Utilizan un grupo selecto de sustratos para subsistir, por ejemplo: ácido acético, dióxido de carbono, dióxido de hidrógeno, ácido fórmico, metanol, metilaminas y monóxido de carbono. Con base en el sustrato que utilizan y la producción de metano que tienen, las arqueas metanogénicas se subdividen en 2 categorías.

La primera categoría son los microorganismos que utilizan acetato como sustrato, metanogénicos acetoclásticos. Sólo un número reducido de especies metanogénicas son capaces de producir metano a partir de acetato, sin embargo, estos microorganismos son los predominantes en la digestión anaerobia ya que son responsables del 60-70% de la producción de metano (*Metanosaeta* y *Metanosarcina*).

La segunda categoría son aquellos microorganismos que utilizan hidrógeno y dióxido de carbono como sustrato, metanogénicos hidrogenotróficos. A diferencia de los acetoclásticos, la mayoría de las especies metanogénicas conocidas son hidrogenotróficas. Estas especies son muy importantes para mantener la cadena de digestión anaerobia, ya que consumen el hidrógeno disponible en el medio producido en las etapas anteriores. Consecuentemente se reduce la presión parcial de hidrógeno en el medio, y se regula el nivel de pH que había disminuido al producirse esa gran cantidad de hidrógeno. Las especies más comunes que se identifican en los reactores son *Metanobacterium*, *Metanospirillum*, *Metanobrevibacter*.

#### 1.3.3 Parámetros de la digestión anaerobia

Como en todo proceso biológico, se necesitan condiciones ambientales adecuadas para que el proceso de digestión anaerobia pueda desarrollarse de manera adecuada, ver tabla 1.7. Cada grupo de microorganismos tiene diferentes necesidades para subsistir y depende de ciertos parámetros que a continuación se enlistarán. Dichos parámetros son cruciales para el funcionamiento adecuado del reactor, por lo que tendrán que ser monitoreados y controlados en todo momento que el reactor este trabajando. Las condiciones ambientales que requieren las bacterias acidogénicas difieren de aquellas que necesitan las arqueas metanogénicas. El problema se presenta cuando se tiene un proceso de sólo una etapa, es decir, se utilizará sólo un reactor para todas las fases del proceso. Se tiende a dar prioridad en la práctica a las arqueas metanogénicas, ya que tienen un tiempo de regeneración más largo, una tasa de crecimiento menor y son más sensibles a cambios en las condiciones ambientales (Zupancic y Grilc, 2012).

**Tabla 1.7** Condiciones ambientales requeridas

| <b>Parámetro</b> | <b>Hidrólisis / Acidogénesis</b> | <b>Metanogénesis</b>                          |
|------------------|----------------------------------|---|
| Temperatura      | 25-35°C                          | Mesofílicos: 30-40°C<br>Termofílicos: 50-60°C |
| Nivel de pH      | 5.2-6.3                          | 6.7-7.5                                       |
| Razón C:N        | 10-45                            | 20-30   |
| Potencial Redox  | De +400 a -300 mV                | Menos de -250 mV                              |
| Razón C:N:P:S    | 500:15:5:3                       | 600:15:5:3                                    |
| Oligoelementos:  | Sin requerimientos adicionales   | Esenciales: Ni, Co, Mo, Se                    |

Referencia: (Deublein y Steinhauser, 2008)

Dependiendo de la calidad y la caracterización bioquímica del sustrato se presentarán microorganismos con diferentes necesidades ambientales. Por ejemplo se pueden hacer las siguientes recomendaciones generales:

- Si el sustrato es rico en celulosa, se degrada con una velocidad menor y la hidrólisis es la fase limitante. En ese caso se le debe dar preferencia a las condiciones que necesitan las bacterias que se encargan de esa fase.
- Si el sustrato es rico en proteína, todas las fases de digestión anaerobia comparten el mismo nivel de pH óptimo, por lo que se recomienda un proceso de una sola fase en un solo reactor.
- Si el sustrato es rico en grasas, la fase hidrolítica se acelera por una buena emulsificación, por lo tanto la fase acetogénica es la limitante. Se recomienda un proceso termofílico en donde los microorganismos acetogénicos se desarrollan mejor.

Otro factor importante a considerar para que el proceso funcione cíclicamente y no se inhiba, es la tasa de crecimiento de los microorganismos de cada etapa de la digestión anaerobia. El grupo de microorganismos que presente un crecimiento más lento será el grupo limitante en nuestro reactor. De la bibliografía se tienen los siguientes datos, ver tabla 1.8.

**Tabla 1.8** Tiempo de regeneración de microorganismos

| <b>Microorganismos</b> | <b>Tiempo de regeneración</b> |
|------------------------|-------------------------------|
| Bacterias Acidogénicas | Menos de 36 horas             |
| Bacterias Acetogénicas | 80 a 90 horas                 |
| Arquea Metanogénicas   | 5 a 16 días                   |

Referencia: (Zupancic y Grilc, 2012)

#### *-Definiciones*

**Digestor:** Es el contenedor en donde se lleva a cabo la digestión anaerobia.

**Sustrato:** Mezcla de agua y sólidos totales, TS. Los sólidos totales son aquellos que quedan después de una desecación de la biomasa a una temperatura de 103-105°C. A su vez los sólidos totales se dividen en materia inorgánica como metales, cristal, plásticos entre otros, y materia orgánica, SV, sólidos volátiles.

### *-Temperatura*

Generalmente se clasifica la temperatura en 3 rangos de operación conocidos: Criofílicos (15-20°C), Mesofílicos (30-40°C) con una temperatura óptima de 37°C y Termofílicos (50-60°C) con una temperatura óptima de 55°C (Mata-Álvarez, 2003) . Se ha estudiado como afecta la temperatura a la tasa de reacción en la digestión anaerobia y se ha encontrado que la tasa de reacción es directamente proporcional al incremento de temperatura. Esto se debe a que la tasa de crecimiento de las arquea metanogénicas es mayor mientras más alta sea la temperatura.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta en la temperatura es la posibilidad de mantener la temperatura escogida constante en nuestro reactor. Estudios han mostrado que en un rango termofílico seleccionado una variación de  $\pm 2^\circ\text{C}$  puede representar una disminución de hasta el 30% de producción de biogás. En el caso del rango mesofílico, las bacterias son menos sensibles a las variaciones de temperatura aceptando un rango de  $\pm 3^\circ\text{C}$  sin afectar la producción de metano (Zupancic y Jemec, 2010).

Para no provocar un cambio de temperatura al ingresar nueva FORSU al reactor es importante calentarla en la parte de pretratamiento. Y una vez dentro del reactor se utilizan unos calentadores para mantenerla en las condiciones ideales. La mayoría de las plantas con reactores anaerobios funcionan en el rango mesofílico porque representa una inversión menor en la energía a suministrar para alcanzar dichas temperaturas y un manejo más sencillo en la operación de la planta.

### *-Nivel de pH*

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno presentes en una determinada disolución. En la digestión anaerobia, el nivel de pH afecta en buena medida a la fase metanogénica del proceso, ya que las arquea metanogénicas son más sensibles a variaciones de este parámetro. El rango óptimo de nivel de pH para las bacterias acidogénicas está entre 6.5 y 7.5. En la operación regular de digestores anaerobios existen dos sistemas de amortiguamiento que permiten mantener los niveles de pH en el rango deseado. El primer sistema utiliza dióxido de carbono y carbonato de hidrógeno y el segundo utiliza amoníaco.

Los niveles de pH pueden alcanzar valores menores al rango óptimo rebasando estos sistemas de amortiguamiento por alguna de las siguientes razones: el suministro de un sustrato que se degrada muy rápidamente, es decir, que acidifique el medio rápidamente, la presencia de sustancias tóxicas, una disminución considerable en la temperatura y por último una carga de sustrato excesiva, dejando un tiempo de residencia del sustrato demasiado corto (Zupancic y Grilc, 2012).

Cuando en el reactor se tiene una población de microorganismos metanogénicos suficiente, y además se tienen las condiciones ambientales favorables para su desarrollo, estos se

encargan de utilizar los ácidos intermedios tan pronto como son formados. Consecuentemente los ácidos no se acumulan más allá de la capacidad amortiguadora de la alcalinidad del medio y el pH se mantiene en un rango deseable para los organismos metanogénicos, logrando un sistema anaerobio balanceado (de Lemus Chernicharo, 2007).

#### *-Potencial Redox:*

El potencial redox es una forma de medir la energía química de oxidación – reducción del medio, es decir se mide la actividad de los electrones. Se puede ver como un proceso paralelo a la medición de pH, en donde se mide la actividad del ión hidrógeno (un protón). Las reacciones redox se estandarizan con la reacción redox del hidrógeno,  $H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$ . El potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y negativo cuando se produce una reducción. Las reacciones de oxidación – reducción están ligadas a cambios en el nivel de pH del medio. Ya que la oxidación del agua acidifica el medio (produciendo iones hidrógeno  $H^+$ ), y la reducción basicifica el medio (generando iones hidróxido  $OH^-$ ).

En la digestión anaerobia se necesita un potencial redox muy bajo, las arqueas metanogénicas se desarrollan de manera óptima con un potencial redox de entre -300 mV a -330 mV. Es decir, necesitan que el medio tenga una gran capacidad reductora para ceder electrones y ser oxidado por las arqueas anaerobias metanogénicas que formarán el metano y dióxido de carbono. Para lograr este objetivo es importante no añadir agentes oxidantes al digestor como por ejemplo: oxígeno, nitrato, nitrato o sulfatos (Zupancic y Grilc, 2012).

#### *-Razón C:N e inhibición de Amoniac*

Para los microorganismos de la fase hidrolítica y acidogénica, la razón óptima de C:N comprende un rango de 10 – 45 :1, mientras que para los microorganismos de la fase metanogénica la razón comprende un rango de 20 – 30:1. Por ende la razón óptima de C:N en el sustrato debe estar en el rango 20-30:1. Una razón C:N mayor de 30:1 provocaría una disminución del crecimiento poblacional de los microorganismos metanogénicos, debido a una formación de proteínas menor, y por ende una menor cantidad de energía y material estructural disponible para el metabolismo de los microorganismos. De manera opuesta una razón C:N muy baja podría provocar una inhibición del proceso por una alta cantidad de amoniac (Zupancic y Grilc, 2012).

#### *-Carga orgánica*

La carga orgánica CO, u OLR por sus siglas en inglés (Organic Loading Rate), representa la cantidad de SV, sólidos volátiles a introducir en el reactor por unidad de tiempo y por unidad de volumen del reactor. Al incrementar la carga orgánica, se puede procesar una mayor cantidad de residuos e incrementar el rendimiento de producción de metano hasta cierto punto. Cuando la tasa de carga orgánica es demasiado alta, la fase de hidrólisis y acidogénesis se vuelven predominantes y el reactor acumula ácidos grasos. Esto trae como consecuencia la acidificación del digestor, en donde se reduce la tasa de crecimiento de las

arquea metanogénicas, que son las limitantes de este proceso. Para reactores continuamente mezclados el rango óptimo para la CO es de 4-8 kg SV/m<sup>3</sup>reactor por día, lo que resulta en una remoción de VS en el rango de 50-70% (Vandevivere et al., 2003). Sin embargo, para sistemas de digestión anaerobia sin mezclado continuo se recomienda una CO por debajo de 2 kgSV/m<sup>3</sup>reactor por día (Vögeli et al., 2014).

*-Tiempo de residencia hidráulico TRH*

Se denomina TRH al periodo en días u horas que el sustrato permanece en el reactor en contacto con la biomasa. El tiempo de residencia hidráulica es igual al volumen del reactor dividido por el caudal. Es una variable importante ya que establece el tiempo que tienen disponible los microorganismos para su crecimiento y la conversión de materia orgánica en biogás (Khanal, 2008).

*-Tiempo de residencia celular TRC*

El tiempo de retención celular (TRC), también llamado tiempo de residencia de sólidos (TRS), es un factor importante para la degradación de la materia orgánica, la producción de biogás, la estabilidad del digestor y la tolerancia a compuestos tóxicos o sobrecargas (Khanal, 2008 y Campuzano, 2015). Se define como el tiempo medio que el sustrato permanece en el digestor, y se determina al dividir la cantidad de microorganismos totales en el reactor entre la cantidad de microorganismos que salen del sistema por unidad de tiempo (Burke, 2001 y Campuzano, 2015).

Es el tiempo que se necesita para degradar la materia orgánica deseada en el reactor. El TRC óptimo varía principalmente por el tipo de sustrato a tratar, la CO y la temperatura. Estudios han corroborado que el TRC óptimo se encuentre dentro del rango de 10 a 40 días para obtener el mejor rendimiento de metano (Vögeli et al., 2014, Mata-Álvarez, 2003).

*-Tasa de crecimiento específico*

Para definir el tiempo de retención celular es importante conocer la tasa de crecimiento. El tiempo de retención celular tiene que ser suficiente para que las bacterias o arqueas que son parte del proceso de digestión anaerobia se alcancen a duplicar. Las bacterias acidogénicas tienen la tasa de crecimiento más alta, así que rápidamente, en cuestión de horas, duplican su población. Las arqueas acetoclásticas son las que son limitantes en el proceso de digestión anaerobia debido a que tienen la tasa de crecimiento más baja. Estas arqueas necesitan de varios días para poder duplicar su población. El tiempo de retención celular quedará definido por la tasa de crecimiento de este grupo de arqueas. A continuación se muestra una tabla-resumen con una recopilación bibliográfica de tasas de crecimiento máxima de los diferentes grupos de microorganismos presentes en la digestión anaerobia, ver tabla 1.9.

Se observa en la siguiente tabla de resumen como son los microorganismos arquea acetoclásticos los que tienen en promedio una tasa de crecimiento específica más pequeña, ya que necesitan de más tiempo de residencia celular para poder duplicar su población.

**Tabla 1.9** Resumen de TRC según la tasa de crecimiento máxima de los microorganismos

| Grupo            | TRC [días] | Referencias:                  |                              |
|------------------|------------|-------------------------------|------------------------------|
|                  |            | Revista consultada            | Fuente citada en publicación |
| Acidogénicas     | 2.5        | Sam-Soon, Wentzel, et al 1991 | Hill & Barth, 1977           |
| Acetogénicas     | 10         | STAMS et al 2012              | Mountfort y Bryant 1982      |
| Acetoclásticas   | 20.83      | Jabłon´ ski, Rodowicz 2015    | Mori et al 2012              |
|                  | 17.86      |                               | Patel & Sprott 1990          |
|                  | 13.89      |                               | Mori et al 2012              |
| Hidrogenotrófica | 4.17       |                               | Imachi et al 2008            |

#### 1.4 Características y uso del biogás generado

Biogás se refiere al gas producto de las unidades de digestión anaerobias, cuyo proceso de producción se vio en el subcapítulo anterior. Es un medio prometedor para solventar las necesidades de energía globales, y proveer beneficios ambientales, ver tabla 1.10.

##### 1.4.1 Beneficios ambientales del uso de biogás

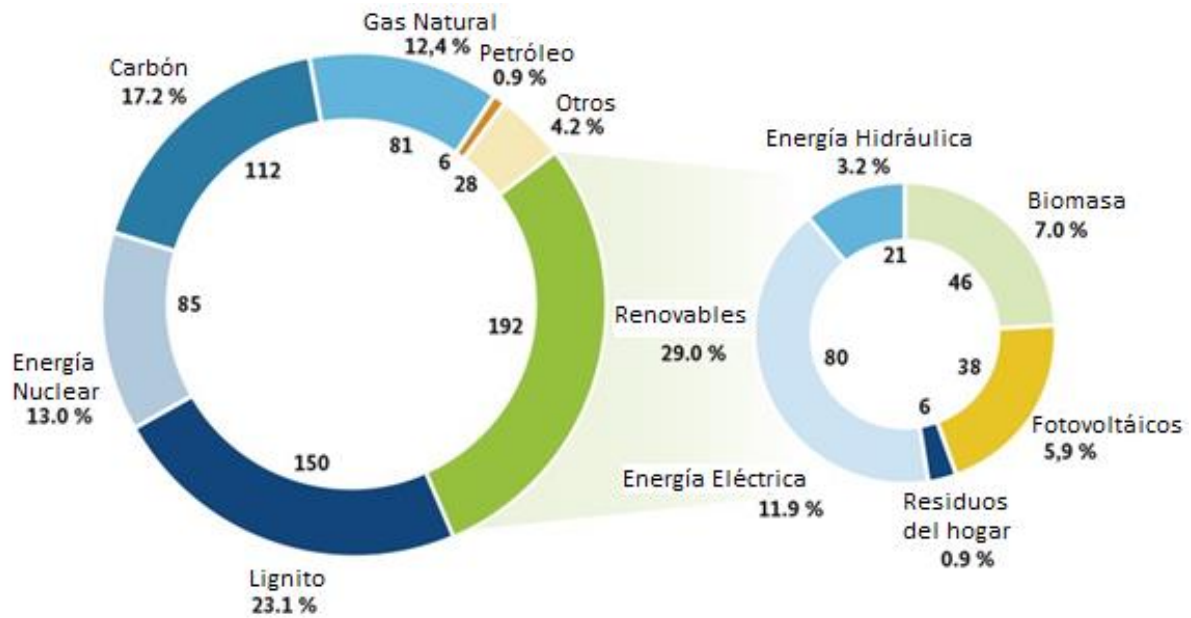
**Tabla 1.10** Análisis de los beneficios ambientales del uso de biogás

| Beneficio                         | Ejemplos  |
|-----------------------------------|---|
| Generación de energía verde       | Electricidad  |
|                                   | Calor   |
|                                   | Combustible vehicular   |
|                                   | Cogeneración, o electricidad y calor combinado.                         |
| Disposición de residuos orgánicos | Residuos agrícolas  |
|                                   | Residuos industriales   |
|                                   | FORSU   |
|                                   | Residuos del hogar  |
|                                   | Residuos de poda  |
| Protección ambiental              | Reducción de agentes patógenos  |
|                                   | Reducción de contaminación en atmósfera y agua                          |
|                                   | Reducción de eutrofización y acidificación.                             |
|                                   | Conservación de bosques y selvas.                                       |
|                                   | Sustituto a fertilizantes inorgánicos (Tambone et al., 2010)            |
| Reducción de gases invernadero    | Sustituto de fuentes convencionales de energía (Cuéllar y Webber, 2008) |

Referencia: (Chunlan Mao et al., 2015).

*-Ejemplo de beneficio ambiental del uso de biogás en Alemania*

Un ejemplo del uso de biogás en la generación de energía verde, es el caso de Alemania. De datos actuales del Ministro Federal de Asuntos Económicos y de Energía de Alemania, se tiene que en el 2016 la contribución de recursos renovables a la generación de energía eléctrica del país fue de 192 TWh, lo que equivale al 29% del total. De ese total, 52 TWh provienen de plantas de biogás de biomasa o residuos del hogar lo que equivale al 7% del total (BMW.de, 2017). Se puede apreciar mejor en la figura 1.5.



**Figura 1.5** Generación total de Energía en Alemania en 2016 en TWh  
Referencia: (BMW.de, 2017)

*-Ejemplo de beneficio de uso de biogás en Estados Unidos*

Un ejemplo del uso de biogás en la reducción de gases invernadero, es el estudio que hizo Cuéllar y Webber en la Universidad de Texas en Austin en el 2008. Se analizó el potencial de convertir los excrementos del ganado en una fuente renovable de energía doméstica que ayudaría a reducir la emisión de gases invernadero (GHG). Según datos del estudio, en Estados Unidos se producen más de un billón de toneladas de estiércol de ganado anualmente. La mayor parte se dispone en lagunas o se almacena al aire libre para que se degrade. Ambos métodos de disposición emiten a la atmósfera metano y óxido nitroso, dos gases invernadero con 21 y 310 veces el potencial de calentamiento global que el dióxido de carbono, respectivamente (Cuéllar y Webber, 2008).

Las 95 millones de unidades de ganado (definidas como 1000 libras de animal) en el país pueden producir aproximadamente 1 quad (293.07 TWh) de energía renovable al año, lo que equivaldría a 1% del total de consumo energético del país. Según el estudio, convertir ese biogás en electricidad utilizando microturbinas estándar podría generar  $88 \pm 20$  billones



de kWh, lo equivalente a  $2.4 \pm 0.6$  % del consumo total anual de electricidad en los E.U.A. Reemplazar las emisiones de gases invernadero del carbón y los excrementos por las emisiones que generaría este biogás produciría una reducción de potencial neto de emisiones de gases invernadero de  $99 \pm 59$  MMT, lo equivalente a  $3.9 \pm 2.3$  % de las emisiones totales anuales de gases invernadero en los E.U.A. (Cuéllar y Webber, 2008).

*-Ejemplo de beneficio de generación de digestato fertilizante*

El digestato producido en la digestión anaerobia también puede ser aprovechado y tener valor monetario en el sector agrícola, ya que puede sustituir los fertilizantes inorgánicos. Según un estudio realizado por la Universidad de los Estudios de Milán, en donde se compararon diferentes digestatos de plantas de digestión anaerobia con composta y otros sustratos fertilizantes, la digestión anaerobia produce un producto final o digestato con propiedades fertilizantes muy favorables. Tiene un alto contenido de nutrientes (N, P, K) en una composición disponible de fácil acceso a los cultivos. Volviéndolo, de esta manera, un candidato a sustituir los fertilizantes inorgánicos (Tambone et al., 2010).

1.4.2 Características del biogás

Para poder ser aprovechado como generador de electricidad, calor, o sustituto de combustible vehicular, el biogás tiene que pasar por diferentes etapas de post-tratamiento según sea el uso deseado a darle. El objetivo principal será la separación para poder obtener un gas con un contenido de metano más alto llamado biometano. Existen ya varias tecnologías diferentes, económicamente y técnicamente viables, para producir un flujo de biometano con la calidad y cantidad suficiente para ser utilizado como combustible vehicular o inyectado en la red de gas natural. La elección de la tecnología a utilizar depende de la cantidad y calidad de biogás crudo a ser mejorado, de la calidad de biometano esperada y el uso final de dicho gas.

El flujo de biogás crudo llega a la unidad de mejoramiento del biogás en donde se divide en dos flujos de gases diferentes. Uno será rico en contenido de metano y es el que se utilizará para propósitos de generación de energía eléctrica y calorífica, y otro que será rico en dióxido de carbono. Todo proceso de separación de biogás es imperfecto, por lo que este segundo flujo también tendrá aún contenido de metano. Dependiendo del país en donde se encuentre la planta, hay diferentes contenidos de metano admisibles para ventilación de ese gas a la atmósfera. De no cumplir con dicho parámetro de la norma tendrá que pasar por otro post-tratamiento.

*-Composición típica del biogás*

En la siguiente tabla se muestra la composición típica de biogás generado en una planta de digestión anaerobia, de gas generado en un relleno sanitario, y del gas presente en la red de gas natural, ver tabla 1.11.

**Tabla 1.11** Comparación de composiciones típicas de biogás, gas de R.S. y gas natural

| <b>Parámetro</b>                                 | <b>Biogás digestión anaerobia</b> | <b>Gas de relleno sanitario</b> | <b>Red de gas natural (Danesa)</b> | <b>Red de gas natural (Mexicana)</b> |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Metano [%vol.]                                   | 55-70                             | 35-65                           | 89                                 | ≥ 84                                 |
| Otros Hidrocarburos [%vol.]                      | 0                                 | 0                               | 9.4                                | ≤ 11.0                               |
| Hidrógeno [%vol.]                                | 0                                 | 0-3                             | 0                                  | 0                                    |
| Dióxido de carbono [%vol.]                       | 30-40                             | 15-50                           | 0.67                               | ≤ 3.0                                |
| Nitrógeno [%vol.]                                | ≤ 1                               | 5-40                            | 0.28                               | ≤ 4.0                                |
| Oxígeno [%vol.]                                  | ≤ 0.5                             | 0-5                             | 0                                  | ≤ 0.20                               |
| Ácido Sulfhídrico [ppm]                          | 0-4000                            | 0-100                           | 2.9                                | ≤ 4.31                               |
| Amoniaco [ppm]                                   | ≤ 100                             | ≤ 5                             | 0                                  | 0                                    |
| Poder Calorífico Inferior [kWh/m <sup>3*</sup> ] | 6.5                               | 4.4                             | 11.0                               | 10.36                                |

Referencias: (Universidad Tecnológica de Viena y NOM-001-SECRE-2010).

\* Condición Estándar: Un metro cúbico de gas natural en condiciones base equivale a 0.95137 metros cúbicos de gas en condiciones estándar.

Condiciones base: Presión absoluta = 98.07 kPa y Temperatura 293.15 K.

Condiciones estándar: Presión absoluta = 101.325 kPa y Temperatura 288.15 K.

*-Energía correspondiente*

La energía contenida en dicho biogás se cuantifica mediante el valor calorífico inferior o en inglés Low Heating Value (LHV) del metano. Se considera el biogás en condiciones estándar al igual que la tabla anterior.

$$LHV(CH_4) = 35.9 \text{ MJ/Nm}^3 \text{ (Pierre-Marie, 2017)}$$

$$LHV(CH_4) = 10 \text{ kWh/Nm}^3$$

Se sabe que la energía contenida en el biogás corresponde únicamente a la contenida en el metano. Es decir, 1 litro de biogás tendría la misma energía que 0.7 litros de metano, si el biogás tuviera una composición de 70% metano y 30% CO<sub>2</sub>. Dados los valores de la tabla 2.10, sobre el rango de contenido de metano en el biogás generado en la digestión anaerobia, se tendría el siguiente contenido de energía en el biogás.

$$5.5 \text{ kWh/Nm}^3 \leq LHV(\text{biogas}) \leq 7.0 \text{ kWh/Nm}^3$$

*-Potencial de metano*

Lo que más interesa de una planta de digestión anaerobia, es la energía eléctrica y térmica que se puede obtener a partir de la producción de biogás con alto contenido de metano, en la digestión de los sustratos. Ya se analizó la energía que se puede obtener del metano, en este punto se analizará el metano que se puede obtener de la digestión del sustrato. Ya se han hecho estudios alrededor del mundo sobre el metano en plantas de digestión anaerobia

que tratan diferentes tipos de sustratos, identificando así el potencial de metano de dichos sustratos. Los resultados se presentan a continuación, ver tabla 1.12.

**Tabla 1.12** Potenciales de metano según el tipo de sustrato

| Sustrato                               | Co-sustrato                               | Metano (Nm <sup>3</sup> /t SV) | Referencia                    |
|--|---|--------------------------------|-------------------------------|
| FORSU                                  | -   | 360                            | Vogt et al., 2002             |
| Residuos de fruta y vegetales          | -   | 420                            | Bouallagui et al., 2005       |
| FORSU                                  | -   | 530                            | Forster-Carneiro et al., 2007 |
| Residuos de fruta y vegetales          | Agua residual matadero                    | 850                            | Forster-Carneiro et al., 2007 |
| Estiércol de cerdo                     | -   | 337                            | Ahn et al., 2009              |
| FORSU                                  | -   | 200                            | Walker et al., 2009           |
| Lixiviado de residuos de comida        | -   | 294                            | Behera et al., 2010           |
| Paja de arroz                          | -   | 350                            | Lei et al., 2010              |
| Ensilado y paja de maíz                | -   | 312                            | Mumme et al., 2010            |
| Residuo de molino de aceite de jatropa | -   | 422                            | Chandra et al., 2011          |
| Residuo de molino de aceite de palma   | -   | 610                            | Fang et al., 2011             |
| Desechos domésticos                    | -   | 350                            | Ferrer et al., 2011           |
| Residuos orgánicos ricos en lignina    | -   | 200                            | Jayasingue et al., 2011       |
| Estiércol de cerdo                     | Agua residual de vinería                  | 348                            | Riano et al., 2011            |
| Residuos de comida                     | -   | 396                            | Zhang et al., 2011            |
| Estiércol de ganado                    | Residuos de molino de aceite de oliva     | 179                            | Goberna et al., 2010          |
| Estiércol de ganado                    | Cultivos energéticos y residuos agrícolas | 620                            | Cavinato et al., 2010         |
| Residuos de fruta y vegetales          | Agua residual matadero                    | 611                            | Bouallagui et al., 2009       |
| FORSU                                  | Ceniza                                    | 222                            | Lo et al., 2010               |
| FORSU                                  | Residuos grasos de PTAR                   | 350                            | Martin-Gonzalez et al., 2010  |
| Estiércol de cerdo                     | Residuos de pescado y bio-diesel          | 620                            | Álvarez et al., 2010          |
| Residuos de patatas                    | Residuos de remolacha azucarera           | 680                            | Parawira et al., 2004         |
| Lodo primario de PTAR                  | Residuos de fruta y vegetales             | 600                            | Gómez et al., 2006            |
| Lodo de drenaje                        | FORSU                                     | 532                            | Sosnowski et al., 2003        |
| Residuos de matadero                   | FORSU                                     | 500                            | Cuetos et al., 2008           |

Referencia: (Khalid, 2011)

### 1.4.3 Métodos de mejoramiento del biogás crudo

**Tabla 1.13** Resumen comparativo de diferentes tecnologías de mejoramiento del biogás

| <b>Parámetro</b>   | <b>Absorción con agua</b>          | <b>Absorción orgánica</b>        | <b>Absorción química</b>             | <b>PSA</b>      | <b>Tecnología membrana</b> |
|--|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------------------|
| Tamaño típico de la planta [m <sup>3</sup> /h biometano]       | 200-1200                           | 300-1500                         | 400-2000                             | 300-800         | 50-500                     |
| Contenido de metano en biometano [vol. %]                      | 95-99                              | 95-99                            | >99                                  | 95-99           | 95-99                      |
| Recuperación de metano [%]                                     | 98                                 | 96                               | 99.96                                | 98              | 80-99.5                    |
| Pérdida de metano [%]  | 2                                  | 4                                | 0.04                                 | 2               | 20-0.5                     |
| Presión típica de descarga [bar (g)]                           | 4-8                                | 4-8                              | 0                                    | 4-7             | 4-7                        |
| Demanda de energía eléctrica [kWhel/m <sup>3</sup> biometano ] | 0.46                               | 0.49-0.67                        | 0.27                                 | 0.46            | 0.25-0.43                  |
| Demanda de calor y nivel de temperatura                        | -                                  | Mediana 70-80°C                  | Alta 120-160°C                       | -               | -                          |
| Requiere remoción de ácido sulfhídrico                         | Depende proceso                    | Sí                               | Sí                                   | Sí              | Sí                         |
| Demanda de consumibles   | Agente antiincrustante y de secado | Solvente orgánico (No peligroso) | Solución amina (Peligrosa corrosiva) | Carbon activado | -                          |
| Rangos de carga parcial [%]                                    | 50-100                             | 50-100                           | 50-100                               | 85-115          | 50-105                     |
| Número de plantas de referencia                                | Alto                               | Bajo                             | Mediano                              | Alto            | Bajo                       |
| Costos de inversión [€/ (m <sup>3</sup> /h) biometano]         |                                    |                                  |                                      |                 |                            |
| Para 100 m <sup>3</sup> /h                                     | 10.100                             | 9.500                            | 9.500                                | 10.400          | 7.300-7.600                |
| Para 250 m <sup>3</sup> /h                                     | 5.500                              | 5.000                            | 5.000                                | 5.400           | 4.700-4.900                |
| Para 500 m <sup>3</sup> /h                                     | 3.500                              | 3.500                            | 3.500                                | 3.700           | 3.500-3.700                |
| Costos de operación [ct/m <sup>3</sup> biometano]              |                                    |                                  |                                      |                 |                            |
| Para 100 m <sup>3</sup> /h                                     | 14.0                               | 13.8                             | 14.4                                 | 12.8            | 10.8-15.8                  |
| Para 250 m <sup>3</sup> /h                                     | 10.3                               | 10.2                             | 12.0                                 | 10.1            | 7.7-11.6                   |
| Para 500 m <sup>3</sup> /h                                     | 9.1                                | 9.0                              | 11.2                                 | 9.2             | 6.5-10.1                   |

Referencia: (Universidad Tecnológica de Viena, 2012)

## 1.5 Reactores anaerobios para tratar FORSU

Las plantas de digestión anaerobia presentan muchas ventajas económicas y ambientales frente a los rellenos sanitarios. Ahora se describirán diferentes tecnologías para tratar la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) mediante digestión anaerobia, ya que, no hay un sistema óptimo. Durante los últimos años, se han estudiado e implementado diferentes tecnologías que utilizan la digestión anaerobia para degradar los residuos orgánicos, gracias a su bajo costo, bajo impacto ambiental, baja producción de lodo residual y a su recuperación de energía al utilizar el biogas que producen.

### 1.5.1 Clasificación de los sistemas anaerobios

Las tecnologías a analizar se dividen en dos tipos de procesos principalmente, seco y húmedo. En el caso del proceso seco, la biomasa que se introduce al digestor como sustrato, tiene una concentración de sólidos de más de 20%, mientras que en el proceso húmedo se maneja una concentración menor de 12% (Ranieri et al., 2018).

En cuanto a la continuidad del proceso, las tecnologías de digestión anaerobia también se clasifican en dos tipos, proceso continuo o proceso por lotes (batch system). En el sistema por lotes, se le suministra al reactor una cantidad definida de sustrato de biomasa por un periodo predeterminado, durante el cual se produce la digestión de los residuos y la producción de biogas. Al final de dicho periodo, el reactor se vacía y el proceso vuelve a comenzar con un nuevo sustrato de FORSU. En el proceso continuo, la biomasa se alimenta al reactor de manera continua y al mismo tiempo se descarga del reactor parte del efluente. Todos los procesos húmedos son continuos, mientras que los procesos secos pueden ser continuos o por lotes.

Otra clasificación que se tiene de los procesos, es la cantidad de etapas en donde se hace la digestión. En los digestores de una etapa, todas las reacciones bioquímicas tienen lugar en un solo reactor. Mientras que en los digestores de dos etapas, se tiene un fermentador para las reacciones de las fases hidrolíticas y acidogénicas, y otro para la fase acetogénica y metanogénicas. Se adopta esta configuración, cuando dadas las características del sustrato, se conoce que se van a necesitar condiciones ambientales diferentes para las dos fases del proceso bioquímico de la digestión anaerobia (Ranieri et al., 2018).

### 1.5.2 Características generales del proceso húmedo

Las plantas de digestión anaerobia húmeda son más comunes en tratamiento de residuos agrícolas, dado que usualmente sus residuos se encuentran en forma de lodos. La característica principal de este tipo de digestores anaerobios es, que se encargan de tratar residuos con un contenido de sólidos TS de menos del 12%, en algunas fuentes bibliográficas, se habla de hasta un 15%, pero nunca mayor a esa razón. Para alcanzar dicha proporción, en algunos casos, es imprescindible diluir los residuos que llegan a la planta con agua nueva o de recirculación de la planta. El sistema más común para llevar a cabo un proceso húmedo es el de un Tanque Reactor Completamente Mezclado, o CSTR por sus

siglas en inglés, Completely Stirred Tank Reactor, ver figuras 1.6 y 1.7. La primera planta de tratamiento de residuos orgánicos a nivel industrial, que trabaja bajo este sistema, se construyó en la ciudad de Waasa, en Finlandia, en el año 1989 (Mata-Álvarez, 2003).

Primero en una mezcladora con sinfines o tornillos verticales, o en una tolva se trituran, se mezclan, se homogenizan y se diluyen con agua los residuos que serán el sustrato. Posteriormente, el lodo de sustrato obtenido pasa por un proceso de digestión en un reactor completo y mixto, en donde los sólidos se mantienen en suspensión por medio de impulsores rotatorios verticales.

Hay aspectos técnicos importantes a considerar para garantizar el correcto funcionamiento del proceso. Primero para obtener el sustrato adecuado a meter en el reactor, ya sea si dicho sustrato sea separado mecánicamente, o desde la fuente, se necesita un pretratamiento complicado. Éste es indispensable para evitar el daño a las instalaciones de tuberías y bombeo, y evitar el paso de contaminantes contenidos en los residuos que llegan a la planta. Según sean las características de la FORSU, consiste en cribas, despulpadores, cribas de tambor, trituradores, prensas y unidades de flotación, ver figura 1.8. Estas etapas de pretratamiento resultan en un 15 a 25 % de reducción de sólidos volátiles, lo que se traduce en una disminución proporcional en la producción de biogas (Farnetti et al., 1999).

Otro aspecto importante a considerar es, que aunque el tanque se considera completamente mezclado, el sustrato lodoso no tiene una consistencia uniforme siempre. Suceden dos cosas, las fracciones más densas y pesadas tienden a irse al fondo, mientras que en la superficie, se forma una nata que dificulta el mezclado del sustrato. Así, se deben prever mecanismos para extraer del reactor estas dos fases extras que pueden impedir el correcto funcionamiento de la planta.

Por último, otro problema frecuente, es lo que se conoce en inglés como short-circuiting, o corto circuito hidráulico. En donde se deja pasar en el sustrato, una fracción de residuos que tiene un periodo de retención más corto que el resto del sustrato. Esto resulta en un menor rendimiento en la producción de biogás, y en una inhibición de la higienización de los residuos. Es decir, en una disminución del exterminio de microorganismos patógenos, ya que dicho exterminio requiere de un mínimo tiempo de retención en el reactor (G. Lissens et al., 2001).

A continuación se muestran dos esquemas comunes de CSTR.

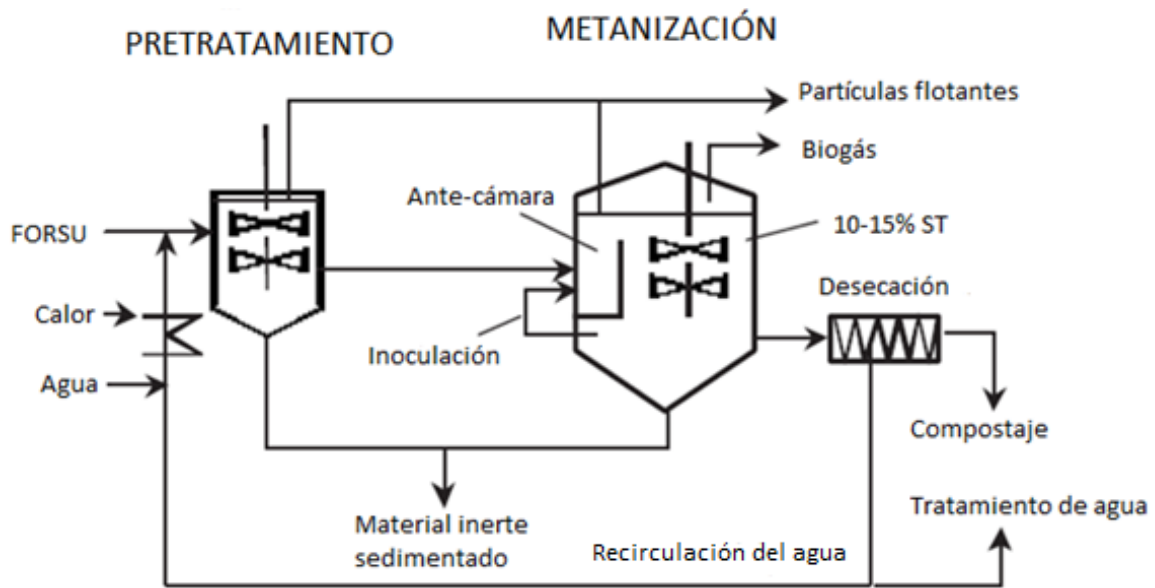
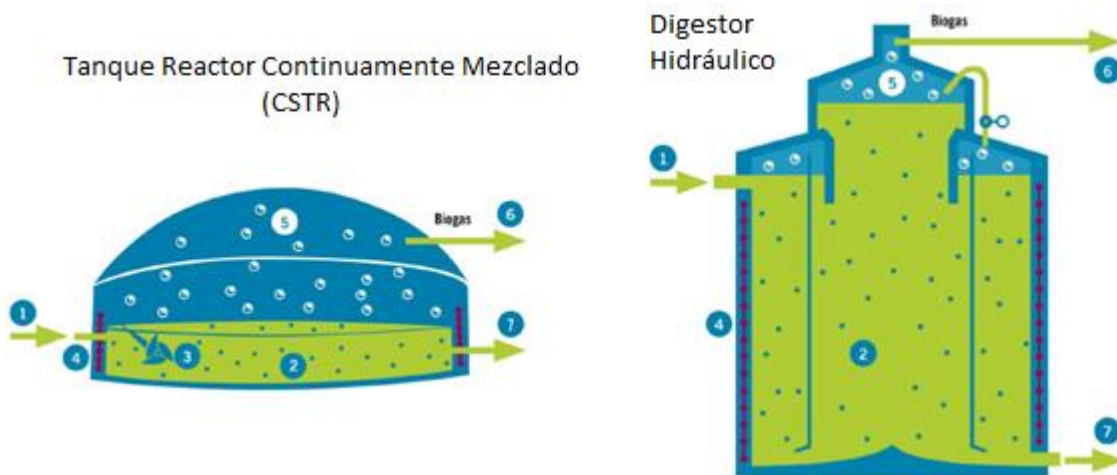


Figura 1.6 Esquema común de sistema húmedo de una etapa  
Referencia: (G. Lissens et al., 2001)



- 1.- Sustrato, 2.- Biomasa, 3.- Agitador, 4.- Sistema de calefacción, 5.- Almacén de biogás,  
6.- Uso de biogás, 7.- Digestato resultante.

Figura 1.7 Esquema de Tanque Reactor Continuamente Mezclado CSTR  
Referencia: (de Strippel, 2016)

Ahora se muestra un esquema que incluye los posibles procesos de pre-tratamiento y post-tratamiento, ver figura 1.8.

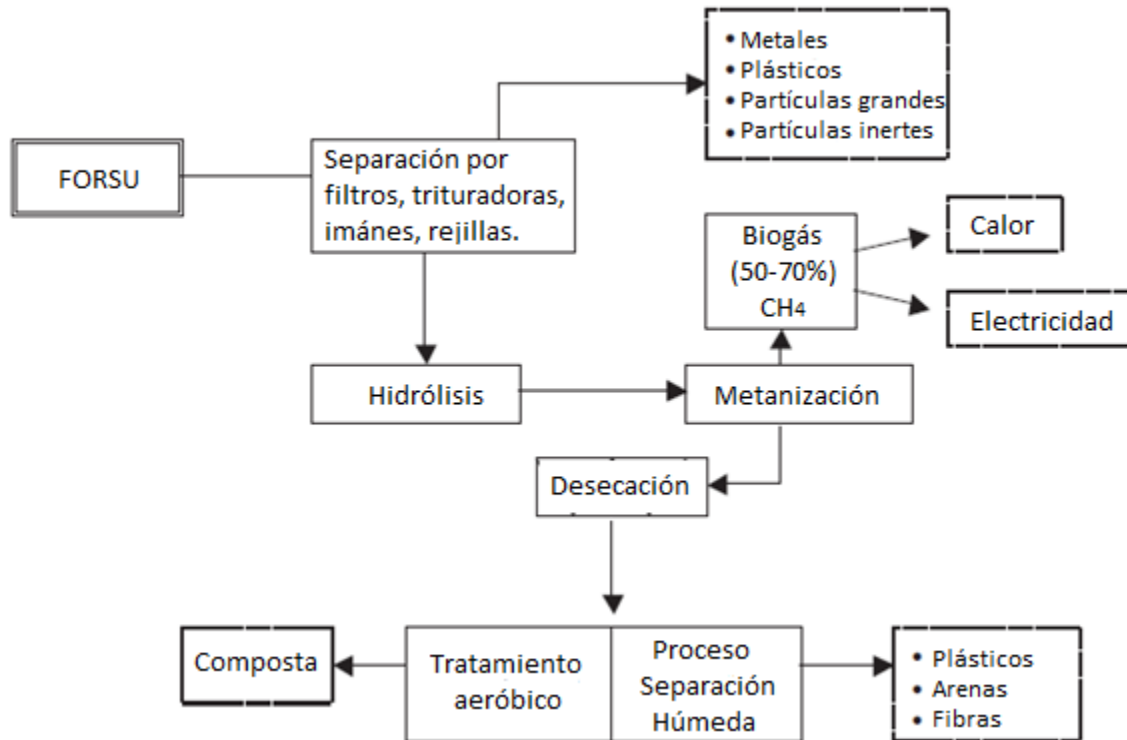


Figura 1.8 Esquema incluyendo pre-tratamiento y post-tratamiento  
Referencia: (G. Lissens et al., 2001)

### 1.5.3 Características generales del proceso seco

Desde los ochenta y los noventa, el proceso seco se ha estudiado ampliamente y se ha comprobado que el rendimiento en la producción de biogás es igual o mayor si los residuos se mantienen con un alto contenido de sólidos, que si estos son diluidos en agua (Oleszkiewics y Poggi-Varaldo, 1997). El reto que se presenta al tratar con fluidos tan viscosos con alto contenido de sólidos es el manejo, mezclado y bombeo del fluido espeso.

El transporte de los residuos dentro de la planta se puede hacer mediante bandas transportadoras y poderosas bombas que están diseñadas para cargar con fluidos con una viscosidad alta. Este equipo representa una inversión mayor a aquel necesario para transportar residuos más líquidos. Sin embargo, este equipo es más resistente y flexible a admitir residuos con variación en la concentración de sólidos totales, desde ST% 20 a 50%. Los sólidos totales son aquellos que quedan después de una desecación de la biomasa a una temperatura de 103-105°C. Así, se simplifica en gran medida el pretratamiento necesario, en comparación al correspondiente del proceso húmedo (G. Lissens et al., 2001).

Otro aspecto importante a analizar al comparar estos dos procesos, es el rendimiento en la producción de biogás. Se espera un mayor rendimiento en el proceso seco, ya que no se



destruyen las sustancias volátiles biodegradables en el pretratamiento. La bibliografía dice que se trata de un porcentaje de alrededor de 10% más de SV en tecnología de proceso seco (De Baere, 2000, G Lissens et al., 2001).

Las diferencias económicas, considerando inversión inicial y costos de operación de ambas tecnologías, son pequeñas. La mayor inversión inicial que representa la compra de bombas especiales, bandas transportadoras, y demás elementos necesarios en el proceso seco para mezclar y transportar el sustrato viscoso, se compensa con un pretratamiento más barato y sencillo, así como, con un reactor de mucho menor volumen (G. Lissens et al., 2001).

El proceso seco se subdivide en dos principales vertientes según la continuidad del mismo, por lotes y continuo. Posteriormente se describirán a fondo ambos procesos. Ahora sólo se presentarán las ventajas y desventajas que estos comparten frente a los procesos húmedos, mismas que se relacionan principalmente al pretratamiento necesario y a la operación del reactor con un contenido de sólidos diferente al del proceso húmedo, ver tabla 1.14.

*-Ventajas y desventajas del proceso seco*

**Tabla 1.14** Ventajas y desventajas del proceso seco

| <b>Criterio</b>       | <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>   |
|-----------------------|---|--|
| Técnico               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• No necesitan mecanismos mezcladores dentro del reactor.</li> <li>• Robustez, es decir, resistencia a plásticos y materiales inertes.</li> <li>• No se presenta el problema de short-circuiting hidráulico.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Residuos con bajo contenido de sólidos (&lt;20% ST) no se pueden tratar solos.</li> </ul>                             |
| Biológico             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida reducida de materia orgánica biodegradable en el pretratamiento.</li> <li>• Posibilidad de tratar un alto contenido de sólidos orgánicos. Alta carga orgánica.</li> <li>• Dispersión reducida de concentraciones pico transitorias de sustancias tóxicas o inhibidoras. (Creación de nichos en donde las bacterias se aíslan de dichas sustancias.)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilidad mínima de diluir sustancias tóxicas, o inhibidoras con agua.</li> </ul>                                   |
| Económico y ambiental | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pretratamiento más sencillo, de menor tamaño y costo.</li> <li>• Reactores de menor volumen.</li> <li>• Uso reducido de agua para el proceso.</li> <li>• Requerimiento de calor reducido al tener un volumen reducido.</li> <li>• Completa higienización de residuos.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión inicial más fuerte en equipo robusto y especializado para bombear y mezclar fluidos tan espesos.</li> </ul> |

Referencia: (Mata-Alvarez, 2003)

Para residuos con un alto contenido de sólidos, >20% ST, la bibliografía dice que es recomendable emplear un proceso seco, en vez de diluir el sustrato con agua y tratarlo en un proceso húmedo. Es verdad que se necesita una inversión inicial más fuerte en un equipo especializado para manejar ese fluido viscoso, sin embargo, este gasto se ve compensado por un pretratamiento más sencillo y un reactor de dimensiones menores. En cuanto a costos de operación se refiere, se disminuye la cantidad de agua a utilizar y a disponer en el proceso, al igual que se disminuye la energía requerida en el calentamiento del reactor.

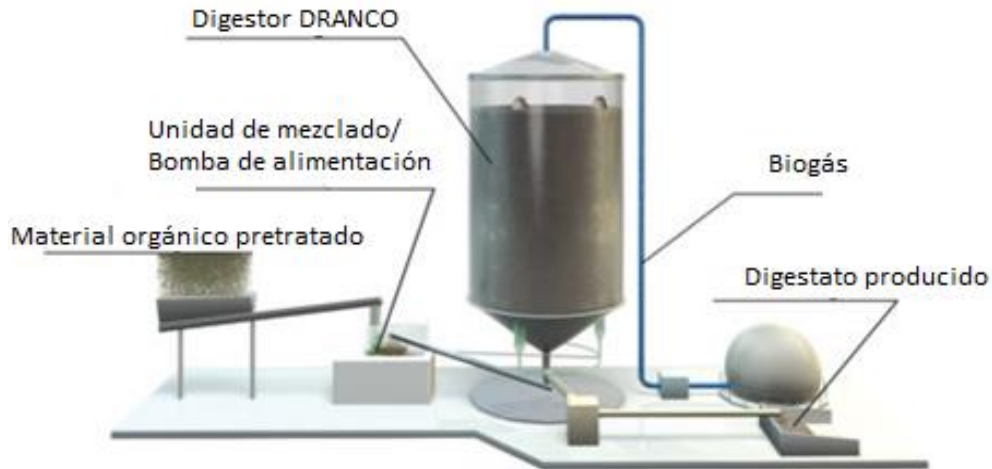
Dadas las ventajas presentadas anteriormente, es imprescindible describir a detalle el funcionamiento de los tipos de reactores de proceso seco más comunes en el mundo. El primero representa a los procesos secos semicontinuos, ya que de esa clasificación es la tecnología más utilizada, se refiere a la tecnología Dranco. El segundo representa a la clasificación de los procesos secos discontinuos o por lotes, o Batch en inglés.

#### 1.5.4 Características generales de la tecnología semicontinua

La tecnología semicontinua se desarrolló a partir del estudio y optimización de la digestión seca anaerobia y espontánea que se presenta en los rellenos sanitarios. Los residuos sólidos urbanos o municipales que se depositan en un relleno sanitario contienen una cantidad considerable de materia orgánica biodegradable. Lo que sucede en los rellenos sanitarios, es que primero esa materia se degrada por la acción de bacterias aerobias, ya que hay oxígeno presente. Esto provoca que se acidifique el relleno sanitario y se caliente. Sin embargo, conforme pasa el tiempo, en un periodo de semanas o meses, dependiendo de las características del relleno, el oxígeno termina por ser consumido en su totalidad y la digestión anaerobia comienza.

Las bacterias anaerobias toman el lugar de las bacterias aerobias y empiezan a degradar los residuos, con una concentración alta de sólidos (50% o más). En esta etapa ya hay producción de biogás. La digestión anaerobia dentro de un relleno sanitario ocurre de manera muy lenta y bajo condiciones que no están reguladas o controladas, así, la producción de biogás es muy baja y puede durar de 20 a 50 años, según sea la humedad en el reactor.

La tecnología semicontinua es la optimización de los parámetros de digestión seca y estática presente en los rellenos sanitarios. Conforme se fueron realizando diferentes estudios se fue reduciendo el periodo de duración del proceso de digestión. Primero se redujo a un periodo de 2 a 5 años, después se consiguió reducirlo a 6 meses, posteriormente a 3 meses, y por último, implementando un proceso semicontinuo, logró reducirse el periodo de digestión a 2 o 3 semanas. Fue necesario el diseño de un reactor que pudiera tratar residuos con alto contenido de sólidos <40% ST de manera continua, el resultado ha sido la tecnología semicontinua, como por ejemplo la compañía Dranco, ver figura 1.9 para entender su esquema general.

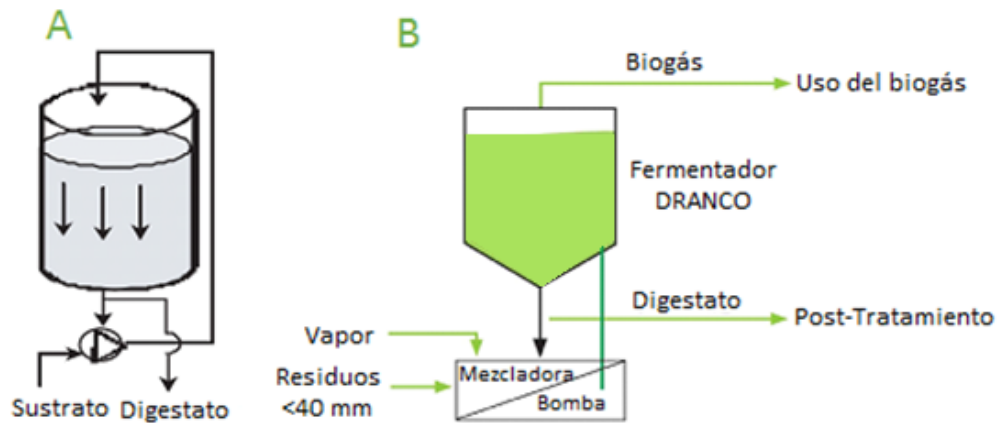


**Figura 1.9** Esquema general de digestor con tecnología Dranco.

Referencia: OWS, consultado en: [http://www.ows.be/household\\_waste/dranco/](http://www.ows.be/household_waste/dranco/)

*-Esquema de digestión básico semicontinuo (Dranco) (De Baere, 2010)*

1. En el pretratamiento, la fracción orgánica debe reducirse, en tamaño, a partículas de menos de 40 mm de grosor. Lo que significa filtrar por medio de mallas, rejillas o algún otro mecanismo, plásticos y textiles comunes en los residuos sólidos urbanos. Si no es por medio de filtración, entonces se utiliza una trituradora para reducir las partículas a ese tamaño. En un intento por aprovechar al máximo los recursos que generamos, se podría recuperar los metales para reciclaje. Para obtener un sustrato que nos dé un rendimiento mayor en la producción de biogás, se tiene que eliminar lo más posible piedras, vidrios y plásticos duros. El proceso semicontinuo (Dranco), según la bibliografía, es más flexible y resistente a concentraciones altas de contaminantes y material no degradable. Sin embargo, la remoción de los mismos nos ayudaría a evitar la abrasión de diferentes partes mecánicas del proceso y consumir menos energía.
2. En la siguiente etapa del proceso, la fracción orgánica pretratada, de un tamaño menor a 40 mm, se mezcla con una porción considerable de digestato proveniente del digestor. La razón de mezcla por lo general es de 1 tonelada de FORSU fresca por 6 a 8 toneladas de digestato para inocular. Esta mezcla se realiza en la cámara de mezclado de la bomba de alimentación del reactor. A esta mezcla se le calienta, por medio de vapor, para que entre con una temperatura muy cercana a aquella presente en el reactor, que es la propicia para las bacterias que realizan la digestión. En el caso de una operación mesofílica, la temperatura se encuentra en un rango entre 35-40°C, mientras que en un proceso termofílico, entre 50-55°C (De Baere, 2010). Ver figura 1.10.



**Figura 1.10** Esquemas básicos de operación de un digestor Dranco.  
Referencias: (A de G. Lissens et al., 2001, B de De Baere, 2010)

3. La mezcla calentada de FORSU y digestato se bombea por dentro del reactor a la parte superior del mismo, a través de unas tuberías de alimentación, ver figura 1.11. Estas tuberías llegan a la parte superior y alcanzan hasta 1 m de distancia por debajo del techo del reactor, así, el material es empujado hasta depositarse encima de la masa a digerir en el reactor. Las tuberías de alimentación tienen un diámetro de por lo menos 1 m para minimizar la fricción y disminuir gastos energéticos durante el bombeado. Las tuberías corren por dentro del reactor para disminuir la distancia que la mezcla tiene que recorrer y bajar la energía a consumir en el bombeado (De Baere, 2010).
4. Una vez que el material entra al reactor, le toma de 2 a 4 días, dependiendo de la tasa de alimentación al reactor, llegar a la parte inferior de éste. La masa desciende a través del reactor por acción de la fuerza de gravedad únicamente. No se necesita ningún equipo de mezclado ni de inyección de gas en la parte interior del reactor, a diferencia de otros procesos secos continuos, como por ejemplo Kompogas, o Valorga. El biogás generado asciende por el reactor hasta que sale del digestor por una tubería que lo conduce a la cámara de almacén de biogás, de donde se extraerá, según se necesite, para ser aprovechado como generador de energía y calor, o recibirá otro tratamiento para introducirse a la red de gas natural (De Baere, 2010).
5. El digestato producido (sustrato no biodegradable, más organismos, más agua) se extrae del reactor por medio de unos sinfines colocados en la parte inferior del cono de extracción. La mayor parte de dicho digestato se recicla en el proceso y se manda por medio de otros sinfines a la parte de mezclado de la bomba de alimentación para unirse a una nueva ración de FORSU seca y recomenzar el ciclo. La otra parte se desvía para ser tratada posteriormente para generar una composta muy rica en nutrientes. El tiempo de residencia promedio en el digestor es de 20 días, en donde cada 2 o 4 días se recorre el digestor completamente (De Baere, 2010).

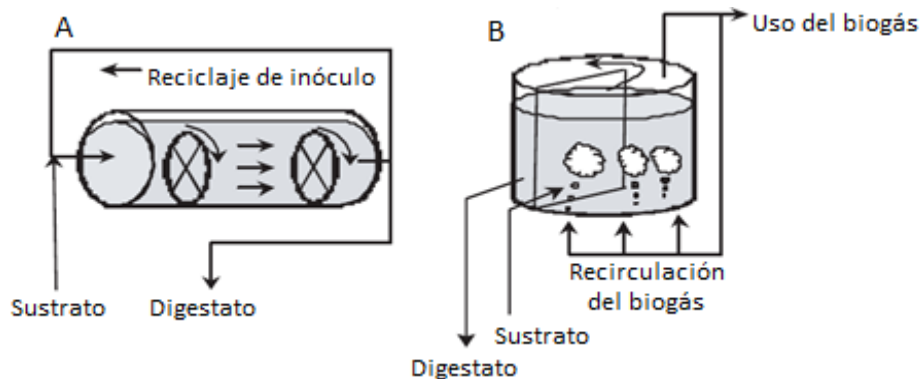


**Figura 1.11** Vista de las tuberías de alimentación interna de un digester Dranco.  
Referencia: (De Baere, 2010).

*-Ventajas de la tecnología semicontinua (Dranco) (De Baere, 2010)*

1. Digestión seca de alta tasa:

Este proceso puede recibir residuos con concentraciones de sólidos totales de hasta 50% y producir digestatos con concentraciones de hasta 40%. Estas concentraciones tan altas de sólidos en los parámetros de operación son posibles debido a que la masa descende verticalmente en el reactor por acción de la gravedad. En otras tecnologías de proceso seco, en donde la masa se mueve horizontalmente, por ejemplo, Valorga y Kompogas, se necesita que el fluido sea menos espeso y por ende, no pueden aceptar sustratos con una concentración de sólidos tan alta, aceptan concentraciones de por lo menos un 10% menor a esta tecnología, ver figura 1.12.



**Figura 1.12** Esquema de operación de tecnologías secas continuas A-Kompogas y B-Valorga  
Referencia: (G. Lissens et al., 2001).

Otra ventaja de tratar con el fluido verticalmente es, que no se necesitan mezcladores o inyecciones de gas para facilitar su movimiento. Por lo tanto, durante la operación y mantenimiento, no se presentan problemas con estos equipos, comunes en otras tecnologías.

Una ventaja importante de tratar con una concentración tan alta de sólidos, es el mayor rendimiento en la producción de biogás. En plantas a escala industrial, se puede mantener un rendimiento de 10 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> activo de volumen de reactor por día en promedio anual. Esto nos indica que se puede reducir el volumen y número de reactores.

Según Baere de OWS, un solo digestor de 3150 m<sup>3</sup> de volumen total, puede tratar 50 000 toneladas de residuos orgánicos al año, generando 7.4 millones de m<sup>3</sup> de biogás con un 55% del contenido siendo metano. Si se convierte todo ese biogás en energía eléctrica por medio de motores de combustión interna se generarán de 9 a 10 millones de kWh por año (De Baere, 2010).

2. Una sola fase relativamente homogénea en todo el reactor:  
Si se opera el digestor con un contenido de sólidos totales suficiente se puede evitar el problema de la creación de las tres capas diferentes, visto en el proceso húmedo. Al ser tan concentrado y espeso el fluido dentro del reactor, las partículas más pesadas contenidas en los residuos no pueden sedimentarse al fondo, ni tampoco pueden las partículas menos densas como la madera o poliestireno (unicel) ascender a la superficie y flotar. Se pueden manejar muy bien en el reactor partículas de menos de 40 mm.
3. Requerimiento mínimo de calor:  
La temperatura dentro del reactor se mantiene al inyectar vapor caliente a la mezcla justo antes de bombearla al digestor. Se mantiene baja la energía consumida para mantener la temperatura necesaria, ya que solo la parte nueva de FORSU necesita calentarse. La concentración alta de sólidos evita que la temperatura se pierda por convección. Dentro del reactor las mismas reacciones de digestión anaerobia generan un aumento de temperatura que ayuda a que este no se enfríe, tampoco hay peligro de sobre calentamiento porque la temperatura que eleva la reacción anaerobia se mantiene en un rango medible de  $\pm 2$  grados.
4. Operación termofílica:  
Se puede operar fácilmente en un rango termofílico dado el poco requerimiento de energía necesario para calentarse. La operación termofílica da un rendimiento mayor de producción de biogás por m<sup>3</sup> de residuos orgánicos tratado. Un valor agregado de trabajar bajo esas temperaturas tan altas es que los microorganismos patógenos para el ser humano son exterminados en esas condiciones, mejorando la higienización de los residuos.

-Ejemplos de plantas en operación sistema semicontinuo

**Tabla 1.15** Ejemplos de plantas en operación con tecnología semicontinua (Dranco)

| <b>Ubicación:</b>              | <b>Capacidad de la planta [ton/año]: Capacidad de digestión:</b> | <b>Tipo de residuos:</b>          | <b>Volumen de reactor [m³]:</b> | <b>Fecha de inicio:</b> |
|--------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Brecht, Bélgica                | Brecht I: 20 000<br>Brecht II 50 000                             | Bioresiduos* y residuos de papel. | Brecht I 800<br>Brecht II 3 150 | 1992                    |
| Bergheim-Siggerwiesen, Austria | 20 000   | Bioresiduos                       | 1 800                           | 1993                    |
| Bassum, Alemania               | 105 000<br>13 500  | FORSU                             | 1 200                           | 1997                    |
| Aarberg, Suiza                 | 11 000   | FORSU                             | 1 500                           | 1998                    |
| Kaiserslauten, Alemania        | 25 000<br>20 000   | FORSU                             | 1 500                           | 1999                    |
| Villeneuve, Suiza              | 10 000   | Bioresiduos                       | 940                             | 1999                    |
| Roma, Italia                   | 40 000   | FORSU                             | 3 200                           | 2003                    |
| Leonberg, Alemania             | 30 000   | Bioresiduos                       | 2 440                           | 2004                    |
| Hille, Alemania                | 100 000<br>38 000  | FORSU y Lodo seco                 | 2 260                           | 2005                    |
| Münster, Alemania              | 80 000<br>24 000   | FORSU y residuos industriales     | 1 640                           | 2005                    |
| Terrassa, España               | 25 000   | Bioresiduos                       | 1 626                           | 2006                    |
| Vitoria España                 | 120 000<br>20 000  | FORSU                             | 1 770                           | 2006                    |
| Alicante, España               | 180 000<br>30 000  | FORSU                             | 2 650                           | 2008                    |
| Kempton, Alemania              | 18 000   | Bioresiduos y residuos verdes     | 1 200                           | 2009                    |
| Tenneville, Bélgica            | 39 000   | Bioresiduos                       | 3 150                           | 2009                    |
| Leszno, Polonia                | 50 000<br>26 000   | FORSU                             | 1 990                           | 2010                    |
| Hengelo, Países Bajos          | 50 000   | Bioresiduos                       | 3 450                           | 2011                    |
| Wijster, Países Bajos          | 57 000   | FORSU                             | 3 960                           | 2012                    |
| Mirandela, Portugal            | 55 000<br>10 000   | FORSU                             | 750                             | 2013                    |
| Wijster II, Países Bajos       | 40 000   | Bioresiduos                       | 2 630                           | 2013                    |
| Chagny, Francia                | 73 000<br>35 000   | FORSU y residuos de poda          | 2 x 1 450                       | 2015                    |
| Bourg-en-Bresse, Francia       | 66 000 + 7500<br>40 000  | FORSU y Residuos de poda          |                                 | 2016                    |
| North Yorkshire, UK            | 320 000<br>40 000  | FORSU                             | 3 150                           | 2017                    |
| Beerse, Bélgica                | 35 000<br>35 000   | Bioresiduos                       | 2 775                           | 2018                    |

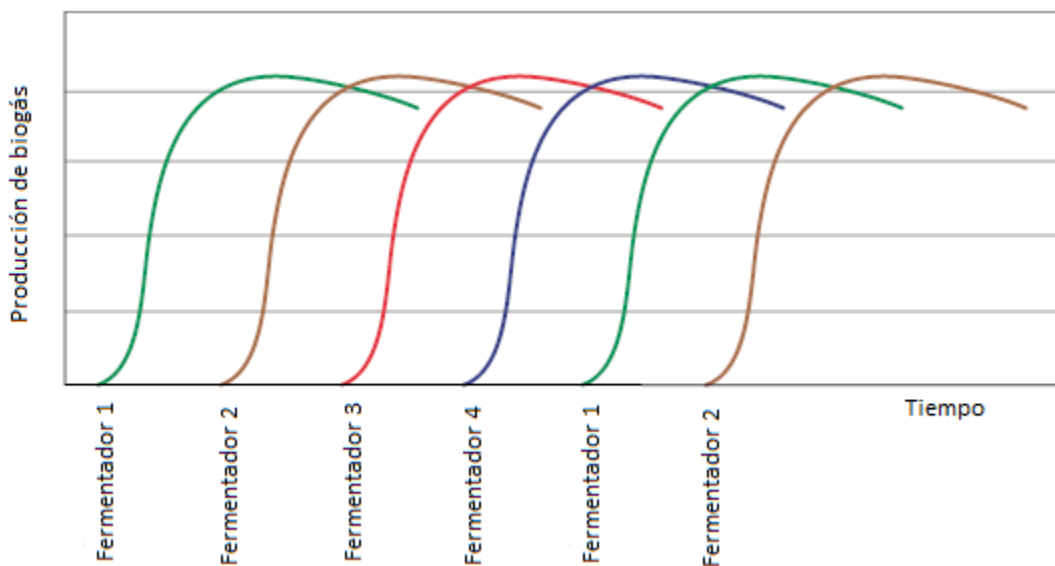
\*Bioresiduos se refiere a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos separada en la fuente.  
Referencias: <http://www.ows.be/biogas-plants/references/?dranco=ref-householdwaste-dranco>

### 1.5.5 Características generales de la tecnología por lotes

La tecnología de garaje o por lotes es una tecnología de digestión anaerobia seca discontinua que se desarrolló, al igual que la tecnología semicontinua o Dranco, analizada previamente, a partir del estudio y optimización de la digestión seca anaerobia y espontánea que se presenta en los rellenos sanitarios. En esta tecnología por lotes, el concepto esencial es que los digestores o garajes se llenan una vez con sustrato orgánico, con o sin adición de inóculo, material obtenido de una fermentación previa, y se permite que este pase por todas las etapas de degradación en estado seco, es decir, con un porcentaje de sólidos totales ST entre 30-40%, y en un tiempo definido (Mata-Alvarez, 2003). Ver figura 1.14.

Como se deja inalterada la biomasa durante todas las etapas, se tienen variaciones temporales de la comunidad microbiana y de la producción de biogás. Se necesita un monitoreo cercano y constante de las condiciones dentro del reactor para asegurar que funcione óptimamente. Entre ciclos el reactor es vaciado parcialmente, usualmente se deja el 50 % del volumen para que sirva como inóculo para el siguiente sustrato (Zupancic y Grilc, 2012).

Para garantizar una producción continua de biogás se necesitan mínimo tres reactores corriendo de manera que se alternen sus tiempos picos de producción de metano, es decir, con diferentes tiempos de arranque, ver figura 1.13. Gracias a esta cualidad de configuración por módulos, la capacidad de la planta se puede incrementar muy fácilmente. Al proceso se le pueden agregar más módulos sin una inversión adicional fuerte (Ranieri 2018).

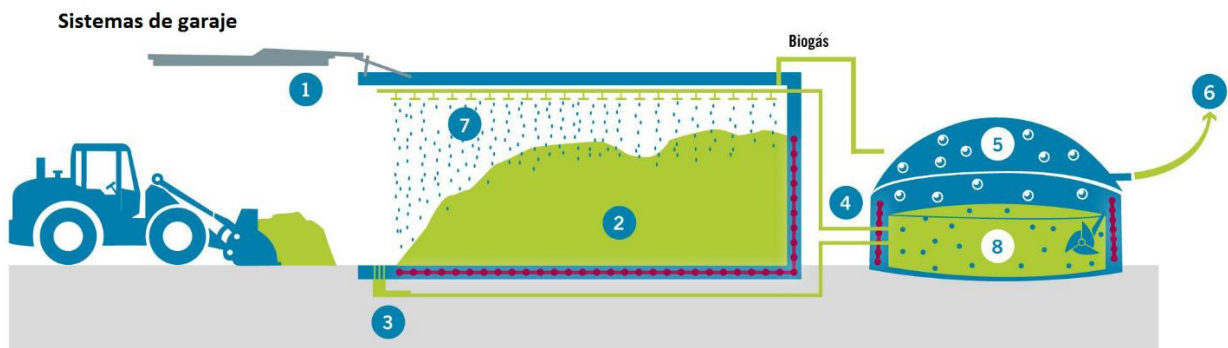


**Figura 1.13** Ejemplo de producción continua de biogás con varios digestores  
Referencia: (Vögeli et al, 2014).



Aunque los sistemas de garaje no parezcan más que un relleno sanitario en una caja, se logra una producción de biogás entre 50 y 100 veces mayor a la de los rellenos sanitarios por dos razones. La primera es que se recircula el percolado que se produce durante la digestión anaerobia, lo que permite la dispersión del inóculo, de nutrientes, de ácidos orgánicos volátiles y la regulación de la humedad de toda la biomasa. El segundo es que la temperatura de operación de estos garajes es mucho mayor a la de los rellenos sanitarios, usualmente entre 35-40°C (Ranieri 2018). Esto se logra mediante la calefacción de las paredes y piso del reactor. Así, se permite una tasa mayor de producción de metano, ya que las condiciones son más propicias para las comunidades microbianas metanogénicas (Mata-Alvarez 2003).

Desde hace mucho tiempo se ha estudiado que las ventajas principales de este sistema, como su diseño simple, bajo costo de inversión inicial, control del proceso y resistencia a materiales corrosivos lo hacen particularmente atractivo (Ouedraogo 1999).



- 1.- Puerta hermética, 2.- Biomasa, 3.- Sistema de drenaje, 4.- Sistema de calefacción,
- 5.- Almacén de biogás, 6.- Uso de biogás, 7.- Distribución de líquido percolado,
- 8.- Tanque almacén de percolado

**Figura 1.14** Esquema de Tecnología de garaje o por lotes  
Referencia: (de Strippel 2016)

*-Configuraciones diferentes de tecnología por lotes o de garaje*

El distintivo de los sistemas de garaje es la localización de la primera fase, en donde la acidificación se da de manera mucho más veloz que la metanogénesis, y la segunda fase, en donde los ácidos se transforman en biogás. Hay tres configuraciones básicas de sistemas por lotes que se pueden encontrar según la ubicación de las fases acidogénicas y metanogénicas. Ver figuras 1.14 y 1.15.

- A. En el diseño de reactor de una sola etapa, el percolado es recirculado a la parte superior del reactor en donde se produjo, ver figura 1.15. Así, cada reactor se rocía con su propio percolado para lograr la distribución de nutrientes. Este es el principio del proceso Biocel, utilizado por compañías grandes como Bekon en Alemania o Bioferm en Estados Unidos.

Ejemplo:

Se implementó por primera vez en 1997, en la construcción de una planta en Lelystad, Países Bajos. Esa planta se diseñó para procesar 35 000 toneladas de FORSU separada desde el origen al año (ten Brummeler 1999). El sustrato de FORSU es cargado con una pala en 14 reactores de concreto de 480 m<sup>3</sup> efectivos cada uno. El líquido percolado es recolectado en la parte inferior y rociado en la parte superior de los residuos que se están fermentando. Un problema técnico de estos sistemas es que se pueden tapar los orificios del suelo por donde se drena el líquido percolado, impidiendo la recirculación del mismo. Este problema se alivia reduciendo la altura de la masa de los residuos a 4 metros para evitar compactación y agregando material de volumen para evitar que los conductos se tapen (Brummeler 1992).

Se necesitan tomar precauciones en la apertura y vaciado del reactor, ya que pueden existir condiciones explosivas, en este sentido, la vigilancia y control de la presión de operación son de enorme importancia en la prevención de fugas de biogás. Una precaución posible es la instalación de una comúnmente llamada trampa de llama. La función primordial de este dispositivo es impedir que, de manera inadvertida, una llama procedente desde el punto donde se quema el biogás, se propague a través de las tuberías hacia el reservorio o inclusive hacia el digestor (Juárez, 2012).

- B. En el diseño del sistema de reactores por lotes secuencial, el líquido percolado de un reactor fresco, recientemente llenado, con contenido alto de ácidos orgánicos, es recirculado a un reactor más maduro que se encuentre en la fase metanogénica. Paralelamente, el percolado de este último reactor libre de ácidos y cargado de bicarbonatos amortiguadores de pH, se bombea para rociar el reactor fresco o nuevo, ver figura 1.15. Esta configuración asegura el cruzamiento de inóculos entre los nuevos y viejos reactores, lo que elimina la necesidad de mezclar el sustrato nuevo con material de inóculo. Por lo demás, las características técnicas son muy similares al de una sola etapa (Mata-Álvarez 2003).
- C. En el diseño del sistema de reactores por lotes híbrido, el reactor más maduro, en donde se da la mayor parte de la fase metanogénica, se sustituye por un RAFA, es decir, un reactor anaerobio de flujo ascendente, ver figura 1.15. En este tipo de reactores, la comunidad microbiana se acumula en gránulos y es apta para tratar efluentes líquidos con un alto contenido de ácidos orgánicos (Mata-Álvarez 2003; Chen 1999).

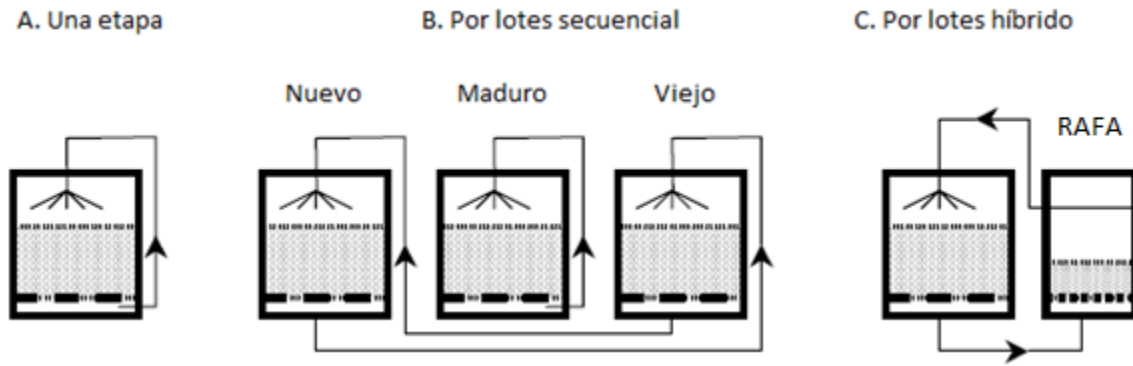


Figura 1.15 Configuración de recirculado de percolado en diferentes sistemas por lotes  
Referencias: (Mata-Álvarez 2003).

*-Esquema de digestión básico tecnología discontinua, por lotes (Bekon)*

Para entender el esquema de digestión básico de la tecnología discontinua, ver figura 1.16.

### 1. Llenado del digestor.

El reactor se llena con biomasa, ya sea FORSU o residuos orgánicos de cualquier otro origen, utilizando un cargador frontal, palas u otro método. Cuando la planta ya está operando, el suministro de biomasa a cada digestor se hace con un ciclo de aproximadamente 28 días. Cuando un digestor ya está listo para aceptar nuevo sustrato, el primer paso es extraer parte de la biomasa, parcialmente fermentada, que se encuentra dentro. Una porción se queda para mezclarse como inóculo de la FORSU fresca que vaya a llegar. Esta razón de digestato-FORSU fresca variará según el tonelaje del material que se vaya a tratar y de la temporada en que se encuentra la planta, lluvias o secas, pero usualmente es de 50-50 (Nizami y Murphy 2010). Una vez que se hace la mezcla, se sellan las puertas herméticamente, lo cual impide la entrada de oxígeno y el escape del biogás. Se necesitan condiciones anaerobias dentro del reactor para que las bacterias metanogénicas se mantengan activas.

### 2. Fermentación en los digestores.

Una vez selladas las puertas, el oxígeno que hay dentro de los digestores se consume y comienza el proceso de digestión anaerobia. Los digestores son usualmente de concreto. Un sistema de calefacción dentro de las paredes y en el piso conserva la biomasa a una temperatura constante en el rango 35-40°C (Ranieri 2018). La captura y almacenamiento de biogás se hace a través de un sistema de ventilación con tuberías de acero inoxidable. Para asegurar que el digestor no se abra antes de que se extraiga el total de biogás y se tengan niveles atmosféricos seguros de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, el aire dentro del digestor es monitoreado constantemente.

### 3. Recirculación del líquido percolado.

El líquido percolado se recolecta en la parte inferior del digestor mediante rejillas y canales de recolección de acero inoxidable. Estos canales conducen el líquido percolado a un tanque almacén aislado, en donde se regulará el flujo de vuelta al digestor y se mantendrá a la temperatura de operación del reactor. Es de este tanque de donde se bombeará a la parte superior del digestor para ser rociado sobre la biomasa (Ranieri 2018). Es importante considerar que dentro de este tanque también sigue ocurriendo parte de la metanogénesis, ya que el líquido trae nutrientes y parte de la biomasa disuelta. Así, también se tiene que almacenar y luego ventilar el biogás que se genere en dicho tanque para poder aprovecharlo en la generación de energía y evitar la emisión del gas de efecto invernadero (Kusch et al. 2011).

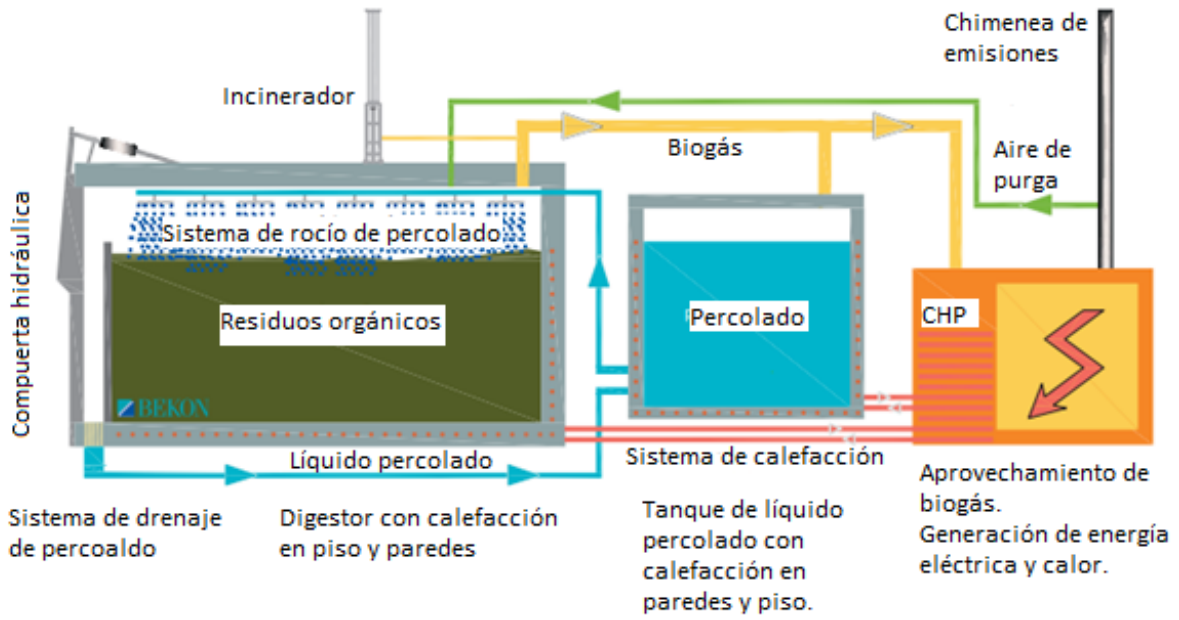
### 4. Almacenamiento y aprovechamiento de biogás. (Unidad CHP, Unidad combinada de calor y energía eléctrica)

El biogás, que se genera durante las cuatro semanas que dura el proceso, se lleva mediante un sistema de ventilación, a prueba de explosiones y fugas, a un tanque de almacenamiento encima del digestor. Se debe monitorear la presión interna dentro de esta cámara de almacenamiento para mantener la seguridad, esto se hace mediante una medición constante. Cuando se acercan a los niveles críticos se debe ventilar el biogás excedente a incineración. Se mezclan los flujos de biogás de los diferentes digestores en la planta, con aproximadamente el mismo contenido de metano, y con el biogás generado en el tanque de almacenamiento del percolado (Kusch et al. 2011).

Después se suministra este biogás mediante tuberías y un compresor a la unidad CHP (Combined Heat and Power unit), es decir, una unidad con un generador de calor y energía eléctrica. La energía eléctrica generada en la CHP se suministra a la red pública, mientras que parte del calor se aprovecha en el proceso y parte se utiliza en otro lugar. Si no se aprovecha el biogás en una unidad CHP, se envía a otro proceso en donde se mejora para ser inyectado en la red de gas natural.

### 5. Vaciado y aprovechamiento de digestato.

Cuando se termina la digestión anaerobia y la producción de metano es mínima, aproximadamente en cuatro semanas, el digestor se encuentra listo para vaciarse y recomenzar el ciclo. Como se describió anteriormente se deja la mitad de digestato como inóculo para el siguiente ciclo. El resto del digestato se manda a un proceso posterior de compostaje para poder ser aprovechado como fertilizante.



**Figura 1.16** Esquema general de digestor con tecnología de garaje o por lotes (Bekon).  
Referencias: Bekon: [https://www.bekon.eu/wp\\_content/uploads/2016/02/Brochure-BEKON-english1.pdf](https://www.bekon.eu/wp_content/uploads/2016/02/Brochure-BEKON-english1.pdf)

-Ventajas y desventajas de la tecnología de garaje o por lotes (Bekon).

Tabla 1.16 Ventajas y desventajas de la tecnología de garaje o por lotes

| Criterio              | Ventajas  | Desventajas   |
|-----------------------|---|---|
| Técnico               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicidad en diseño en comparación al proceso semicontinuo.</li> <li>• Tecnología baja, ningún equipo costoso de bombeo es necesario. El material se mantiene estático durante todo el proceso, lo que elimina las partes mecánicas de mezclado y transporte.</li> <li>• Robustez. Capacidad de aceptar objetos inertes sin daños a la planta. Ideal para flujos de residuos orgánicos con contaminantes.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taponamiento o atasco de orificios de drenaje, impidiendo recirculación de percolado.</li> <li>• Necesidad de agente voluminizador para evitar taponamiento.</li> <li>• Riesgo de explosión al vaciar el reactor. Por lo que se necesita un sistema de ventilación eficiente que desaloje todo el biogás. Se requiere de revisión continua de la presión para evitar fugas de biogás.</li> </ul> |
| Biológico             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso confiable gracias a la creación de nichos dentro del reactor en donde los microorganismos pueden estar libres de agentes inhibidores.</li> <li>• Proceso confiable por la cantidad de módulos o reactores en una planta que garantizan el flujo constante de biogás.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendimiento bajo en producción de biogás por reactor debido a que depende de la recirculación efectiva de percolado.</li> <li>• Baja carga orgánica.</li> </ul>  |
| Económico y ambiental | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de inversión.</li> <li>• Consumo de agua bajo gracias al ciclo cerrado del líquido percolado en donde se reusa en cada proceso.</li> <li>• Prácticamente no hay pretratamiento o separación previa necesaria. Lo cual ahorra tiempo y dinero a los operadores de la planta.</li> <li>• Bajo costo de mantenimiento y reparaciones. Bajo consumo de energía en el proceso, lo que permite casi el aprovechamiento total de la energía generada.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere de terrenos grandes ya que se ocupan reactores de poca altura y baja tasa de carga orgánica. (Altura de una quinta parte comparada con la de sistemas continuos, y carga orgánica de la mitad de los mismos (ten Brummeler 1992)).</li> </ul>  |

Referencias: (Bioferm 2018; Mata-Alvarez 2003)

-Ejemplos de plantas en operación sistema discontinuo o por lotes

**Tabla 1.17** Ejemplos de plantas en operación con Tecnología por lotes de Bekon

| País:    | Ciudad:            | Capacidad de la planta [ton/año]: | Tipo de residuos:  | Potencial eléctrico [kW]<br>*Procesamiento de biogás [Nm <sup>3</sup> /hr] | Eficiencia Potencial eléctrico [kW/ton/año] | Fecha de inicio: |
|----------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|--|---|------------------|
| Alemania | Münich (piloto)    | 6,500                             | Bioresiduos *      | 190  | 0.029                                       | 2003             |
|          | Münich (extensión) | 25,000                            | Bioresiduos        | 570  | 0.023                                       | 2007             |
|          | Erfurt             | 20,000                            | Bioresiduos        | 660  | 0.033                                       | 2008             |
|          | Rendsburg          | 30,000                            | Bioresiduos        | 1,050  | 0.035                                       | 2008             |
|          | Pohlsche Heide     | 40,000                            | Bioresiduos        | *500   | -   | 2009             |
|          | Schmölln           | 16,000                            | Renovables         | 1,000  | 0.063                                       | 2009             |
|          | Mainz              | 40,000                            | Bioresiduos        | 1,200  | 0.030                                       | 2012             |
|          | Hamburg            | 60,000                            | Bioresiduos        | *700   | -   | 2013             |
|          | Steinfurt          | 45,000                            | Bioresiduos        | 1,054  | 0.023                                       | 2013             |
|          | Rendsburg 2        | 64,000                            | Bioresiduos        | 1,175  | 0.018                                       | 2017             |
| Italia   | Cesena             | 35,000                            | Bioresiduos        | 1,000  | 0.029                                       | 2009             |
|          | Neapel             | 35,000                            | Bioresiduos        | 1,000  | 0.029                                       | 2011             |
|          | Rimini             | 35,000                            | Bioresiduos        | 1,000  | 0.029                                       | 2012             |
|          | Voltana            | 35,000                            | Bioresiduos        | 1,000  | 0.029                                       | 2012             |
|          | Enna               | 20,000                            | FORSU              | 599  | 0.030                                       | 2018             |
| México   | Culiacán           | 4,500                             | Residuos agrícolas | 100  | 0.022                                       | 2016             |
| Polonia  | Posen              | 24,000                            | Bioresiduos        | 716  | 0.030                                       | 2016             |
| Portugal | Valnor             | 25,000                            | FORSU              | 500  | 0.020                                       | 2011             |
| Suiza    | Baar               | 18,000                            | Bioresiduos        | 526  | 0.029                                       | 2009             |
|          | Thun               | 20,000                            | Bioresiduos        | 950  | 0.048                                       | 2010             |
|          | Galmiz             | 4,500                             | Bioresiduos        | 150  | 0.033                                       | 2015             |
|          | Krauchthal         | 12,000                            | Residuos de poda   | 440  | 0.037                                       | 2017             |

\*Bioresiduos se refiere a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos separada en la fuente.  
Consultado en: <https://www.bekon.eu/en/references/>

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Diseño básico de una planta para tratamiento de FORSU

En este capítulo se describirá el dimensionamiento de una planta para tratamiento de los residuos sólidos urbanos que incluye un sistema de digestión anaerobia seca de abastecimiento semicontinuo en lotes de FORSU. Con los gastos máxicos (kg/d) y la caracterización de residuos sólidos generados en una población dada, se realizará un diseño básico del sistema. Este sistema incluye el digestor anaerobio y las instalaciones periféricas, como contenedor para biogás, patio de maniobras y cogenerador eléctrico. Se cuantificará también, producciones de biogás, de energía eléctrica, la cantidad de agua tratada a utilizar, la cantidad de material reciclado, principalmente metales, y la cantidad de agua residual que se tratará posteriormente.

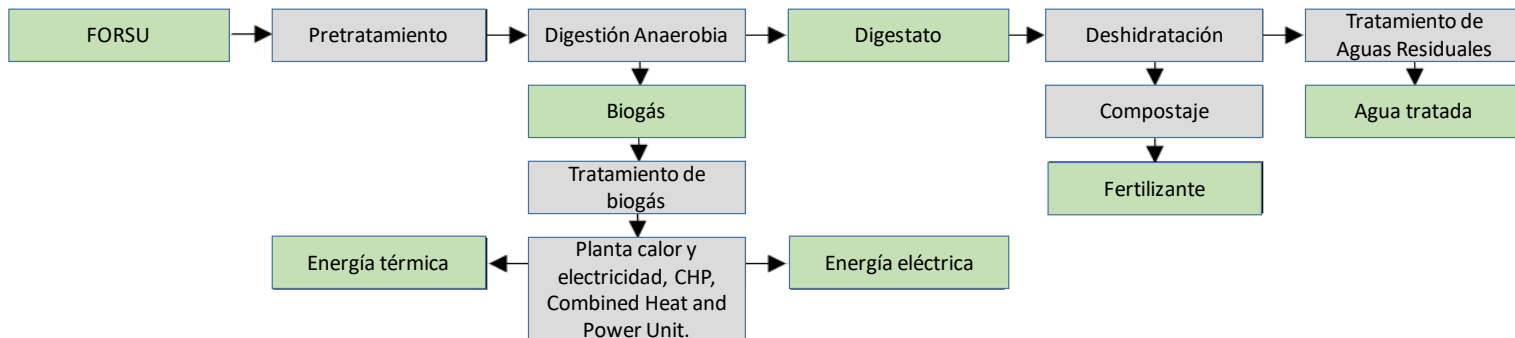
Este procedimiento se basará en casos de estudio de tecnologías y procesos funcionando al momento de redactar esta tesis. Es de fuentes bibliográficas de donde se sacarán parámetros como la carga orgánica, el tiempo de residencia de sólidos (TRS) y tiempo de retención hidráulico (TRH), con que opera este tipo de reactor anaerobio. En el capítulo anterior llamado Antecedentes se describió toda la bioquímica del proceso y se dieron características de cada uno de los parámetros a utilizar. El objetivo de este capítulo es elaborar el procedimiento de diseño de la planta a partir de estimaciones de producción y dimensionamiento que ofrece la literatura científica existente.

#### Diagrama de flujo del procedimiento

En la figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo de los procesos que comprenden un sistema para tratamiento de la FORSU. En color verde se muestran los sustratos y los productos del proceso, mientras que en color gris se muestran los procesos a desarrollar en cada etapa. Primero, la FORSU entra a la etapa de pretratamiento en donde, se hace una maceración, trituración, filtrado y mezcla con inóculo. Después ese sustrato entra al reactor para ser digerido de manera anaerobia, de ese proceso se obtienen dos subproductos, biogás y digestato.

El biogás pasa a un tratamiento para mejorarlo y obtener biometano. Ese biometano se lleva a combustión en un cogenerador de energía eléctrica y térmica. El digestato, a su vez, atraviesa por un proceso de deshidratación y compostaje para obtener un fertilizante de suelos. Finalmente, el agua que se obtiene del proceso de deshidratación se trata en una planta de tratamiento de aguas residuales antes de ser devuelta al sistema o desechada cumpliendo según la NOM corresponda al lugar de vertido.





**Figura 2.1** Diagrama de flujo de la planta de FORSU  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

### 2.1.1 Datos de la FORSU a tratar

Los cálculos se basarán en gastos máxicos anuales o diarios promedio. El primer dato es la cantidad o tonelaje de FORSU que llegará a la planta anualmente y la caracterización de la misma. El potencial de metano o los rendimientos de metano son distintos para cada tipo de sustrato, ver tabla 1.13. Se puede observar en esa tabla que incluso cuando se trata del mismo tipo de sustrato, se obtuvieron diferentes potenciales de metano según la bibliografía. Es importante caracterizar el sustrato a utilizar en cada planta para una estimación más precisa de la cantidad de metano que podrá producir, ya que, aunque sea el mismo tipo de sustrato que los ya analizados por otras fuentes bibliográficas, cambia la composición del mismo según la región, clima y poder adquisitivo en donde se generaron dichos residuos. El procedimiento se basa en una correcta caracterización, ver tabla 2.1. La humedad es un dato necesario también, para saber si se necesita agregarle más agua.

En la tabla 2.1 se tienen datos de entrada para un caso específico, se observa que entran 100,000 toneladas al año de FORSU, tienen un contenido de sólidos totales de 40%. De esos ST, el 85% es materia orgánica, lo demás son contaminantes como vidrio, plástico y metales.

**Tabla 2.1** Datos de caracterización de FORSU

| Datos                        |                  |
|------------------------------|------------------|
| Tipo                         | Cantidad (t/año) |
| FORSU                        | 100,000          |
| Caracterización              |                  |
| Clasificación                | Proporción de ST |
| Materia orgánica             | 85%              |
| Vidrio                       | 4%               |
| Metales                      | 2%               |
| Plásticos                    | 2%               |
| Otros inertes                | 7%               |
| <b>Total</b>                 | 100%             |
| ST                           | 40%              |
| Humedad                      | 60%              |
| Densidad (t/m <sup>3</sup> ) | 0.60             |

Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

### 2.1.2 Pretratamiento

#### Diagrama de flujo de pretratamiento

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de flujo de los procesos para el pretratamiento de los RSU. Los RSU entran al cribado y segregación magnética de donde se separan el material de rechazo y los metales. El primer grupo es enviado a un relleno sanitario, si cumple la norma, los metales se reciclan. De aquí se obtiene la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos, FORSU. Esta FORSU entra en una zona de mezclado en donde se puede controlar la humedad, temperatura y permeabilidad que aportan los residuos de poda. Cabe aclarar que la adición de poda aplica en la CDMX sólo si los residuos no contienen residuo de poda, ya que la ley local admite residuos de poda en la recolección de los residuos orgánicos. Con este mezclado se obtiene el sustrato a introducir en el digestor anaerobio.

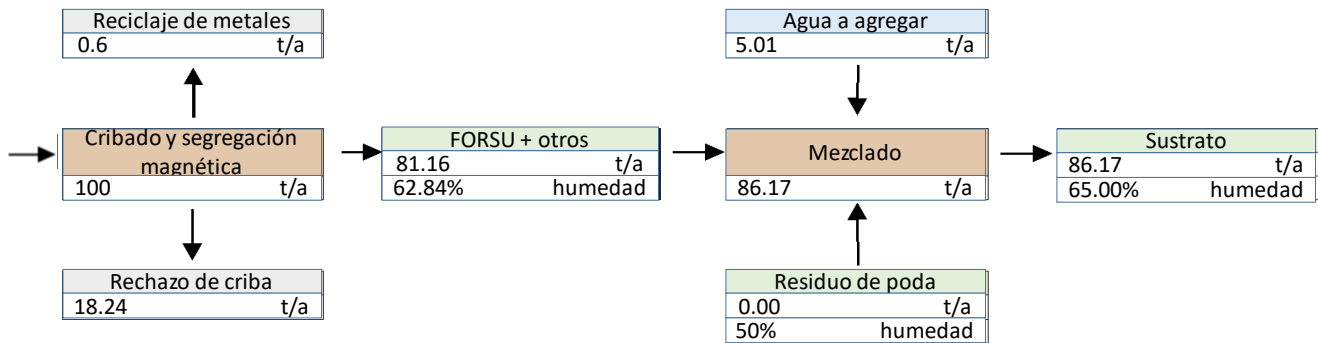


Figura 2.2 Diagrama de flujo del pretratamiento de la planta de FORSU  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

Usualmente se necesita un pretratamiento para limpiar los residuos sólidos urbanos que llegan a la planta, de objetos inertes que dañen alguna parte mecánica del proceso o que afecten el proceso de digestión de la fracción orgánica. Sin embargo, las tecnologías escogidas, digestión anaerobia semicontinua y por lotes, son de las más resistentes hacia la presencia de material inorgánico o inerte. Por lo que el pretratamiento estará enfocado hacia una reducción de tamaño de las partículas a menos de 50 mm (CEPA, 2008), a un cribado, a la adición o no de agua, y hacia la adición de material residuo de poda para garantizar una buena consistencia y garantizar el flujo del percolado recirculado en el digestor anaerobio.

Se aplicará un método de pretratamiento en donde se buscará una segregación de materiales metálicos por medio de un separador magnético. Después se mezclará el material para buscar una completa digestión de toda la fracción orgánica, ya que el mezclado aumenta el rendimiento de metano. Es en este paso en donde se agrega la cantidad necesaria de agua y de residuos de poda, solo en el caso de que estos últimos sean necesarios para estabilizar el reactor. Esta mezcla es la que se va a introducir al reactor.

Para calcular la cantidad de agua que se va a añadir al reactor se realiza la siguiente operación (Pierre-Marie, 2017).

$$W_{agua} = W_{FORSU} * \frac{H_{sustrato} - H_{digestor}}{H_{digestor} - 1}$$

En donde:

- $W_{agua}$  es la cantidad de agua que se le tiene que añadir al sustrato antes de introducirse al digestor para llegar a la humedad deseada, usualmente correspondiente a aquella del digestato con el que se mezclará, en [ton/año].
- $W_{FORSU}$  es la cantidad de sustrato que se va a añadir al digestor en [ton/año].
- $H_{sustrato}$  es la humedad que tiene el sustrato que se va a introducir al digestor, dato que se define en la caracterización, en [%], en fracción decimal.
- $H_{digestor}$  es la humedad a la que se quiere llegar, usualmente la humedad con la que está operando dicho reactor, es decir, la humedad que tiene el digestato que quedó dentro del reactor para la mezcla, en [%], en fracción decimal.

### 2.1.3 Digestión Anaerobia

El sustrato que obtuvimos en la fase de pretratamiento se introducirá al digestor. Este está compuesto principalmente por materia orgánica, con sólidos volátiles (SV) y agua en tal porcentaje que le permite conservar la humedad que tiene el digestato dentro del reactor. El digestor será un prisma rectangular horizontal ya que provee una mayor facilidad para su construcción, limpieza y operación.

Con un mínimo de tres digestores operando con tiempos de arranque diferentes, podemos garantizar una producción de biogás cercana a la continuidad. Luego, basado en el principio de la conservación de la materia, podemos calcular la cantidad de digestato que saldrá del reactor al final del periodo de digestión. El volumen del reactor a utilizar se puede calcular mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

1. Primero se calculará el volumen de biogás específico que se generará por cada tonelada de sólidos volátiles.

$$V_{e\text{biogás}} = \frac{P_{\text{metano}}}{f_{CH_4 \text{ en biogás}}}$$

Donde:

- $V_{e\text{biogás}}$  es el volumen específico de biogás producido en metros cúbicos en condiciones estándar (1 atm y 0°C) [Nm<sup>3</sup>/ton SV].
- $P_{\text{metano}}$  es el potencial de metano específico, correspondiente al sustrato que entrará al digestor en metros cúbicos por tonelada de sustrato [Nm<sup>3</sup>/ton SV].
- $f_{CH_4 \text{ en biogás}}$  es la fracción de contenido de metano en el biogás.

2. Posteriormente se calcula la cantidad de biogás específica por tonelada de SV, en [ton/ton SV]

$$We_{biogás} = Ve_{biogás} * d_{biogás}$$

Donde  $d_{biogás}$  es la densidad del biogás en [ton/Nm<sup>3</sup>]

3. Se calcula la cantidad de digestato generado con la siguiente expresión:

En el proceso de digestión anaerobia parte de la FORSU se degradará y se convertirá en biogás. La composición de la FORSU se divide en sólidos fijos, SF, aquellos que quedan después de una incineración a 550°C, es decir, materia inorgánica, y sólidos volátiles SV. Los SV se dividen a su vez en SV biodegradables y no biodegradables. Los SV biodegradables serán digeridos por los microorganismos y convertidos en tres subproductos, biogás, células de microorganismos, y ácidos grasos volátiles, AGV. Los SV no biodegradables son, en su mayoría, compuestos lignocelulósicos, principalmente de residuos de poda. Al final de la digestión anaerobia, se tendrán dos productos, biogás y digestato. Este último estará formado por: sólidos volátiles (células nuevas, AGV, y SV no biodegradables) y SF. Ver figura 2.3 en donde se muestra la composición de la FORSU, sustrato (entrante) y digestato (a la salida).

| Digestión | Biogás                     | Digestato             |                      |                  |    |
|-----------|----------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|----|
|           | Biogás                     | SV restantes al final |                      |                  | SF |
|           | Biogás                     | AGV                   | Célula               | Lignocelulósicos | SF |
| Sustrato  | SV biodegradables          |                       | SV No biodegradables |                  | SF |
|           | SV                         |                       |                      |                  | SF |
|           | FORSU + contaminantes (ST) |                       |                      |                  |    |

Figura 2.3 Composición de la FORSU durante digestión anaerobia

$$W_{digestato} = W_{SV} + W_{SF} - W_{biogás}$$

$$W_{digestato} = W_{SV} * \left( 1 - \frac{p_{metano}}{f_{CH_4 \text{ en biogás}}} * d_{biogas} \right) + W_{SF}$$

En donde:

- $W_{SV}$  es la cantidad de sólidos volátiles a tratar en el sustrato en [ton/ día]
- $W_{SF}$  es la cantidad de sólidos fijos en el sustrato a tratar [ton/día]
- $W_{digestato}$  es la cantidad de digestato a tratar en [ton/día]

4. Por último, se puede calcular el volumen del digestor al introducir la variable de tiempo de retención celular TRC.

$$V_{digestor} = W_{ST} * TRC / d_{ST} + V_{biogás} * x$$

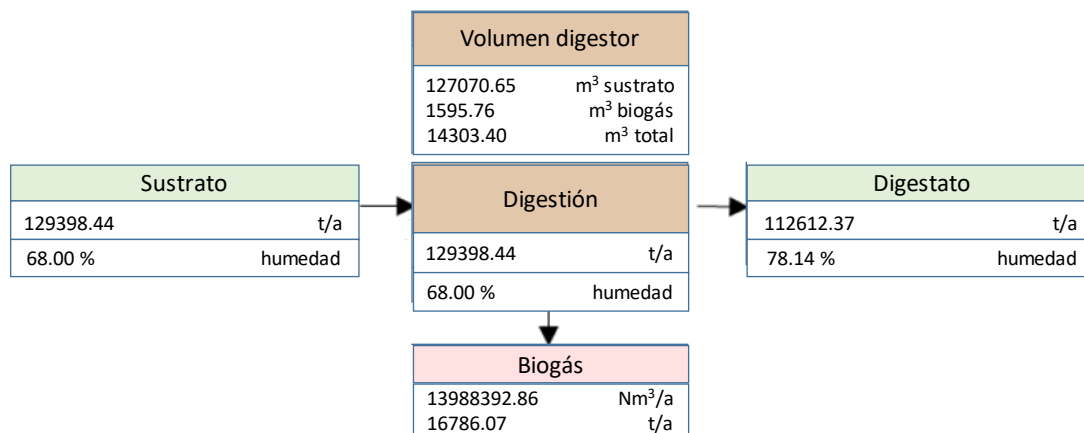
En donde:

- $V_{digestor}$  es el volumen mínimo requerido para el digestor en  $[Nm^3]$ .
- $W_{ST}$  es la cantidad de sustrato a tratar  $[ton/días]$
- TRC es el tiempo que va a tardar en digerirse la materia orgánica  $[días]$
- $d_{ST}$  es la densidad del sustrato a tratar en  $[ton/Nm^3]$ .
- $V_{biogás}$  es el volumen de biogás generado en  $[Nm^3/día]$ .
- X es la tasa de extracción del biogás  $[días]$ .

Para el caso especial de lugares con climas fríos o de digestión anaerobia termofílica, se necesita instalar un sistema de calefacción para mantener la temperatura de operación en el rango requerido. Para ello ese calor suministrará aprovechando una fracción de la energía térmica generada en la planta de generación combinada de energía eléctrica y térmica, CHP, por sus siglas en inglés de Combined Heat and Power Unit. El calor de autoconsumo se tiene que calcular basándose en el volumen del reactor y la superficie de contacto de las paredes y piso por donde vaya a pasar el sistema de calefacción.

En la figura 2.4 se muestran las producciones obtenidas con estas ecuaciones. El sustrato entra al digestor con las mismas condiciones de temperatura y humedad con las que el reactor está trabajando. Dentro del reactor se da la digestión anaerobia y parte de los sólidos volátiles, es decir, la fracción orgánica biodegradable se convierte en biogás. En este cuadro se muestra la cuantificación del biogás producido, dado un potencial de metano específico del sustrato que entró al reactor, del digestato producido, correspondiente a la fracción del sustrato que no se degradó en ese periodo, y de la cantidad y dimensiones de reactores necesarios para tratar ese sustrato.

#### Diagrama de flujo de la digestión



**Figura 2.4** Diagrama de flujo de la digestión en la planta de FORSU  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

#### 2.1.4 De biogás a energía

Para calcular la producción de energía eléctrica los procesos para tratamiento del biogás deberán considerarse para estimar pérdidas y serán tomados en cuenta en forma de un coeficiente de eficiencia. Dicho coeficiente representa la cantidad de metano perdida en los procesos de secado, desulfuración y mejoramiento del biogás.

#### Planta CHP generación combinada de energía térmica y eléctrica

La metodología de diseño incluirá la energía que se obtendrá del biogás generado en términos de electricidad y calor. Así, se dimensionará el reactor adecuado. La eficiencia  $\eta_{elec}$  de la conversión a energía eléctrica y la eficiencia  $\eta_{térmica}$  de la recuperación de calor son datos de entrada al dimensionamiento. Se pueden adaptar de algún generador comercial que se escoja para la planta.

En la primera ecuación se calcula la cantidad de energía eléctrica que se generará. Una vez que se tiene cuantificado el volumen de metano que se producirá, se utiliza la eficiencia del generador seleccionado y el valor calorífico menor del metano para calcular la energía eléctrica resultante. En el capítulo 1 Antecedentes, se vio que:  $LHV(CH_4) = 10 \text{ kWh/Nm}^3$ . En la segunda ecuación se calcula la cantidad de energía térmica que se producirá con el generador seleccionado, se emplean los mismos datos que en la primera ecuación, más la eficiencia térmica del generador.

$$E_{elec.} = V_{metano} * VCI_{metano} * \eta_{elec.}$$

$$E_{térmica} = V_{metano} * VCI_{metano} * (1 - \eta_{elec.}) * \eta_{térmica}$$

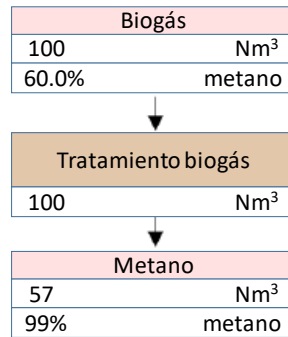
Donde:

- $E_{elec.}$  es la energía eléctrica generada en MWh/año.
- $V_{metano}$  es el volumen de metano generado en  $\text{Nm}^3/\text{año}$ .
- $VCI_{metano}$  es el valor calorífico inferior del metano en  $\text{MWh/Nm}^3$ .
- $\eta_{elec.}$  Es la eficiencia eléctrica del generador seleccionado en %.
- $E_{térmica}$  es la energía térmica generada en MWh/año.
- $\eta_{térmica}$  es la eficiencia térmica del generador seleccionado en %.

Una vez generado el biogás en el reactor, este se extrae por medio de tuberías a una planta de tratamiento de biogás. El biogás generado tiene entre un 55 y 70% de metano, según se vio en los antecedentes, capítulo 1.4.2 -Composición típica de biogás. En la planta de tratamiento de biogás se emplea uno de los métodos mencionados en el capítulo 1.3.3 Métodos de mejoramiento del biogás crudo, para limpiar el biogás de  $\text{CO}_2$ , e hidrógeno. Así se puede alcanzar el llamado biometano con un porcentaje muy alto de metano (95-99%) limpio para generar la energía eléctrica en el generador, ver figura 2.5.

## Diagramas de flujo de la conversión biogás a energía

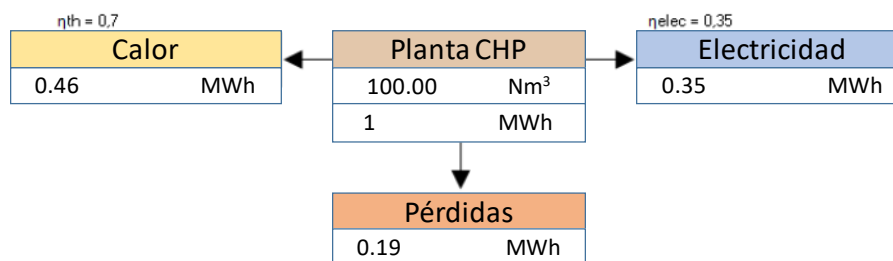
En la siguiente figura se observa un ejemplo de la etapa de mejoramiento de biogás. Después de la digestión anaerobia, 100 m<sup>3</sup> de biogás entran al proceso de mejoramiento con 60% de metano y salen del proceso 57 m<sup>3</sup> de biometano con 99% de metano. En el proceso se separó el CO<sub>2</sub> y el hidrógeno del biogás y se obtuvo un biometano sin contaminantes.



**Figura 2.5** Diagrama de flujo del tratamiento de biogás  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

Después de que el biogás atraviesa la fase de mejoramiento, sale un producto llamado biometano. Biometano es el gas que se alimenta al generador seleccionado para producir energía eléctrica y térmica mediante su combustión. Los generadores tienen diferentes eficiencias en la generación de energía, por lo tanto, los valores de entrada a este diagrama de flujo dependen del generador seleccionado del catálogo. Hay compañías como *Wolf Power Systems* que venden unidades de generación combinada de energía eléctrica y térmica que realizan el mejoramiento del biogás durante la operación del generador, por lo que no es necesario el paso de mejoramiento y limpieza del biogás antes de la generación de energía (Catálogo de Wolf Power Systems, 2018).

Ver figura 2.6 en donde se muestra un ejemplo de la conversión de volumen de biometano a energía eléctrica, térmica y pérdidas del proceso. Es necesario tener información correspondiente a la energía necesaria para calentar el reactor, para bombear el sustrato al reactor, para mejorar el biogás generado, para mantener las oficinas de la operación y para el mismo generador de energía, para hacer un balance y cuantificar la energía que se puede vender a la red.



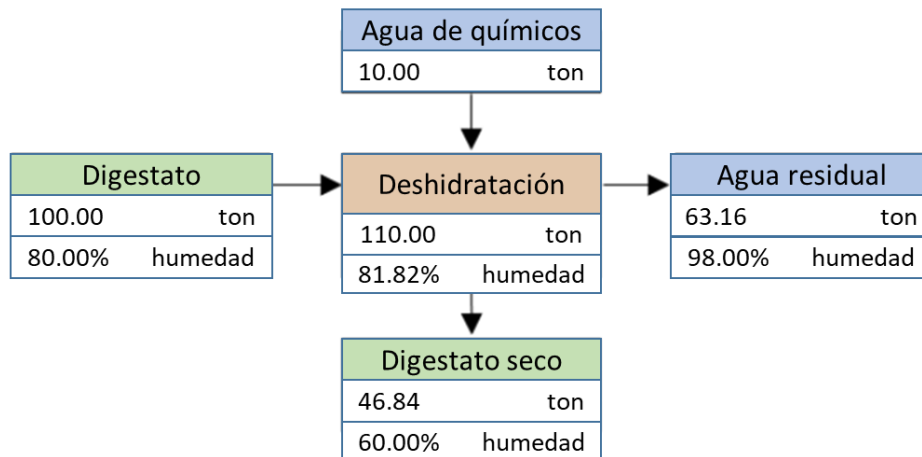
**Figura 2.6** Diagrama de flujo de la planta CHP generadora de energía  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

La electricidad producida es útil para operar la planta, ya que necesitan energía eléctrica los equipos de bombeo. El calor generado es adecuado para darle calefacción al digestor, para higienizar el digestato, o puede ser vendido a industrias y zonas residenciales vecinas (Pierre-Marie, 2017).

### 2.1.5 Tratamiento de digestato

#### 1. Deshidratación

Ver figura 2.7, en que el digestato entra a la fase de deshidratación. Para esta fase se necesitan agregar productos químicos que faciliten la floculación, coagulación y sedimentación de las partículas más densas para espesar el digestato en un lodo con menos contenido de agua. Para agregar los productos químicos uniformemente se agrega alrededor del 10% de la masa de digestato en agua (Pierre-Marie, 2017). En la figura se aprecian dos subproductos de este proceso que también recibirán un tratamiento posterior. En este proceso se obtiene un digestato con 60% de humedad y un efluente líquido, o agua residual, que contiene muy pocos sólidos.



**Figura 2.7** Diagrama de flujo de la deshidratación del digestato  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

#### 2. Tratamiento de agua

La fase líquida obtenida se tiene que tratar, alrededor del 10% se puede tratar como lodo, así que, se puede flocular, coagular, y sedimentar para tratarse por separado de manera aerobia en fase sólida. Otra fracción es considerada como tóxica y se tiene que tratar por separado de manera especial. El resto del efluente líquido se considera limpio y rico en nutrientes por lo que es recirculado para mezclarse con la FORSU entrante en el pretratamiento. Si esta cantidad excede las necesidades de la planta se tiene que desechar cumpliendo la norma correspondiente al lugar donde se descargan.

Ver figura 2.8 en donde el efluente líquido corresponde a un flujo másico de agua residual, que proviene del reactor anaerobio y del secado del digestato, y pasa a la planta de tratamiento de aguas residuales.



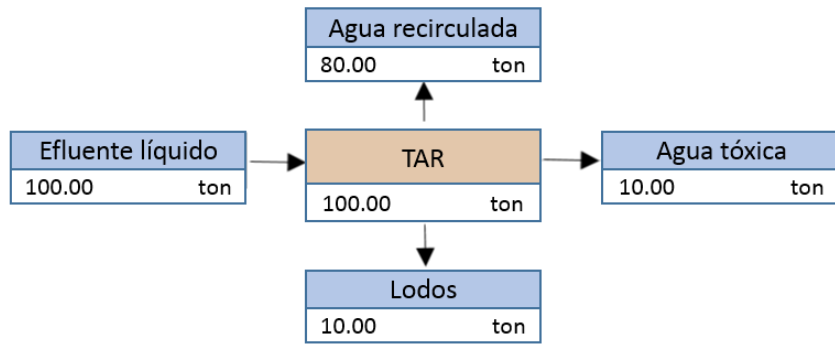


Figura 2.8 Diagrama de flujo del tratamiento del efluente líquido  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

### 3. Compostaje

Compostaje se refiere al tratamiento de la parte sólida del digestato generado. Esta etapa se realiza en pilas horizontales, con ciertas características para evitar la emisión de olores. También se necesitan dispositivos para tratar el aire, ya que se emiten gases de efecto invernadero durante este proceso. Se agrega material residuo de poda en muchos casos para mantener una cierta consistencia y humedad. Dependiendo del proceso seleccionado se puede agregar el lodo generado en el tratamiento del efluente líquido. Un porcentaje de esta masa se convertirá en fertilizante, una pequeña fracción será convertido en gas y la otra fracción en residuo no degradado que se tendrá que llevar a un relleno sanitario. Se deben calcular las masas dependiendo del proceso seleccionado.

Ver figura 2.9 en donde se observa como llegan a la planta de compostaje los lodos provenientes del secado del digestato y del tratamiento de agua residual. También se observa como se le agregan residuos de poda para darle permeabilidad y consistencia a los lodos a tratar. Sin embargo, en el caso de la CDMX no se tendrá que agregarle residuos de poda ya que los residuos orgánicos admiten ese tipo de residuo en su normatividad. Se produce la digestión aerobia de los residuos en aquella pila, y se obtienen tres sub productos, gas, lodo fertilizante, y material de residuo que será enviado a un relleno sanitario para su disposición.

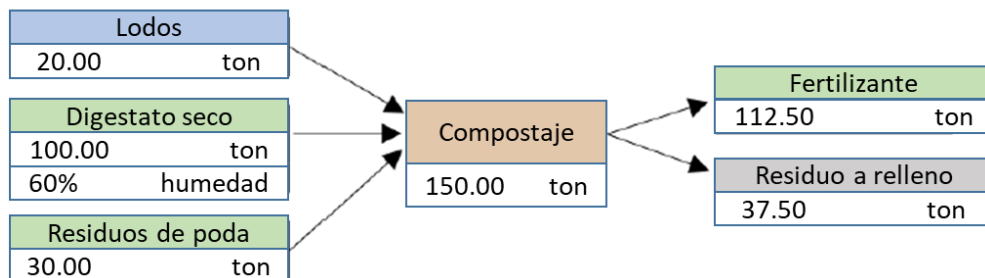


Figura 2.9 Diagrama de flujo del tratamiento del efluente líquido  
Referencia: (Pierre-Marie, 2017)

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Definición de TRS en reactores semicontinuos y por lotes

Es pertinente observar que la diferencia radica en que en el sistema semicontinuo, se recibe el alimento en lotes con frecuencias que van desde diarias, hasta el extremo de una sola en todo el tiempo de residencia celular, situación en que podría ubicarse el reactor por lotes (discontinuo). En el primer caso el digestor se opera removiendo una fracción pequeña del total diariamente, en cambio, en el segundo la fracción de recambio aumenta. En el reactor discontinuo por lotes al cabo de un determinado periodo en el que se asegura la duplicación de la población de microorganismos limitantes, se hace el recambio en el reactor, en donde se retira todo el material. Una mitad se trata en compostaje mientras que la otra es devuelta como inóculo para el siguiente lote.

Se puede calcular el tiempo de residencia celular de la siguiente manera.

$$TRS = \frac{\text{Masa en el sistema}}{\frac{\text{Masa que sale del sistema}}{\text{día}}} = \frac{\text{kg totales en reactor}}{\frac{\text{kg que salen del reactor}}{\text{día}}} = [\text{días}]$$

También se puede explicar este concepto como el recíproco de la tasa específica de crecimiento de los microorganismos limitantes, partiendo de la premisa en donde se busca mantener la población de los microorganismos en todo el proceso.

$$\mu = \frac{\frac{\text{Masa que crece en sistema}}{\text{día}}}{\text{Masa en el sistema}} = \frac{\frac{\text{kg que crecen}}{\text{día}}}{\text{kg totales en el reactor}} = \left[ \frac{1}{\text{día}} \right]$$

Si consideramos que se quiere conservar la masa, la cantidad de masa que crece en el reactor tiene que ser igual a la cantidad de masa que sale del reactor. En caso contrario, hay dos posibilidades, si la masa que sale es mayor a la masa que crece dentro del reactor, se abatiría la población de dichos microorganismos limitantes después de un determinado número de ciclos. Si la población que sale es menor a la que crece, habrá una acumulación de microorganismos, meta que se busca.

Así tenemos que para lograr un equilibrio de población en el sistema:

$$\text{Masa que crece en sistema} = \text{Masa que sale del sistema}$$

$$TRS = \frac{1}{\mu}$$

### 3.2 Principios del Reactor Semicontinuo

En la descripción de la tecnología DRANCO, una tecnología patentada de sistema anaerobio, el tiempo de residencia celular promedio es de 20 días. A su vez, la materia recorre el reactor completo en un rango de 2 a 4 días. La relación de operación es de 1 parte de FORSU por 6 a 8 partes de inóculo (De Baere, 2010).

En este caso particular el material recorre todo el reactor en 4 días, eso quiere decir que cuatro días son suficientes para que los microorganismos consuman el material biodegradable de la FORSU y que cada día una cuarta parte del total sale del reactor, aplicando este análisis al reactor semicontinuo de esta tesis, el periodo entre alimentaciones al reactor es de 1 día. Si la relación para inocular el reactor es de 1 parte de FORSU por 8 de inóculo, se tiene que de la cuarta parte que sale ese día del reactor solo una novena parte sale del sistema. Por lo que sale del sistema cada día una fracción de 1/36 del total de la masa dentro del reactor. Así, el recíproco representa el tiempo de residencia de sólidos. El total del sustrato saldría en 36 días, ver figura 3.1.

- Semicontinuo (con respecto a la fracción de V alimentada) de acuerdo a de Baere.

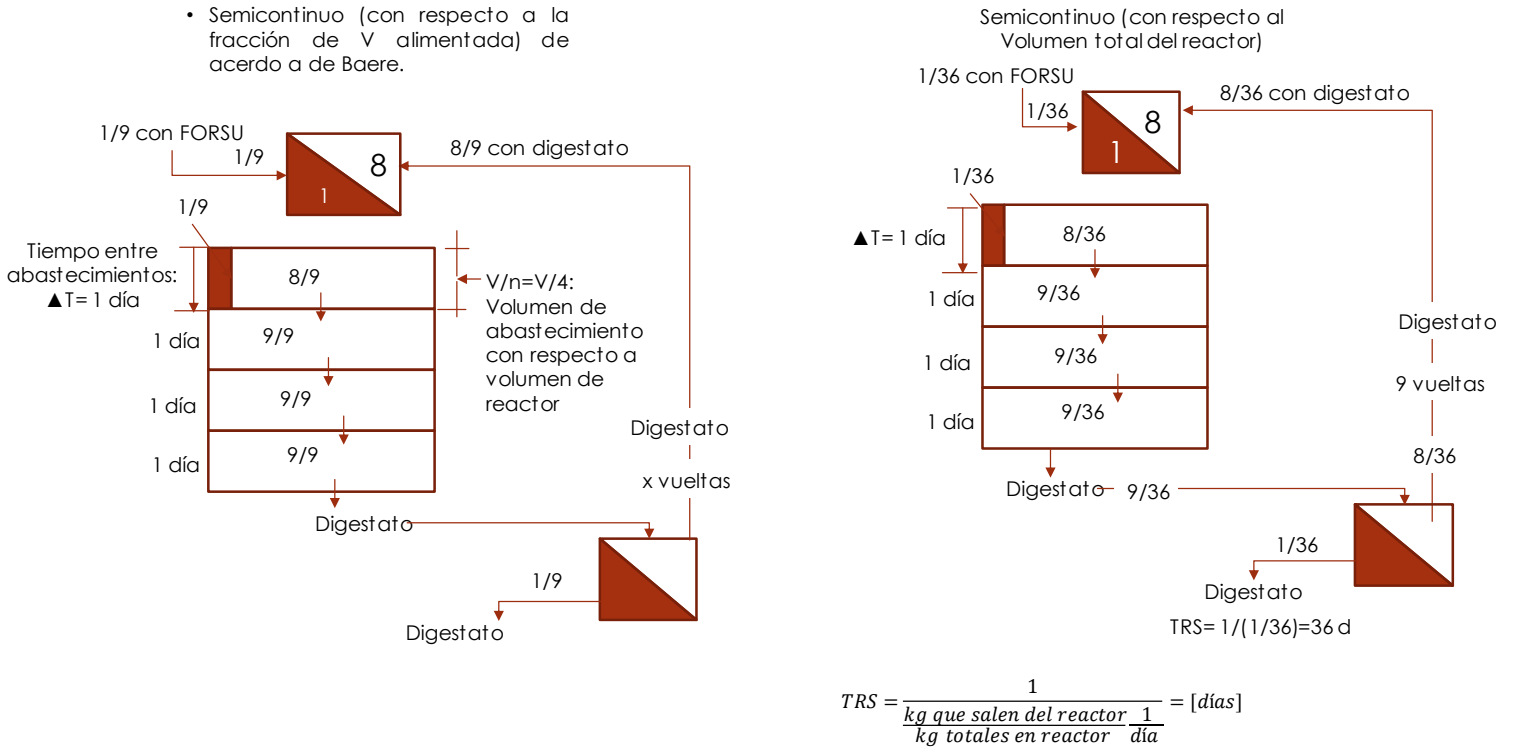


Figura 3.1 Diagrama de operación del reactor semicontinuo y definición de TRS.

### 3.3 Operación de reactor semicontinuo a partir de TRS y TRH

Cumpliendo con las observaciones de operación descritas anteriormente por De Baere, 2010, en este trabajo se encontró cómo relacionar, para sistemas semicontinuos, el tiempo de residencia celular promedio con el tiempo de retención hidráulico que define el tiempo que los microorganismos tienen en el reactor para consumir el sustrato biodegradable.

Se definen los siguientes parámetros para un análisis unitario en la operación del reactor anaerobio semicontinuo.

- $n$  = número de lotes, uniformes e intermitentes con que se llena el reactor.
- $\Delta t$  = Tiempo entre alimentación de los lotes de la mezcla FORSU más digestato.
- TRH = el tiempo en que una masa unitaria de FORSU + digestato alimentada al reactor tarda en salir.

$$TRH = n * \Delta t \text{ [días]}$$

- TRS = el tiempo para duplicación de arqueas metanogénicas limitantes.

$$TRS = \frac{1}{\frac{\text{kg que salen del sistema}}{\text{kg totales en reactor}} \frac{1}{\text{día}}} = \text{[días]}$$

- El gasto másico de digestato extraído por día del reactor es:

$$Q_e = \frac{1/n}{\Delta t} = \frac{1}{n * \Delta t}$$

- Por lo tanto el gasto másico de digestato purgado por día del sistema es:

$$Q_p = \frac{1}{TRS}$$

- El gasto másico de digestato que se recircula hacia la entrada del reactor es:

$$Q_r = \frac{1}{n * \Delta t} - \frac{1}{TRS} = Q_e - Q_p$$

- El gasto másico de FORSU alimentado por día al reactor es:

$$Q_i = \left( \frac{1}{TRS} \right) * \left( \frac{1}{1 - f_{biodegradable}} \right)$$

- Se define “f biodegradable” como la fracción biodegradable del sustrato del digestor, es decir que porcentaje del total se va a transformar en biogás. Si se considera lo que sale del reactor como la unidad, entonces lo que entra al reactor debe ser esa unidad más el porcentaje que se va a degradar dentro del reactor para asegurar la conservación de la masa.

- La relación FORSU a digestato en la mezcla de entrada es:

$$FORSU/digestato = \frac{\left( \frac{1}{TRS} \right) * \left( \frac{1}{1 - f_{biodegradable}} \right)}{\frac{1}{n * \Delta t} - \frac{1}{TRS}}$$

- Podemos observar que la relación FORSU/digestato que tendrá el sustrato queda definida en función de la cantidad de lotes en que se dividirá al reactor, del tiempo entre alimentaciones, de la fracción biodegradable y del TRS.

Con base en las definiciones del tiempo de residencia celular y del tiempo de retención hidráulico podemos concluir tres variables más para el diseño y operación del reactor, ver figura 3.2.

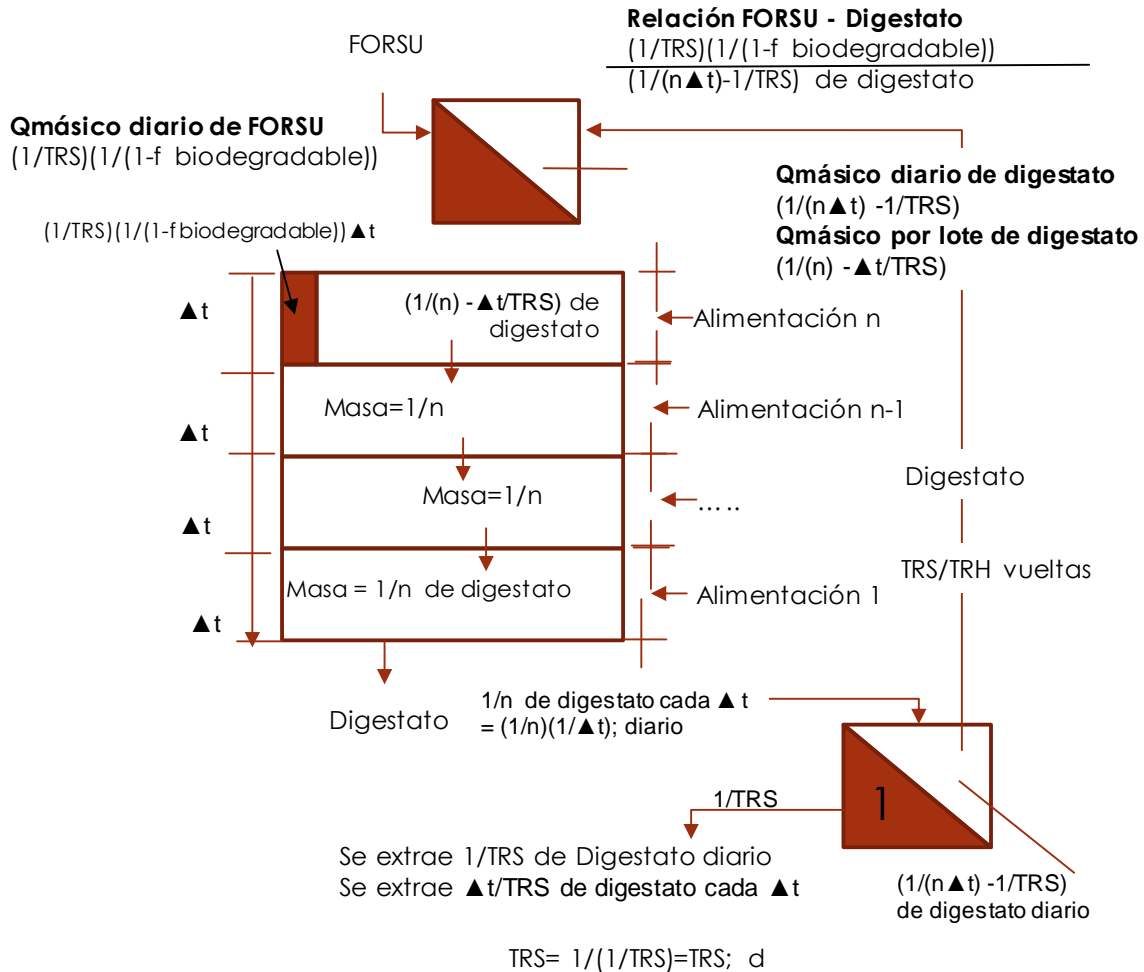
- Las veces que se recirculan las partículas en el sistema, en promedio, para que los organismos metanogénicos limitantes alcancen su tiempo de residencia celular, TRC, está dado por la relación TRS/TRH.
- Podemos definir la relación FORSU/digestato como el siguiente cociente, con los siguientes datos n=4, ▲ t=1 d, TRS= 36 d, fbiodegradable = 0.1:

$$\frac{FORSU}{digestato} = \frac{TRH}{TRS - TRH} * \frac{1}{1 - fbiodegradable} = \frac{4 * 1}{(36 - 4 * 1) * (1 - 0.1)} = \frac{4}{28.8} = 0.1388$$

- Sin considerar la fracción que se degrada la relación sería 1/8= 0.125
- El reactor deberá tener un volumen para contener TRS veces la masa de digestato extraído en cada lote.
- Y el volumen de reacción del reactor es TRS veces la masa de FORSU alimentada entre su densidad.

$$\begin{aligned} Volumen &= TRS * \frac{Masa\ que\ entra\ al\ día}{d_{ST}} \\ &= TRS * \frac{\left(\frac{1}{TRS}\right) * \left(\frac{1}{1 - fbiodegradable}\right)}{d_{ST}} \\ &= \frac{\left(\frac{Masa\ que\ entra\ en\ el\ TRS\ del\ reactor\ [kg]}{1 - fbiodegradable}\right)}{d_{ST} \left[\frac{kg}{m^3}\right]} [m^3] \end{aligned}$$

Se observa mejor en el siguiente diagrama de operación para un reactor con masa unitaria, ver figura 3.2.



**Figura 3.2** Esquema 1 de reactor anaerobio semicontinuo (con respecto a la masa unitaria)

### 3.3.1 Independencia entre el TRS y el TRH

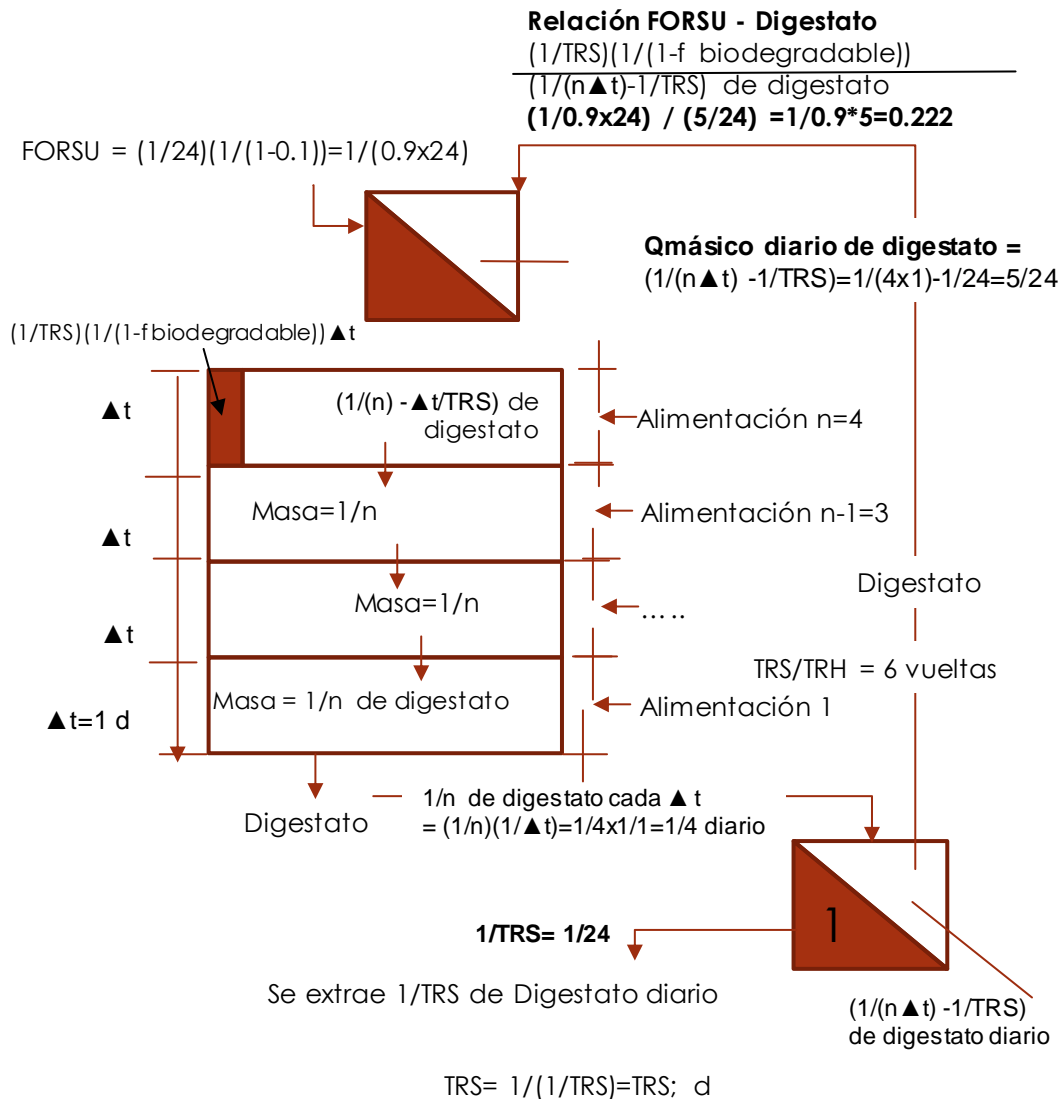
En la operación anterior se puede observar la independencia que hay entre el TRH y el TRS. El TRH queda definido como el tiempo que tarda en hacer el recorrido. Este valor viene determinado por la cinética estudiada del sustrato a tratar en el digester. ¿Cuántos días son suficientes para realizar el proceso? En los alcances de esta tesis se encuentra utilizar las constantes cinéticas de crecimiento específico encontradas en la literatura de sustratos con características similares al diseño de nuestro reactor.

La independencia de ambas variables es consecuencia de la presencia de una variable alternativa que las une, el índice de cambio. Si definimos un tiempo de retención hidráulico específico dada la cinética del sustrato, podemos variar el índice de cambio, para definir diferentes tiempos de residencia de sólidos. Para un TRH de 4 días, tenemos diferentes TRS según sea el índice de cambio entre FORSU e inóculo.

El tiempo de residencia de sólidos tiene que ser mayor o igual al recíproco de la tasa de crecimiento, ya que se busca garantizar que la población de los microorganismos se mantenga constante y principalmente que no se abata o se “lave” a lo largo de los ciclos. Así podemos determinar la carga orgánica y la relación de FORSU : digestato necesaria para los TRH y TRS definidos.

3.3.2 Ejemplos con diferentes parámetros de operación

Caso n=4,  $\Delta t=1$  d, TRS= 24 d, f biodegradable= 0.1



**Figura 3.3** Esquema 2 de reactor semicontinuo (con respecto a la masa unitaria)

Caso específico de sistema semicontinuo n=1(batch o discontinuo por lotes),  $\Delta t=12$  d, TRS= 24 d, f biodegradable= 0.1

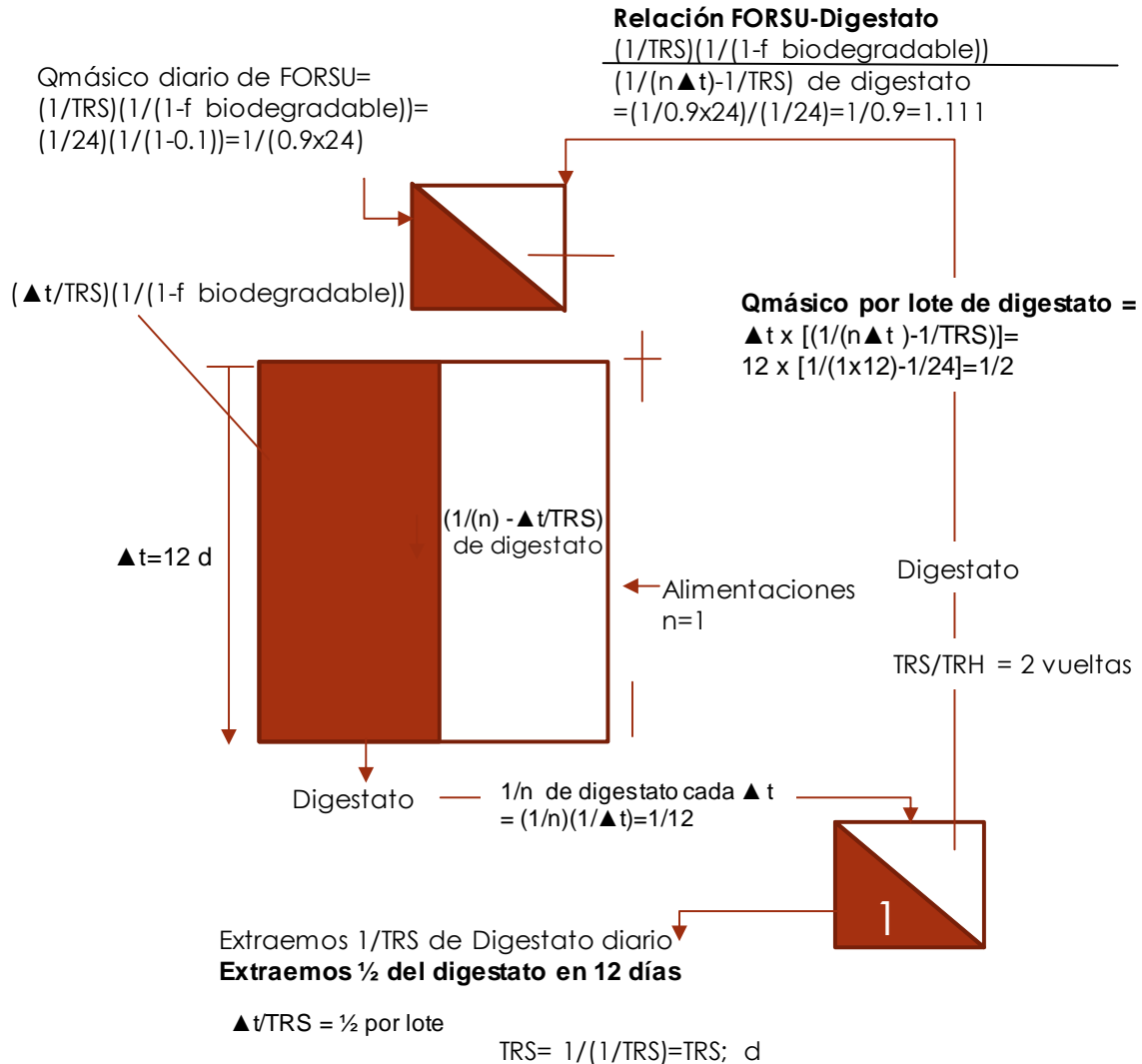


Figura 3.4 Esquema 3 de reactor semicontinuo caso específico discontinuo o por lotes

En sistemas de este tipo la alimentación al reactor se hace cíclicamente en un periodo más largo usualmente de 4 semanas. Al final de dicho periodo se retira toda la materia dentro del reactor para devolver posteriormente la mitad al reactor como inóculo del siguiente lote de sustrato de residuos. La bibliografía marca que típicamente en este tipo de reactores la relación FORSU-inóculo (digestato) es de 1:1 para formar el sustrato. Se hace la mezcla de los residuos con el sustrato y después se vuelve a dejar la materia descomponer en otro ciclo de 28 días.

Podemos entonces concluir que mientras los tiempos de residencia son bastante similares, su operación es distinta.



### 3.4 Diseño de una planta en Coyoacán

El objetivo de este proyecto es dimensionar una planta de tratamiento anaerobio de sistema semicontinuo para tratar una fracción de los residuos sólidos urbanos que se generan en la Ciudad de México. Es ambicioso el proyecto ya que no existe una planta de digestión anaerobia de estas características instalada en la ciudad. Particularmente, las dimensiones de la planta se calculan con base en la FORSU que se genera en la alcaldía Coyoacán.

Se utilizarán los datos de la tesis para doctorado de Rosalinda Campuzano, de la Universidad Nacional Autónoma de México, para comprobar el procedimiento de dimensionamiento, ya que esa es una fuente fidedigna disponible sobre la FORSU generada en Coyoacán. Ella hizo una caracterización de la FORSU que llega a la estación de transferencia de Coyoacán, en el Anexo A se muestran los datos de esa planta de transferencia. De acuerdo con el último inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México (GDF, 2014), solo 3 estaciones tienen una eficiencia mayor al 78 % en la recolección separada de los RSU, entre ellas Coyoacán.

#### 3.4.1 Datos de la FORSU a tratar

El muestreo se llevó a cabo con base en la Norma mexicana NMX-AA-015-1985 que establece el método de cuarteo para tomar una muestra representativa. El día seleccionado para realizarlo correspondió a un día destinado a la recolección de residuos orgánicos, por lo que no fue necesario realizar separación de fracciones de acuerdo con la Norma NMX-AA-022-1985. Diariamente entran a descargar a la estación entre 380 y 450 camiones, de este total se consideraron 50 camiones como universo para realizar el muestreo. A 15 camiones seleccionados aleatoriamente se les pidió que descargaran parte de los residuos en el piso para poder tomar una muestra de entre 80 y 120 kg por cada camión. La densidad de la FORSU muestreada fue de 641.3 kg/m<sup>3</sup> (Campuzano, 2015).

De acuerdo a datos del inventario de residuos sólidos de la CDMX, mencionados en el capítulo 1.1.3, en 2016, sólo de Coyoacán, se enviaron 95,866 toneladas de residuos orgánicos a la planta de composta, de los cuales 90,880 son residuos orgánicos combinados y 4,986 son residuos exclusivamente de poda (SEDEMA, 2017). Se considerará que se tratarán 100,000 ton por año de FORSU en tres plantas de un digestor anaerobio seco para que entre las tres tenga la capacidad de tratar lo que se genera, cerca de 96,000 ton/año. Las capacidades se dividirán de la siguiente forma, dos de las tres plantas serán de capacidad de 40 000 toneladas al año, mientras que la tercera será de 20 000 toneladas al año. El tratamiento de la fuente dice que se agregará 25% de la masa, después del pretratamiento, de residuos de poda, sin embargo, en la Ley de Residuos Sólidos de México, se admiten residuos de poda en la recolección de residuos orgánicos, por lo que ya no se añadirá ningún porcentaje de la masa. La consistencia ya es la adecuada.

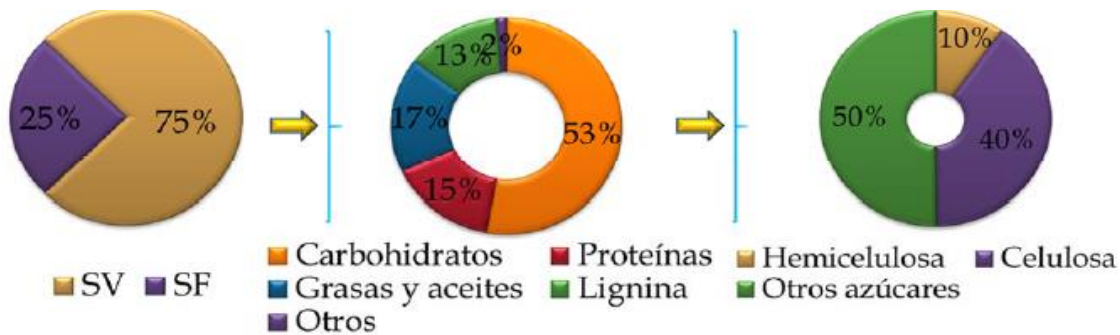
La digestión ocurrirá a condiciones mesofílicas de temperatura y con un porcentaje de humedad de 70%, es decir un contenido de ST de 30%, que son los datos recopilados de la caracterización de la muestra de FORSU. También se determinó que aproximadamente el 75% de los sólidos totales corresponde a materia orgánica, SV. Es decir, se midieron 223 gramos de SV por cada kg de FORSU. Los residuos presentaron una relación DQO/SV=1.37 (Campuzano, 2015).

Se hizo una caracterización de la composición bromatológica de la FORSU en la misma tesis. En la figura 3.5 y en la tabla 3.1 se presenta la distribución de macromoléculas que constituyen la parte orgánica de la FORSU (sólidos volátiles). Los compuestos con mayor presencia (53%SV) son los carbohidratos, de los cuales la mitad corresponden a celulosa y hemicelulosa (26.5%SV) que al ligarse con la lignina forman el complejo lignocelulósico que representa aproximadamente el 40% de los SV. Esto significa que, de cada kg de FORSU, 135 gramos son realmente aprovechables por los microorganismos responsables de la producción de biogás, mientras que los otros 90 gramos que completan los sólidos volátiles son material de difícil aprovechamiento para la producción de biogás. El contenido de proteínas y grasas fue similar, con el 15 y 17%SV, respectivamente. Únicamente 2% de los SV no fue identificado.

**Tabla 3.1** Caracterización de la FORSU

| <b>Parámetro</b>   | <b>Valor</b> | <b>Unidades</b>     |
|--------------------|--------------|---------------------|
| Humedad            | 70 ± 0.4     | %                   |
| Sólidos totales    | 297 ± 4.0    | g/kg                |
| Sólidos volátiles  | 223 ± 4.1    | g/kg                |
| Sólidos fijos      | 75 ± 0.5     | g/kg                |
| DQO                | 304 ± 11.4   | gO <sub>2</sub> /kg |
| Carbohidratos      | 118 ± 6.9    | g/kg                |
| Fibras crudas      | 88 ± 0.4     | g/kg                |
| Grasas y aceites   | 39 ± 3.9     | g/kg                |
| Proteínas          | 34 ± 0.8     | g/kg                |
| Lignina            | 30 ± 1.9     | g/kg                |
| Celulosa           | 47 ± 1.9     | g/kg                |
| Hemicelulosa       | 12 ± 0.2     | g/kg                |
| Nitrógeno Kjeldahl | 5.4 ± 0.1    | g/kg                |
| Fósforo total      | 1.8 ± 0.05   | g/kg                |

Referencia: (Campuzano, 2015)



**Figura 3.5** Distribución de los compuestos orgánicos de la FORSU  
Referencia: (Campuzano, 2015)

### 3.4.2 Datos de operación del sistema

La operación del sistema es semicontinua, con una alimentación por lotes diaria. Se propone un TRH de 4 días, basado en las observaciones de operación, de 2 a 4 días, de (De Baere, 2010), es decir, el material recorre todo el reactor en 4 días. En la operación, cada día se remueve una cuarta parte del total del reactor. Una parte será tratada como sub producto de la digestión anaerobia en un compostaje para convertirlo en un fertilizante mejorador de suelos y parte será devuelto al reactor como inóculo, para el siguiente lote.

El tiempo de residencia de sólidos será de 20 días ya que es el tiempo que la bibliografía, descrita a detalle en los antecedentes, capítulo 1.3.3 Parámetros de la digestión anaerobia, marca como necesario para que los microorganismos limitantes, arquea metanogénicas acetoclásticas, se alcancen a duplicar. Morí et. al, en el 2012, publicaron que el TRS mínimo necesario para que estos microorganismos se alcancen a duplicar es de 20 días. También De Baere en el 2010 en sus observaciones de operación de reactores semicontinuos marca que el tiempo de residencia promedio de sólidos es de 20 días.

El pretratamiento por el que pasará la FORSU será sencillo puesto que el tipo de reactor seleccionado, de digestión seca y operación semicontinua, admite concentraciones mayores de objetos inertes. En el capítulo de antecedentes, 1.2 Pretratamiento, se observa que la configuración de tren de pretratamiento que menos material de rechazo produce, conservando la mayor parte del potencial de producción de metano, es el tren trituradora-criba-mezcladora (*pulper*). La criba admitirá partículas menores a 50 mm (CEPA, 2008). Adicionalmente, se instalará, una banda magnética para separación de metales tanto ferrosos como no ferrosos. Se considerará un rechazo del 8% de peso húmedo (Bernstad et al., 2013). Según esta fuente, los problemas de mantenimiento que presenta ese tren de tratamiento son bajos y no hay problemas de calidad del sustrato.

#### -Equipo de pretratamiento

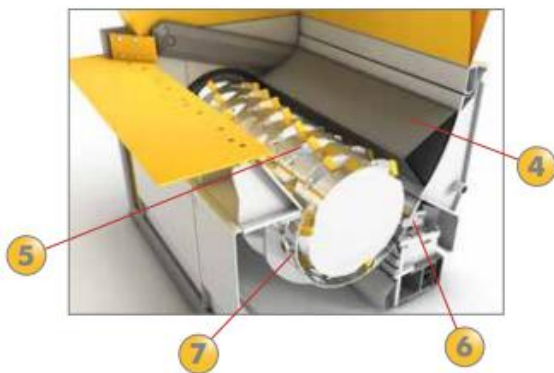
Primero los residuos orgánicos separados en fuente que llegan a la planta tienen que ser depositados por los camiones transportadores en una bodega. Ahí, esos residuos tienen que ser alimentados a la máquina trituradora por medio de un cargador frontal.

### Trituradora-Criba-Banda magnética:

Se hizo un análisis de los trituradores disponibles en la industria. Se consultó una tabla comparativa de trituradores disponibles en la industria realizada por la revista FuturEnviro en el 2015. De esa tabla se seleccionó el modelo que mejor se acopla a las necesidades de la planta. Este modelo tiene que ser capaz de tratar de tratar 40,000 ton/a, es decir, alrededor de 150 ton/d si solo se labora de lunes a viernes. Al trabajar 8 horas a la jornada la trituradora tiene que ser capaz de triturar 19 ton/hora. Esta trituradora además tiene que ser adecuada para tratar con RSU, por esos motivos se seleccionó la trituradora XR2000C de la marca UNTHA. Sus especificaciones son las siguientes (UNTHA, 2018), ver figura 3.6:

- Modelo: UNTHA XR2000C
- Tipo de trituración: Corte/ Shearing
- Potencia: 65-264 [kW]
- Potencia hidráulica: 7.5 [kW]
- Ancho de cámara de corte: 1960 [mm]
- Diámetro Rotor: 1000 [mm]
- Velocidad de rotación rotor: 0-35[rpm]
- Peso: 21 [ton]
- Rendimiento: 20 [ton/h]
- Tamaño de partícula en criba: Ajustable hasta 50 [mm]
- Banda magnética sobre cinta

Sistema de corte:



Durante el proceso de trituración el empujador interno, **4**, presiona el material contra el rotor, **5**, que esta equipado con cuchillas intercambiables de varias caras, ver figura 3.7. Una vez que el material queda atrapado en el rotor, se tritura contra la contracuchilla, **6**. Con ayuda de diferentes cribas, **7**, se determina el tamaño final de salida de las partículas trituradas, en este caso de 50 mm.

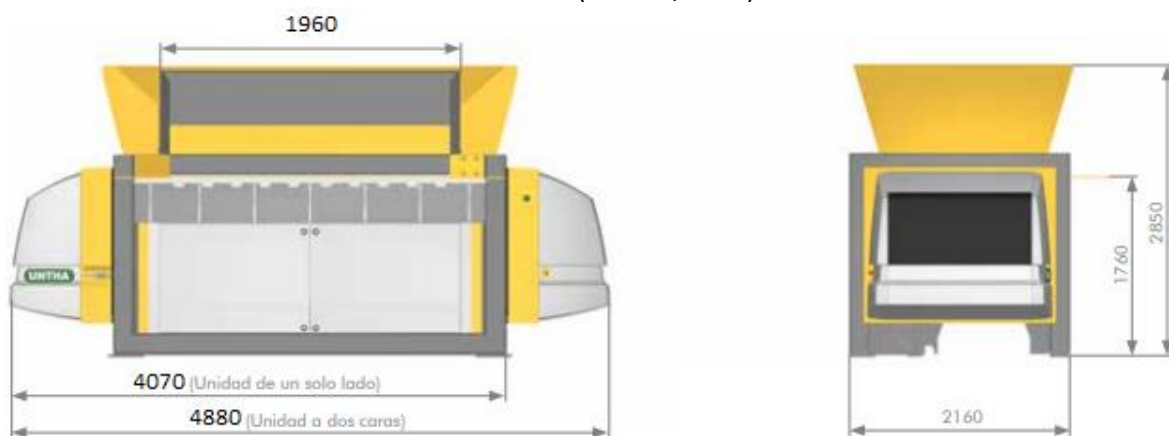
**Figura 3.6** Sistema de corte  
Referencia: (UNTHA, 2018)



**Figura 3.7** Vista acercamiento a cuchillas del rotor  
Referencia: (UNTHA, 2018)



**Figura 3.8** Equipos adicionales de la trituradora primaria  
Referencia: (UNTHA, 2018)



**Figura 3.9** Dimensiones de la trituradora primaria  
Referencia: (UNTHA, 2018)

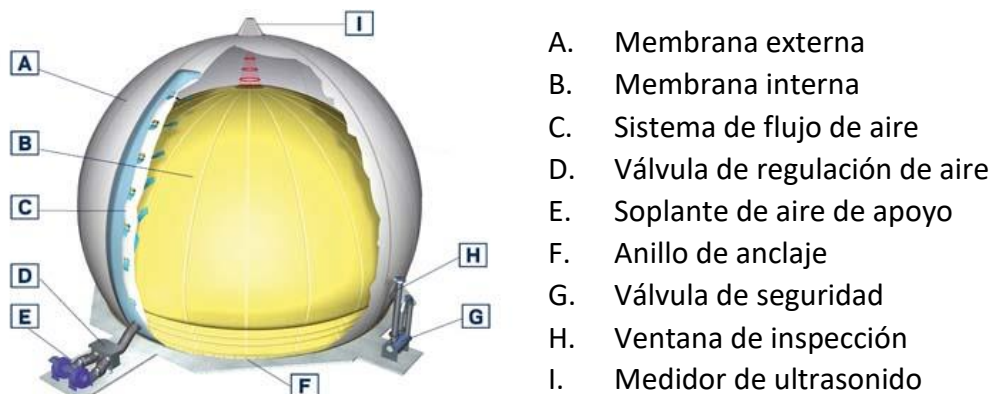
Posteriormente los residuos de tamaño de partícula 0-50 mm se transportan mediante una banda transportadora a la unidad de mezclado, inyección de vapor y mezclado. Esta unidad de mezclado cuenta con tornillos mezcladores donde se mezcla con el digestato procedente del reactor, que funciona como inóculo para este nuevo lote. En esta cámara de mezcla, se inyecta además una pequeña cantidad de vapor a baja presión para aumentar la temperatura de la mezcla a aproximadamente 48-55°C. Este vapor será suministrado por la unidad CHP que produzca energía térmica a partir del biogás generado en el reactor. A continuación, la mezcla será bombeada a la parte superior del reactor por medio de una

bomba de concreto de pistones, una marca comúnmente utilizada es Putzmeister. Se utilizarán 3 tuberías para depositar el material en la parte superior del reactor.

*-Equipo de almacenamiento de biogás*

Para definir el potencial bioquímico de metano de la FORSU que trata el reactor se estudiaron las conclusiones que hace Campuzano, en 2015, en su tesis de doctorado, en donde, operando los reactores por lote durante 21 días, la producción de metano por vía húmeda es de 541 NL/kgSV, ligeramente superior a la producción de metano por vía seca, de 530 NL/kgSV. En ese mismo documento se reporta una constante en la cantidad de metano presente en el biogás generado de 60%, por lo que es ese contenido de metano el que se toma para el dimensionamiento de la planta de digestión anaerobia en este trabajo.

El biogás generado en el digestor se almacenará en un gasómetro de doble membrana con forma de  $\frac{3}{4}$  de esfera es un depósito de gas externo que se utiliza en todas las plantas de digestión anaerobia con esta tecnología. La marca que se eligió fue Sattler, está compuesto por una membrana exterior, así como por una membrana interior y una membrana de fondo que constituyen el espacio de almacenamiento para el biogás. La medición del nivel de llenado o del volumen de biogás almacenado en el gasómetro, se lleva a cabo bien, mediante un sistema de medición con ultrasonido o a través de la medición por longitud. Las tres membranas, están sujetas mediante un anillo de anclaje, de forma permanente y hermética. Una válvula de seguridad de accionamiento hidráulica, asegura que el gasómetro de doble membrana no sufra ningún daño, en caso de que haya una sobrepresión de biogás. Ver figura 3.10.



**Figura 3.10** Gasómetro de doble membrana Sattler

*-Equipo de generación de energía*

En cuanto a la generación de energía eléctrica se seleccionaron generadores de electricidad en unidades de cogeneración de electricidad y calor de la marca Wolf Power Systems, ver figura 3.11. Para las plantas 1 y 2 que tratarán cada una 40,000 ton/año de residuos, se instalarán 2 generadores de capacidad de 1 MW de energía eléctrica y 979 kW de energía térmica en cada planta. La marca de los motores es MWM. Las dimensiones en metros son de 5.500 de largo x 1.800 de ancho x 2.500 de altura cada unidad combinada. Para la planta



3, que trabaja con 20, 000 ton/año, se utilizarán 2 generadores de capacidad de 530 kW de energía eléctrica y 557 kW de energía térmica. Las dimensiones de estos generadores, en metros, son de 4.270 de largo x 1.693 de ancho x 2.528 de altura. Estos generadores se obtuvieron del catálogo de la marca especializado de generadores que trabajan con biogás.

Según el Dr. Luis Felipe Dornfeld en su presentación “Retos y oportunidades de la Biodigestión de la fracción orgánica de los residuos urbanos” para el Foro Internacional de Valorización Energética de Residuos Urbanos en México, 2018, cada tonelada de FORSU de Brasil da aproximadamente 100 Nm<sup>3</sup> de biogás con un contenido de metano alrededor de 55%. A su vez, 1 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> produce aproximadamente 9.97≈10 kWh. Los generadores de energía eléctrica y térmica combinada tienen una eficiencia eléctrica máxima de 40%.

$$1 \text{ ton FORSU} = 55 \text{ m}^3 \text{CH}_4 = 550 \text{ kWh de } E_{input} = 220 \text{ kWh } E_{elec}.$$

$$40 \text{ 000 ton FORSU} = 8,800 \text{ MWh } E_{elec}.$$


En los datos registrados de la caracterización de la FORSU de la Ciudad de México hecha en el Instituto de Ingeniería por (Campuzano, 2016) se registra, un contenido de ST de 30%, un contenido de SV de la FORSU de 75% de ST y una producción de metano de 530 NL/kgSV. En el pretratamiento se rechaza el 8 % del sustrato. Por lo que tenemos:

$$1 \text{ ton FORSU} = 207 \text{ Kg de SV} = 109.71 \text{ m}^3 \text{CH}_4 = 438.8 \text{ kWh } E_{elec}.$$

$$40 \text{ 000 ton FORSU} = 17,552 \text{ MWh } E_{elec}.$$

Podemos concluir que la producción de metano por kgSV registrada por Campuzano para la FORSU de la CDMX es cercana al doble de la registrada por Dornfeld, por eso se duplica la cantidad de energía eléctrica producida. Como se vio en los antecedentes, la producción de metano varía mucho en la FORSU registrada en la bibliografía por varios factores.

Sin embargo, se comparó la capacidad eléctrica de esta planta, 2 generadores de 1MWe cada uno, con una referencia de la industria, la planta de Twence, Hengelo en los Países Bajos, en donde se tratan 50,000 ton/año y se usan dos generadores de 1.2 MWe (Mattheeus, 2012), podemos concluir que, aunque es considerablemente mayor la producción de metano de la CDMX comparada con la registrada por Dornfeld, hay plantas en la industria que manejan valores similares y que se seleccionaron los generadores adecuados.

|  | Module type | Engine manufacturer | Make          | Electrical output in kW | Max. thermal output in kW | Energy input in kW | Dimensions [LxWxH in mm] |
|---|-------------|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 400 B   | MWM                 | TCG 2016C V8  | 400                     | 378                       | 938                | 3.000 x 1.450 x 2.200    |
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 530 B   | MAN                 | E 3262 LE 212 | 530                     | 557                       | 1.319              | 4.270 x 1.693 x 2.528    |
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 600 B   | MWM                 | TCG 2016C V12 | 600                     | 569                       | 1.408              | 3.700 x 1.450 x 2.200    |
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 800 B   | MWM                 | TCG 2016C V16 | 800                     | 756                       | 2.873              | 4.000 x 1.500 x 2.200    |
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 1.000 B | MWM                 | TCG 2020 V12  | 1.000                   | 979                       | 2.356              | 5.500 x 1.800 x 2.500    |
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 1.200 B | MWM                 | TCG 2020 V12  | 1.200                   | 1.148                     | 2.800              | 5.500 x 1.800 x 2.500    |
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 1.560 B | MWM                 | TCG 2020 V16  | 1.560                   | 1.519                     | 3.677              | 6.300 x 1.800 x 2.500    |
| WOLF POWER SYSTEMS  | GTK 2.000 B | MWM                 | TCG 2020 V20  | 2.000                   | 1.936                     | 4.663              | 7.300 x 1.800 x 2.600    |

**Figura 3.11** Catálogo de Wolf Power Systems de unidades CHP

**Tabla 3.2** Datos de entrada a las plantas 1 y 2 de digestión anaerobia de Coyoacán

| <b>Entrada</b>               |                    |                                  |                   |
|------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|
| <b>Datos</b>                 |                    | <b>Potencial y VCI de metano</b> |                   |
| Tipo                         | Cantidad (t/año)   | Nm <sup>3</sup> /t SV            | 530 <sup>1</sup>  |
| FORSU + Residuo de poda      | 40,000             | Metano/Biogás                    | 60 % <sup>1</sup> |
| <b>Caracterización</b>       |                    | MWh/Nm <sup>3</sup>              | 0.01              |
| Clasificación                | Proporción de ST   | <b>Densidad del biogás</b>       |                   |
| Materia orgánica             | 75% <sup>1</sup>   | t/Nm <sup>3</sup>                | 1.20E-03          |
| Vidrio                       | 3% <sup>2</sup>    | <b>Planta CHP</b>                |                   |
| Metales                      | 2% <sup>2</sup>    | Eficiencia elec.                 | 42.00%            |
| Plásticos                    | 14% <sup>2</sup>   | Eficiencia térmica               | 70.95%            |
| Otros inertes                | 6% <sup>2</sup>    | % E eléctrica                    | 42.00%            |
| <b>Total</b>                 | 100%               | %E térmica                       | 41.15%            |
| ST                           | 30% <sup>1</sup>   | % pérdidas                       | 16.85%            |
| Humedad                      | 70% <sup>1</sup>   |                                  |                   |
| Densidad (t/m <sup>3</sup> ) | 0.641 <sup>1</sup> |                                  |                   |

<sup>1</sup> Fuente: Campuzano, 2015.

<sup>2</sup> Fuente: Durán, 2013.

**Tabla 3.3** Datos de entrada a la planta 3 de digestión anaerobia de Coyoacán

| <b>Entrada</b>               |                    |                                  |                   |
|------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|
| <b>Datos</b>                 |                    | <b>Potencial y VCI de metano</b> |                   |
| Tipo                         | Cantidad (t/año)   | Nm <sup>3</sup> /t SV            | 530 <sup>1</sup>  |
| FORSU + Residuo de poda      | 20,000             | Metano/Biogás                    | 60 % <sup>1</sup> |
| <b>Caracterización</b>       |                    | MWh/Nm <sup>3</sup>              | 0.01              |
| Clasificación                | Proporción de ST   | <b>Densidad del biogás</b>       |                   |
| Materia orgánica             | 75% <sup>1</sup>   | t/Nm <sup>3</sup>                | 1.20E-03          |
| Vidrio                       | 3% <sup>2</sup>    | <b>Planta CHP</b>                |                   |
| Metales                      | 2% <sup>2</sup>    | Eficiencia elec.                 | 44.54%            |
| Plásticos                    | 14% <sup>2</sup>   | Eficiencia térmica               | 84.38%            |
| Otros inertes                | 6% <sup>2</sup>    | % E eléctrica                    | 44.54%            |
| <b>Total</b>                 | 100%               | %E térmica                       | 46.80%            |
| ST                           | 30% <sup>1</sup>   | % pérdidas                       | 8.66%             |
| Humedad                      | 70% <sup>1</sup>   |                                  |                   |
| Densidad (t/m <sup>3</sup> ) | 0.641 <sup>1</sup> |                                  |                   |

<sup>1</sup> Fuente: Campuzano, 2015.

<sup>2</sup> Fuente: Durán, 2013.



### 3.4.3 Datos de salida de las plantas 1 y 2 de digestión anaerobia

Los resultados que arroja el dimensionamiento de las plantas 1 y 2 son los siguientes: Para cada planta, el volumen mínimo requerido del digestor fue de 3,150 m<sup>3</sup>. 7,314,000 Nm<sup>3</sup> de biogás se espera que se generen al año, así mismo se producirán 4,388,400 Nm<sup>3</sup> de metano. La planta CHP generadora de energía térmica y eléctrica necesitará de una capacidad mínima de 2 MW de potencia eléctrica y entregará al año 17,500 MWh de electricidad. También se producirán 17,150 MWh de calor.

| Salida           |                                  |          |                      |
|------------------|----------------------------------|----------|----------------------|
| <b>Productos</b> | Vol. Digestor                    | 3150     | m <sup>3</sup>       |
|                  | Biogás                           | 7314000  | Nm <sup>3</sup> /año |
|                  | Biogás                           | 8776.80  | ton/año              |
|                  | Fertilizante                     | 3169.10  | ton/año              |
| <b>Energía</b>   | Producción de calor bruta        | 17155.77 | MWh(t)/año           |
|                  | Producción de electricidad bruta | 17509.72 | MWh(e)/año           |
|                  | Capacidad térmica                | 1.96     | MW(t)                |
|                  | Capacidad eléctrica              | 2.00     | MW(e)                |
|                  | Pérdidas                         | 7024.31  | MWh/año              |
| <b>Residuos</b>  | Agua a tratamiento especial      | 2720.81  | ton/año              |
|                  | Agua residual                    | 18964.18 | ton/año              |
|                  | Residuos a RS, de pretratamiento | 3020     | ton/año              |
|                  | Residuos a RS, de compostaje     | 3169.10  | ton/año              |
|                  | Metal reciclado                  | 180      | ton/año              |

Al comparar el tamaño del digestor calculado con otros digestores de la industria que utilizan la misma tecnología, nos damos cuenta que el dimensionamiento se hizo de manera correcta, ya que para la misma capacidad del digestor de 40,000 ton/año reportan un volumen similar a 3150 m<sup>3</sup>. Se observa en la siguiente tabla 3.4.

Tabla 3.4 Volúmenes de reactores en la industria de capacidad cercana a 40 000 ton/año

| Ubicación:               | Capacidad de la planta [ton/año]: | Tipo de residuos: | Volumen de reactor [m <sup>3</sup> ]: | Fecha de inicio: |
|--------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------|
| Roma, Italia             | 40 000                            | FORSU             | 3 200                                 | 2003             |
| Tenneville, Bélgica      | 39 000                            | Bioresiduos       | 3 150                                 | 2009             |
| Hengelo, Países Bajos    | 50 000                            | Bioresiduos       | 3 450                                 | 2011             |
| Wijster II, Países Bajos | 40 000                            | Bioresiduos       | 2 630                                 | 2013             |
| North Yorkshire, UK      | 40 000                            | FORSU             | 3 150                                 | 2017             |
| Beerse, Bélgica          | 35 000                            | Bioresiduos       | 2 775                                 | 2018             |
| Este trabajo             | 40 000                            | FORSU             | 3150                                  | N.A.             |

Referencias: <http://www.ows.be/biogas-plants/references/?dranco=ref-householdwaste-dranco>

### 3.4.4 Datos de salida de la planta 3 de digestión anaerobia

Los resultados que arroja el dimensionamiento de la planta 3 son los siguientes: el volumen mínimo requerido del digestor fue de 1,570 m<sup>3</sup>, 3,657,000 Nm<sup>3</sup> de biogás se espera que se generen al año, así mismo se producirán 2,194,200 Nm<sup>3</sup> de metano. La planta CHP generadora de energía térmica y eléctrica necesitará de una capacidad mínima de 1.06 MW de potencia eléctrica y entregará al año 9,280 MWh de electricidad. También se producirán 9,755 MWh de calor.

| Salida           |                                  |         |                      |
|------------------|----------------------------------|---------|----------------------|
| <b>Productos</b> | Vol. Digestor                    | 1570    | m <sup>3</sup>       |
|                  | Biogás                           | 3657000 | Nm <sup>3</sup> /año |
|                  | Biogás                           | 4388.40 | ton/año              |
|                  | Fertilizante                     | 1584.55 | ton/año              |
| <b>Energía</b>   | Producción de calor bruta        | 9754.82 | MWh(t)/año           |
|                  | Producción de electricidad bruta | 9284.32 | MWh(e)/año           |
|                  | Capacidad térmica                | 1.11    | MW(t)                |
|                  | Capacidad eléctrica              | 1.06    | MW(e)                |
|                  | Pérdidas                         | 1805.76 | MWh(t)/año           |
| <b>Residuos</b>  | Agua a tratamiento especial      | 1360.41 | ton/año              |
|                  | Agua residual                    | 9482.09 | ton/año              |
|                  | Residuos a RS, de pretratamiento | 1510    | ton/año              |
|                  | Residuos a RS, de compostaje     | 1584.55 | ton/año              |
|                  | Metal reciclado                  | 90      | ton/año              |

Al comparar el tamaño del digestor calculado con otros digestores de la industria que utilizan la misma tecnología, nos damos cuenta que el dimensionamiento se hizo de manera correcta, ya que para la misma capacidad del digestor de 20,000 ton/año reportan un volumen similar a 1500 m<sup>3</sup>. Se observa en la siguiente tabla 3.5.

Tabla 3.5 Volúmenes de reactores en la industria de capacidad cercana a 20 000 ton/año

| Ubicación:                     | Capacidad de la planta [ton/año]: | Tipo de residuos:             | Volumen de reactor [m <sup>3</sup> ]: | Fecha de inicio: |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Bergheim-Siggerwiesen, Austria | 20 000                            | Bioresiduos                   | 1 800                                 | 1993             |
| Kaiserslauten, Alemania        | 20 000                            | FORSU                         | 1 500                                 | 1999             |
| Vitoria España                 | 20 000                            | FORSU                         | 1 770                                 | 2006             |
| Kempton, Alemania              | 18 000                            | Bioresiduos y residuos verdes | 1 200                                 | 2009             |
| Leszno, Polonia                | 26 000                            | FORSU                         | 1 990                                 | 2010             |

Referencias: <http://www.ows.be/biogas-plants/references/?dranco=ref-householdwaste-dranco>

3.4.5 Hoja de cálculo del procedimiento para Plantas 1 y 2

|                                    |                 |                    |  |                           |
|------------------------------------|-----------------|--------------------|--|---------------------------|
| Eficiencia Pretratamiento          |                 | 92.00%             |  | Pretratamiento y mezclado |
| Material de rechazo                | 3200            | ton/año            | Residuos Pretratamiento                              |                           |
| Reciclaje metales                  | 75%             |                    |  |                           |
| Metal reciclado                    | 180             | ton/año            |  |                           |
| Desechos a relleno                 | 3020            | ton/año            |  |                           |
|                                    |                 |                    |  |                           |
| FORSU                              | 36800           | ton/año            | Sustrato después de pretratamiento                   |                           |
| Agua                               | 25760           | ton/año            |  |                           |
| %Orgánicos que pasa pretratamiento | 92.00%          |                    |  |                           |
| Orgánicos                          | 8280.0          | ton/año            |  |                           |
| Otros                              | 2760.0          | ton/año            |  |                           |
| Humedad                            | 70.00%          |                    |  |                           |
| Densidad Residuos secos            | 0.349           | ton/m <sup>3</sup> |  |                           |
| Densidad total                     | 0.641           | ton/m <sup>3</sup> |  |                           |
|                                    |                 |                    |  |                           |
| Porcentaje de poda a agregar       | 0%              |                    | Mezclado con residuo de poda y agua                  |                           |
| Residuo de poda complementario     | 0               | ton/año            |  |                           |
| Humedad del residuo de poda        | 50%             |                    |  |                           |
| Densidad residuo de poda húmedo    | 0.255           | ton/m <sup>3</sup> |  |                           |
| Humedad actual                     | 70.00%          |                    |  |                           |
| Humedad deseada                    | 70.0%           |                    |  |                           |
| Agua a agregar                     | 0.00            | ton/año            |  |                           |
|                                    |                 |                    |  |                           |
| Agua                               | 25760.00        | ton/año            | Características del sustrato a introducir al reactor |                           |
| Orgánicos                          | 8280.00         | ton/año            |  |                           |
| Otros                              | 2760.00         | ton/año            |  |                           |
| Humedad                            | 70.0%           |                    |  |                           |
| Densidad                           | 0.641           | ton/m <sup>3</sup> |  |                           |
| <b>Total a mezclar</b>             | <b>36800.00</b> | <b>ton/año</b>     |  |                           |

|                               |              |                      |                          |           |
|-------------------------------|--------------|----------------------|--------------------------|-----------|
| V biogás                      | 7314000      | Nm <sup>3</sup> /año | Biogás producido         | Digestión |
| T biogás                      | 8776.80      | ton /año             |                          |           |
|                               |              |                      |                          |           |
| T digestato                   | 28023.20     | ton /año             | Digestato                |           |
| Humedad digestato             | 91.92%       |                      |                          |           |
|                               |              |                      |                          |           |
| TRC                           | 20           | Días                 | Volumen Digestor         |           |
| V sustrato                    | 3145.77      | m <sup>3</sup>       |                          |           |
| Tasa extracción biogás        | 1.00         | Hora                 |                          |           |
| V biogás                      | 834.35       | m <sup>3</sup>       |                          |           |
| V total                       | 3980.12      | m <sup>3</sup>       |                          |           |
|                               |              |                      |                          |           |
| Número de digestores          | 1            | Unidades             | Dimensionamiento reactor |           |
| Volumen por digestor          | <b>3150</b>  | m <sup>3</sup>       |                          |           |
| Altura máxima de reactor      | <b>17.5</b>  | m                    |                          |           |
| Superficie del reactor        | 180.00       | m <sup>2</sup>       |                          |           |
| Diámetro                      | <b>15.14</b> | m                    |                          |           |
| Número esferas de biogás      | 1.00         | Unidades             |                          |           |
| Volumen esfera                | 840.00       | m <sup>3</sup>       |                          |           |
|                               |              |                      |                          |           |
| TRH                           | 4            | Días                 | Operación del reactor    |           |
| Volumen a manejar por día     | 787.5        | m <sup>3</sup>       |                          |           |
| Volumen a disposición por día | 150          | m <sup>3</sup>       |                          |           |

|                      |             |                      |   |                                  |
|----------------------|-------------|----------------------|---|----------------------------------|
| V metano             | 4388400     | Nm <sup>3</sup> /año | Energía bruta<br>producida eléctrica y<br>térmica | <b>Generación de<br/>energía</b> |
| Energía por el total | 41689.8     | MWh/año              |   |                                  |
| Energía input        | 4.76        | MW                   |   |                                  |
| Energía elec.        | 17509.72    | MWh(e)/año           |   |                                  |
| Capacidad elec.      | <b>2.00</b> | MW                   |   |                                  |
| Energía térmica      | 17155.77    | MWh(t)/año           |   |                                  |
| Cap. Térmica         | <b>1.96</b> | MW                   |   |                                  |
| Pérdidas             | 7024.31     | MWh(t)/año           |   |                                  |

|                                    |                 |          |   |   |
|------------------------------------|-----------------|----------|---|---|
| T digestato                        | 28023.20        | ton /año | Características del<br>digestato a entrar a<br>deshidratación | <b>Deshidratación<br/>del digestato</b> |
| Humedad digestato                  | 91.92%          |          |   |   |
| Agua con químicos                  | 2802.32         | ton /año |   |   |
| Humedad digestato                  | 92.66%          |          |   |   |
| Material seco                      | 2263.20         | ton /año |   |   |
| Agua                               | 28562.32        | ton /año |   |   |
| Total a deshidratar                | 30825.52        | ton /año |   |   |
|                                    |                 |          |   |   |
| Humedad deseada                    | 60%             |          | Datos de la<br>deshidratación del<br>digestato                |   |
| Humedad del<br>efluente líquido    | 97%             |          |   |   |
|                                    |                 |          |   |   |
| Digestato en<br>efluente líquido   | 816.24          | ton /año | Características<br>efluente líquido                           |   |
| Agua en efluente<br>líquido        | 26391.89        | ton /año |   |   |
| Efluente líquido                   | <b>27208.13</b> | ton /año |   |   |
| Humedad EL                         | 97%             |          |   |   |
|                                    |                 |          |   |   |
| Material seco en<br>digestato seco | 1446.96         | ton /año | Características<br>digestato<br>deshidratado                  |   |
| Agua en digestato<br>seco          | 2170.43         | ton /año |   |   |
| Digestato seco                     | <b>3617.39</b>  | ton /año |   |   |
| Humedad DS                         | 60%             |          |   |   |

|   |                |          |  |            |
|---|----------------|----------|--|------------|
| Efluente líquido                          | 27208.13       | ton /año | Datos tratamiento de agua residual         | <b>TAR</b> |
| Porcentaje que se recircula               | 80%            |          |  |            |
| Porcentaje en lodos                       | 10%            |          |  |            |
| Porcentaje de agua a tratamiento especial | 10%            |          |  |            |
|   |                |          |  |            |
| Cantidad de agua recirculada              | 21766.50       | ton /año | Productos del tratamiento de agua residual |            |
| Cantidad de lodos                         | 2720.81        | ton /año |  |            |
| Cantidad de agua de tratamiento especial  | <b>2720.81</b> | ton /año |  |            |

|                              |                |          |                            |                   |
|------------------------------|----------------|----------|----------------------------|-------------------|
| Digestato seco               | 3617.39        | ton /año | Datos compostaje           | <b>Compostaje</b> |
| Lodos TAR                    | 2720.81        | ton /año |                            |                   |
| % de residuo de poda         | 0%             |          |                            |                   |
| Residuo de poda a agregar    | 0.00           | ton /año |                            |                   |
| Total a compostar            | 6338.20        | ton /año |                            |                   |
|                              |                |          |                            |                   |
| % convertido en fertilizante | 50%            |          | Producción de fertilizante |                   |
| Fertilizante                 | <b>3169.10</b> | ton /año |                            |                   |
| Residuos a RS                | 3169.10        | ton /año |                            |                   |

|   |                 |          |  |                                |
|---|-----------------|----------|--|--------------------------------|
| Agua a agregar en pretratamiento              | 0.00            | ton /año | Relación agua recirculada - Agua necesaria en el proceso | <b>Balance de masa de agua</b> |
| Agua a agregar en deshidratación de digestato | 2802.32         | ton /año |  |                                |
| Agua recirculada                              | 21766.50        | ton /año |  |                                |
| Déficit o superávit                           | Superávit       |          |  |                                |
| Agua de otra fuente a agregar                 | 0               | ton /año |  |                                |
| Agua a sistema de tratamiento                 | <b>18964.18</b> | ton /año |  |                                |

3.4.6 Diagrama de flujo del proceso

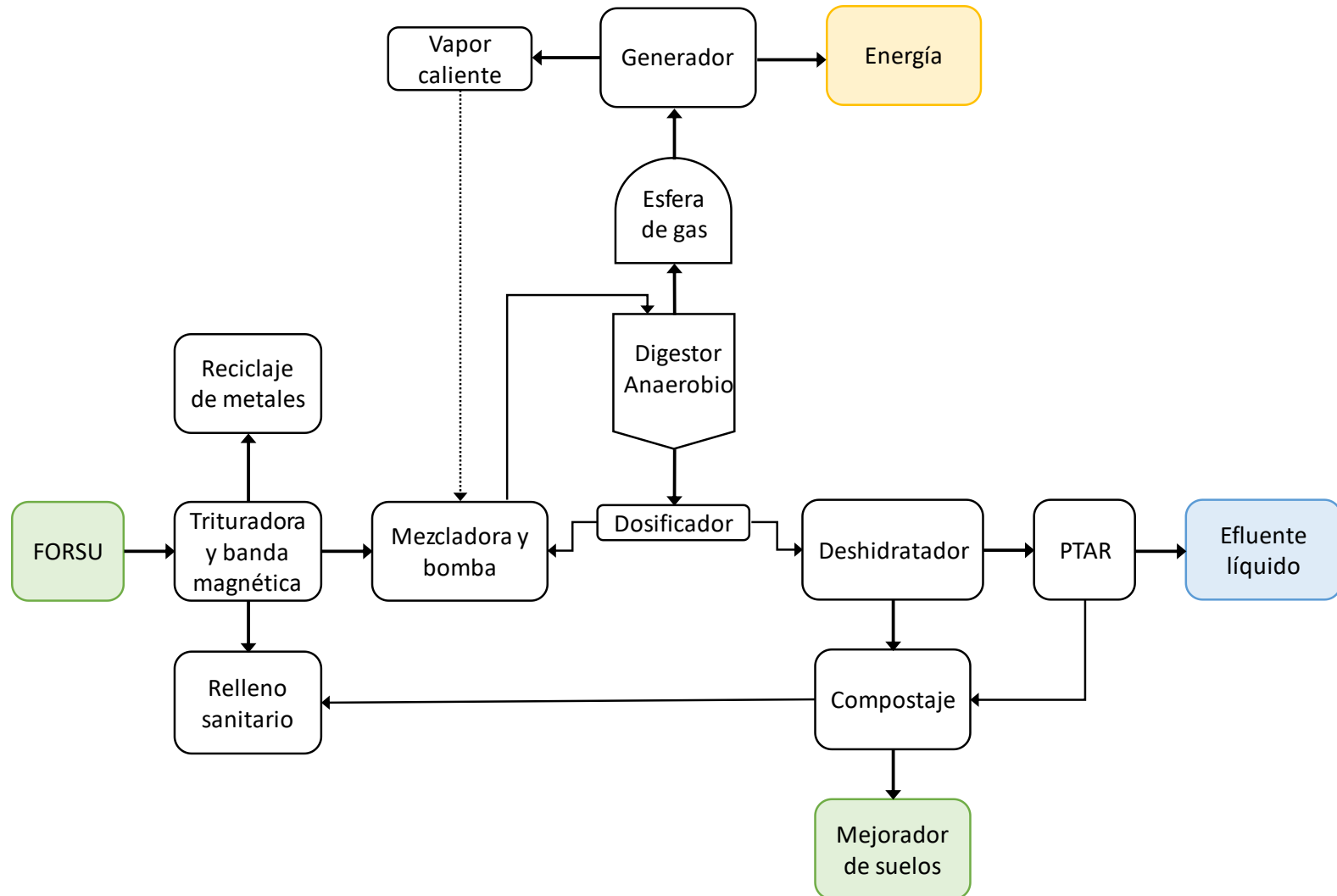


Figura 3.12 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento  
Referencia: (adaptado de Song et al., 2016)

### 3.4.7 Diagramas de flujo de cada etapa del procedimiento para las plantas 1 y 2

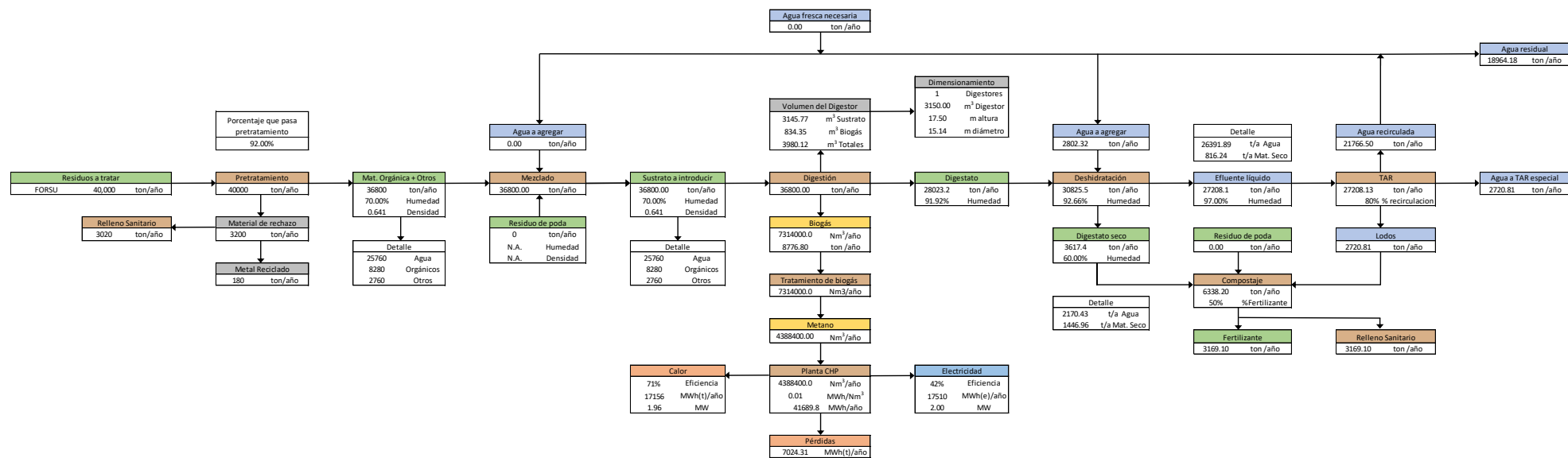
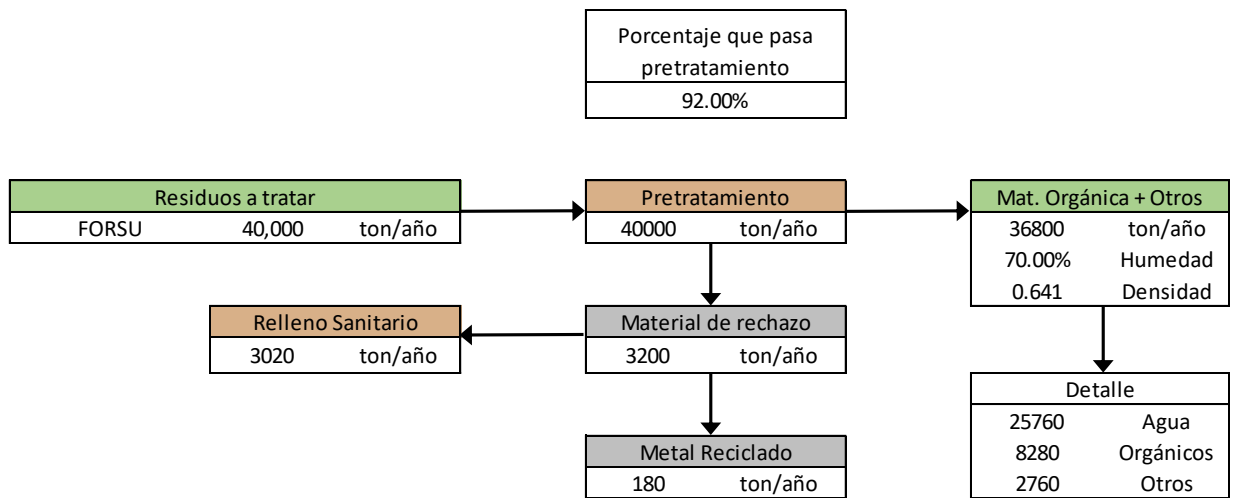


Figura 3.13 Diagrama de Flujo completo de las plantas 1 y 2 de tratamiento de Coyoacán  
Referencia: (Adaptado de Pierre-Marie, 2017)

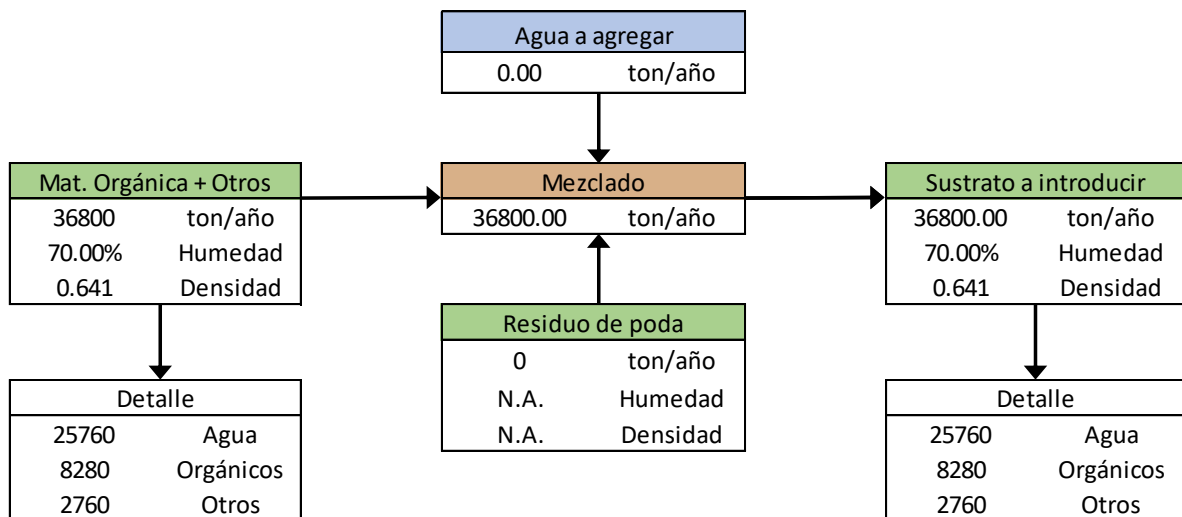


## Pretratamiento



**Figura 3.14** Diagrama de Flujo del pretratamiento de las plantas 1 y 2  
 Referencia: (Adaptado de Pierre-Marie, 2017)

## Mezclado



**Figura 3.15** Diagrama de Flujo del mezclado de las plantas 1 y 2  
 Referencia: (Adaptado de Pierre-Marie, 2017)

### Digestión y dimensionamiento

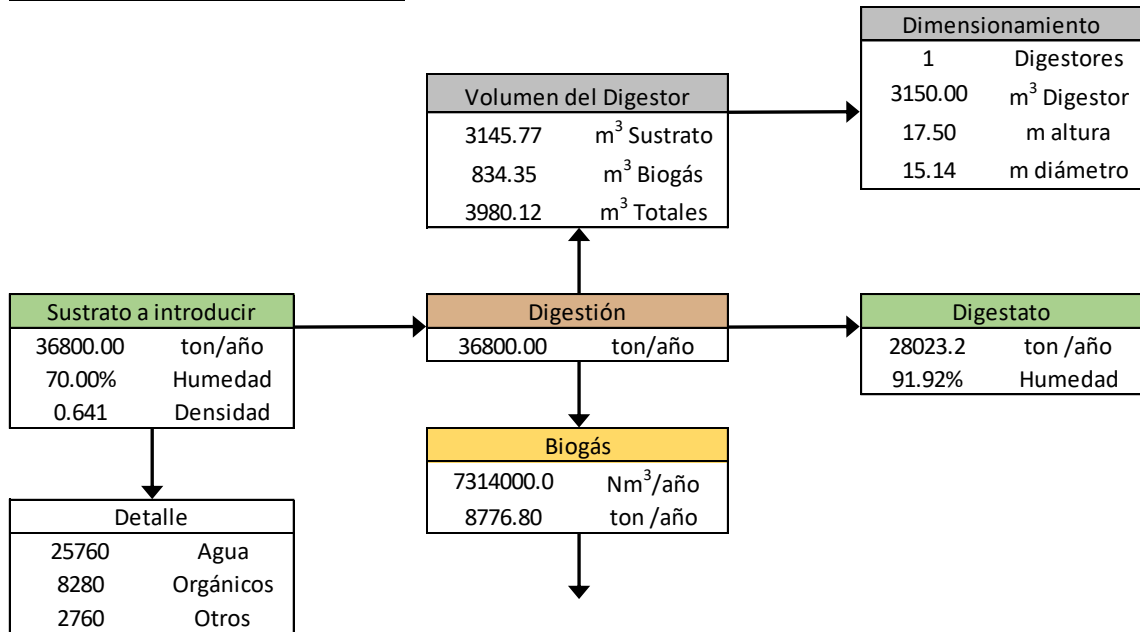


Figura 3.16 Diagrama de Flujo de la digestión de las plantas 1 y 2  
Referencia: (Adaptado de Pierre-Marie, 2017)

### Generación de energía eléctrica y térmica

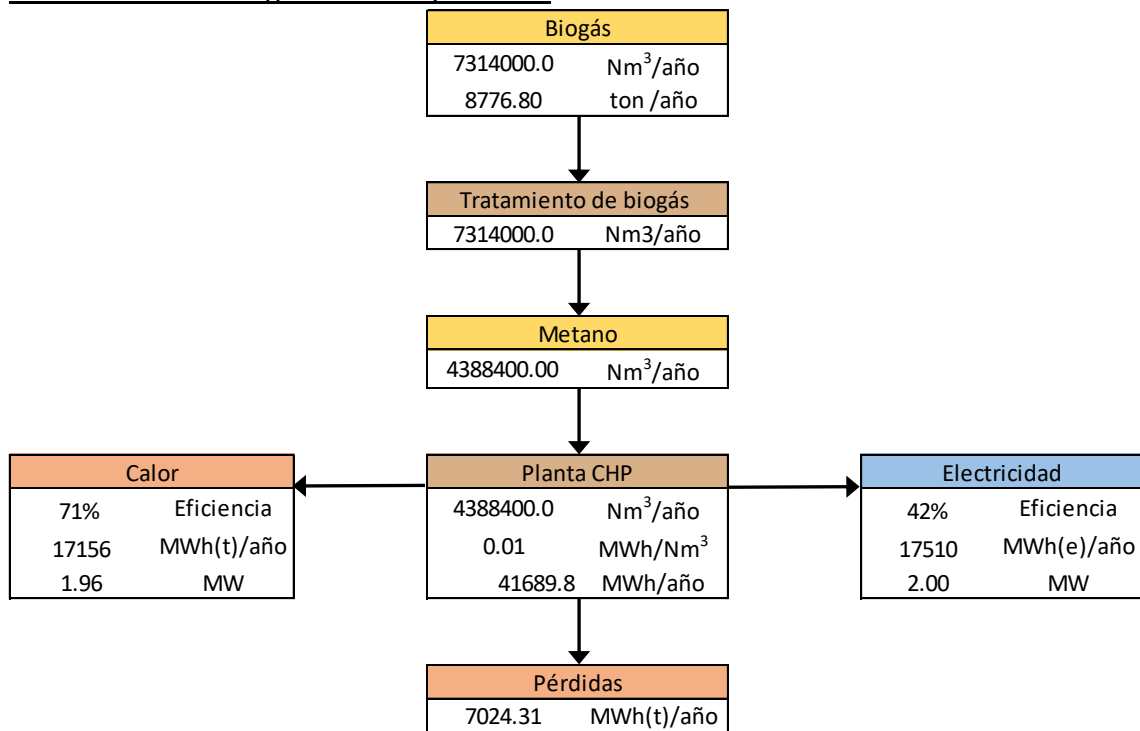
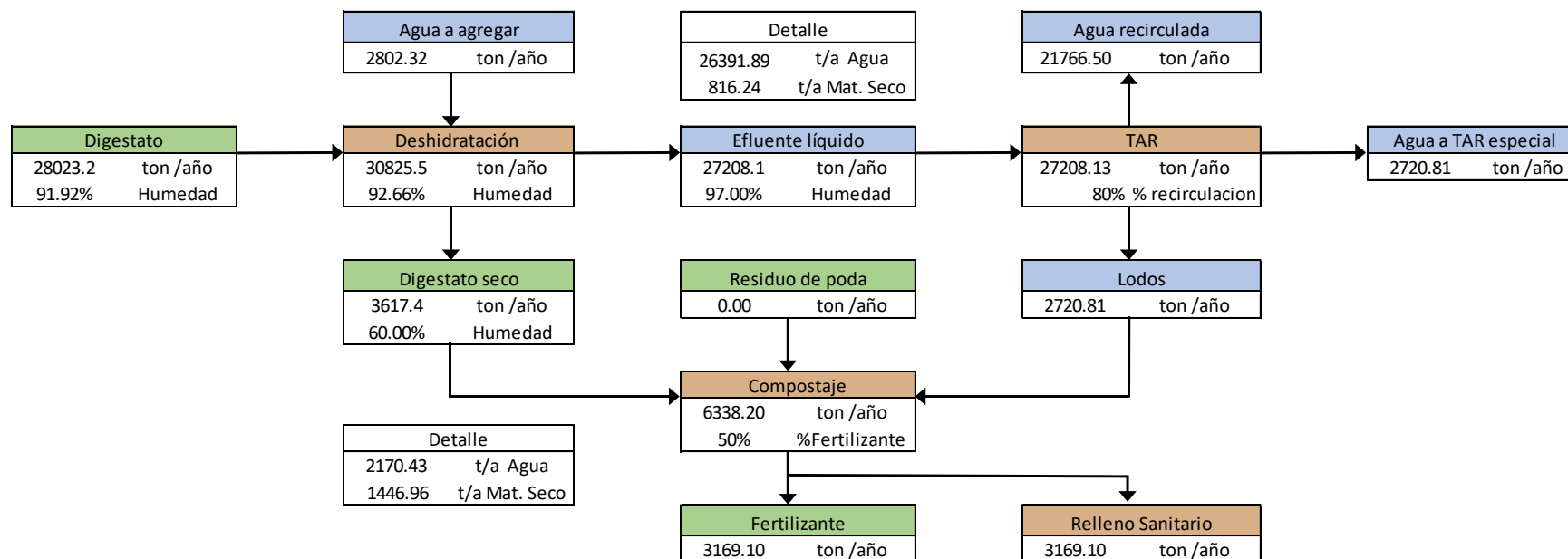


Figura 3.17 Diagrama de Flujo de la generación de energía de las plantas 1 y 2  
Referencia: (Adaptado de Pierre-Marie, 2017)

Tratamiento de digestato, tratamiento de agua residual y producción de fertilizante



**Figura 3.18** Diagrama de Flujo del tratamiento de residuos de las plantas 1 y 2  
Referencia: (Adaptado de Pierre-Marie, 2017)

### 3.4.8 Localización de las plantas 1, 2 y 3

-Superficie a utilizar

No se encontraron referencias de la superficie ocupada por plantas industriales, así que se decidió calcular un aproximado utilizando la herramienta de Google Earth, los resultados se muestran a continuación, ver figura 3.19.

Caso: Twence, Hengelo, 2011, Países Bajos, 50,000 ton/a, 4 Ha.

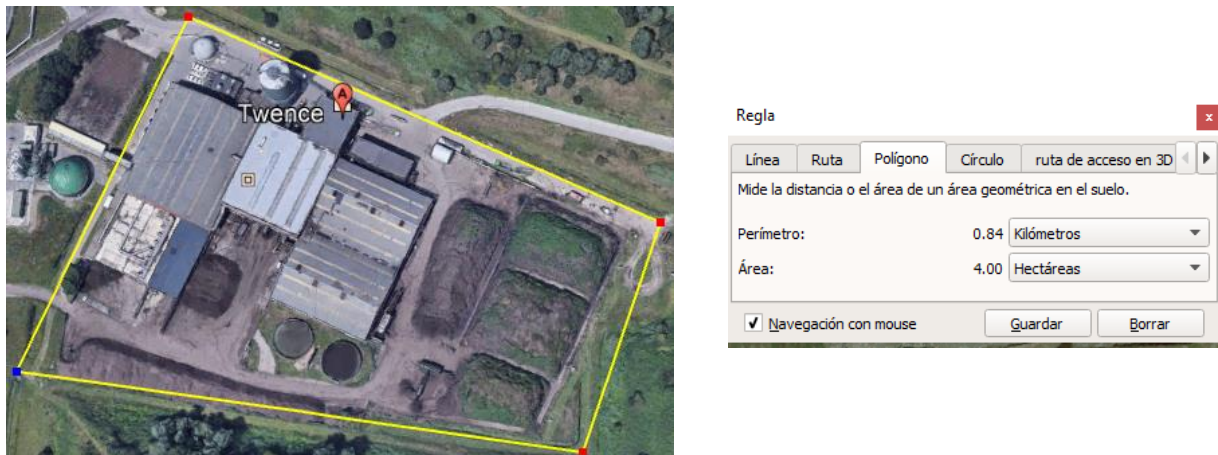


Figura 3.19 Captura de Google Earth de planta de tratamiento en Hengelo, Países Bajos

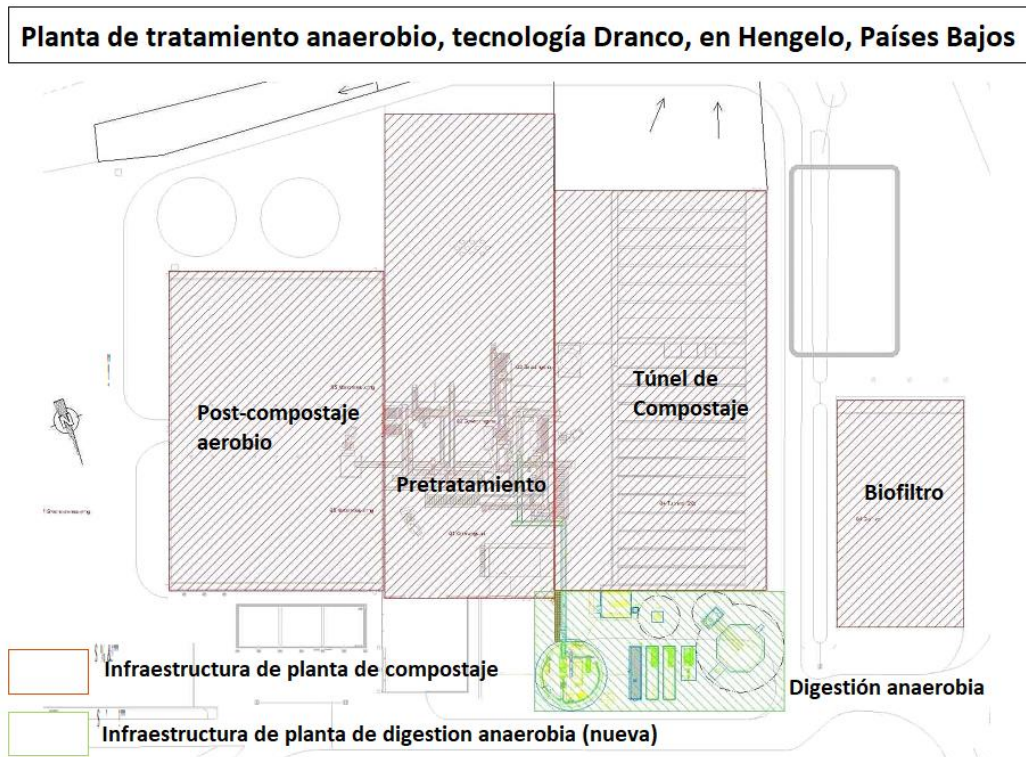


Figura 3.20 Distribución en planta de planta de tratamiento en Hengelo, Países Bajos  
Referencia: (adaptado de McDonald, 2012)

Dadas las superficies registradas de estas plantas con capacidades similares a las de este trabajo, de cerca de 40,000 ton/año, se decidió que la superficie a ocupar será de 4 Ha por cada planta. A su vez, para la planta de 20,000 ton/año se seleccionará una superficie de 2.5 Ha, ya que las instalaciones de pretratamiento y compostaje ocuparán menos espacio.

*-Localización de las plantas:*

Mi propuesta para la ubicación de las tres plantas de digestión anaerobia es dentro de las etapas uno o dos del Relleno Sanitario Bordo Poniente. Cada una de esas etapas tienen una extensión de terreno suficiente para albergar las tres plantas, aproximadamente 75 y 80 Ha respectivamente, ver figura 3.21.



**Figura 3.21** Captura de Google Earth de Bordo Poniente, localización propuesta de la planta

La justificación de la elección de ese lugar fue por los siguientes motivos:

1. En el Bordo Poniente ya hay plantas de compostaje. Por lo que los residuos orgánicos de las alcaldías ya son transportados a esa ubicación. La construcción de 3 plantas de digestión anaerobia en ese terreno no generaría un gasto extra de transporte al actual.
2. Tendría aceptación social ya que es un terreno que se asocia a la disposición de residuos desde los ochentas. Así, no generaría ninguna controversia como cualquier otro terreno aledaño a la ciudad podría generar. La sociedad vecina a cualquier otro terreno rechazaría la idea de la implementación de una planta de residuos sólidos por cuestiones de olor, limpieza, imagen, entre otras.

3. Ahí se colocaron los escombros del terremoto de 1985 y no hay planes de aprovechamiento del metano generado por los residuos ahí dispuestos. En la etapa IV del Bordo si hay planes de aprovechamiento de metano y por eso se descartó esa opción. Así se aprovecharía mejor un terreno que ahorita no es utilizado para algo económicamente productivo.
4. La ubicación del Bordo es relativamente céntrica a las periferias de la ciudad, por lo que el mejorador de suelo generado podría transportarse fácilmente a donde se necesite, como Milpa Alta, Xochimilco u otras entidades rurales cercanas. En cambio, si se colocarán las plantas cerca de Xochimilco o Milpa Alta que son las localidades rurales dentro de la ciudad, podría sobrepasar la demanda de mejorador de suelos y la exportación a otras entidades sería más complicada.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se cumplieron los objetivos parciales propuestos al inicio de la investigación que culminaron con el diseño de una planta modular de digestión anaerobia para tratar la FORSU generada en Coyoacán.

Después de una exhaustiva búsqueda bibliográfica, se logró definir las tasas específicas de crecimiento de los microorganismos participantes en el proceso de digestión anaerobia. Se comprobó que los microorganismos limitantes son las arqueas metanogénicas acetoclásticas, ya que su tasa de crecimiento específico es la más baja, así necesitan de más tiempo de residencia para duplicar su población.

Posteriormente, se definieron los tiempos de residencia de sólidos y de retención hidráulico a partir del funcionamiento de los reactores industriales reportados en la bibliografía. Del análisis, para que las arqueas metanogénicas limitantes alcancen su TRS, en un rango de 10-40 días, 20 en promedio, es necesario que el digestato que abandona el reactor semicontinuo se recircule TRS/TRH veces. El TRH para que se lleven a cabo las reacciones en el reactor es de 2 a 4 días, según la bibliografía.

El gasto másico por lote de FORSU es función de TRH, TRS y la fracción biodegradable de FORSU. Además, la relación FORSU/digestato queda en función de lotes para llenar el reactor, del tiempo entre alimentaciones y del TRS. Analizando la operación del reactor, se llegó a una fórmula para determinar el volumen del digestor necesario combinando los conceptos de producción diaria, fracción de recambio de FORSU y tiempo de residencia de sólidos.

A partir de la operación determinada de un reactor semicontinuo, se propuso un diseño básico de una planta modular de digestión anaerobia para tratar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) que se genera en específico en la alcaldía Coyoacán, CDMX. Se cumplió con el objetivo general, ya que se logró obtener información representativa y fidedigna de la FORSU a tratar en la planta. A partir de esos datos, se utilizó el proceso de dimensionamiento descrito en el capítulo dos de metodología para dimensionar la planta. La planta quedó dividida en dos plantas modulares de capacidad de 40,000 ton/año de FORSU y una planta de 20,000 ton/año de capacidad, para en conjunto poder tratar las 95,000 ton/año que se generan en la alcaldía. Las dos primeras plantas tendrán una capacidad eléctrica instalada de 2 MW, mientras que la tercera tendrá una capacidad de 1 MW, en conjunto se tendrá una capacidad de 5 MW.

Esta planta tendría un impacto benéfico, ya que cumple con el plan de desarrollo nacional en donde se busca disminuir la emisión de ton CO<sub>2</sub>e. de GEI a la atmósfera, así como también cumple con el plan de aumentar el porcentaje de energía limpia generada. La digestión anaerobia de la FORSU es una alternativa viable y necesaria para la gestión de RSU

en el país. Como se vio en la sección de antecedentes, sus beneficios son muchos y ya se ha implementado en varios lugares del mundo. México necesita un cambio en su normativa ambiental para impulsar este tipo de plantas que emiten considerablemente menos ton de CO<sub>2</sub>e. a la atmósfera que los rellenos sanitarios y los tiraderos a cielo abierto. Esta tesis busca acercar la tecnología ya probada en otras partes del mundo para implementarla y mejorar la gestión de residuos de nuestro país.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul-Sattar Nizami, Jerry D. Murphy, 2010, What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 6, 2010, Pages 1558-1568, ISSN 1364-0321, Consultado el 15 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000456>
- Agnew Joy, 2012, *Solid State Anaerobic Digester Frequently asked Questions*, PAMI, Saskatchewan Ministry of Agriculture, Mayo 2012, consultado en: <http://pami.ca/wp-content/uploads/2012/06/Solid-State-Anaerobic-Digester-FAQ.pdf> El día 26 de mayo de 2018.
- Ahn H.K., Smith M.C., Kondrad S.L., White J.W., 2009, Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switchgrass–animal manure mixtures, *Appl. Biochemical Biotechnology*, 160 (2009), pp. 965-975
- Al Seadi T., Lukehurst C., 2012, Quality management of digestate from biogas plants used as fertilizer, *IEA Bioenergy*
- Álvarez J.A., Otero L., Lema J.M., 2010, A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 4, 2010, Pages 1153-1158, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409012760>
- Andigestion, 2018, Andigestion Food Waste Recycling, Consultado el 28-09-18 en: <http://www.andigestion.co.uk/>
- Angelidaki Irini, Chen Xingxing, Cui Junbo, Kaparaju Prasad, Ellegaard Lars, 2006, Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactor, *Water Research*, Volume 40, Issue 14, 2006, Pages 2621-2628, ISSN 0043-1354, Consultado el 20 de junio de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135406003058>
- Antognini, S., Ragazzi, M., Rada, E. C., 2013, Biogas potential of OFMSW through an indirect method, *International Journal of Environment and Resource*, 2 (4), 83-88
- Baere, L.D., 2010. The Dranco technology: A unique digestion technology for solid organic waste, *Organic Waste Systems*, <http://www.ows.be/wp-content/uploads/2013/02/The-DRANCO-technology-2012.pdf>, [Accessed: 04/12/2018].
- Baldasano, J. M., & Soriano, C., (2000), Emission of greenhouse gases from anaerobic digestion processes: comparison with other municipal solid waste treatments, *Water science and technology*, 41(3), 275-282

- Behera Shishir Kumar, Park Jun Mo, Kim Kyeong Ho, Park Hung-Suck, 2010, Methane production from food waste leachate in laboratory-scale simulated landfill, *Waste Management*, Volume 30, Issues 8–9, 2010, Pages 1502-1508, ISSN 0956-053X, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10001145>
- Bekon Technology, The Beckon Process, References, Consultado el 16 de mayo de 2018 en: <https://www.bekon.eu/en/references/>
- Bekon, Energy for the Future Dry Fermentation, Energy from Organic Waste, Consultado el 15 de mayo de 2018 en: <https://www.bekon.eu/wp-content/uploads/2016/02/Brochure-BEKON-english1.pdf>
- Bernstad A., Malmquist L., Truedsson C., la Cour Jansen J., 2013, Need for improvements in physical pretreatment of source-separated household food waste, *Waste Management*, Volume 33, Issue 3, Pages 746-754, Consultado el 01-10-18 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12002826>
- Bioferm, Dry Fermentation High Solid Anaerobic Digester, Energy Systems 2018, Consultado el 16 de mayo de 2018 en: [http://2xqvquq6efg46ah9j3lyjmg8.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2018/02/Tech\\_BIOFerm-Dry-Fermentation\\_Batch-System-Digester\\_170629.pdf](http://2xqvquq6efg46ah9j3lyjmg8.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2018/02/Tech_BIOFerm-Dry-Fermentation_Batch-System-Digester_170629.pdf)
- BMWi.de, 2017, Ministro Federal de Asuntos Económicos y de Energía de Alemania, For a Future of Green Energy, *Renewable Energy*, Marzo 2017, Consultado el 3 de mayo de 2018 en: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Dossier/renewable-energy.html>.
- Boone, D. R. & Bryant, M. P., (1980), Propionate-degrading bacterium, *Syntrophobacter wolinii* sp. nov., gen. nov. from methanogenic ecosystems., *Appl. Environ. Microbiol.*, 40, 626–632
- Bouallagui H., Cheikh R. Ben, Marouani L., Hamdi M., 2003, Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester, *Bioresource Technology*, Volume 86, Issue 1, 2003, Pages 85-89, ISSN 0960-8524, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852402000974>
- Bouallagui H., Lahdheb H., Romdan E. Ben, Rachdi B., Hamdi M., 2009, Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition, *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Issue 5, 2009, Pages 1844-1849, ISSN 0301-4797, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479708003605>
- Bouallagui H., Touhami Y., Cheikh R. Ben, Hamdi M., 2005, Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes, *Process Biochemistry*, Volume 40, Issues 3–4, 2005, Pages 989-995, ISSN 1359-5113, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032959204001840>

- Browne James D., Murphy Jerry D., 2013, Assessment of the resource associated with biomethane from food waste, *Applied Energy*, Volume 104, 2013, Pages 170-177, ISSN 0306-2619, Consultado el 20 de junio de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008100>
- BTA, 2015, BTA International, Consultado el 28-09-18 en: <http://www.bta-international.de/>.
- Burke D. A., 2001, Dairy waste anaerobic digestion handbook, I Option for recovering beneficial products from dairy manure, Environmental Energy Company, Olympia Washington, EEUU, Pp. 16-35
- Campuzano Rosalinda, 2015, Lixiviación de residuos sólidos orgánicos urbanos para incrementar la rapidez de producción de biogás (tesis doctoral), Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Campuzano Rosalinda, González-Martínez Simón, Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review, *Waste Management*, Volume 54, 2016, Pages 3-12, Consultado el 13 de junio de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16302483>
- Cavinato C., Fatone F., Bolzonella D., Pavan P., 2010, Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: Comparison of pilot and full scale experiences, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 2, 2010, Pages 545-550, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409010712>
- CEPA., 2008, Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste, California Environmental Protection Agency
- Chandra R., Vijay V.K., Subbarao P.M.V., Khura T.K., 2012, Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes, *Applied Energy*, Volume 93, 2012, Pages 148-159, ISSN 0306-2619, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910005283>
- Charles, W., Walker, L., Cord-Ruwisch, R., 2009, Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste, *Bioresource Technology*, Volume 100, Issue 8, 2009, Pages 2329-2335, Consultado el 24 de octubre de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408010262>
- Chen, T.-H. (1999) Anaerobic treatment of poultry mortalities. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste*, held in Barcelona, June 15-17, 1999 (eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 2, pp. 69-72, *Int. Assoc. Wat. Qual.*

- Chunlan Mao, Yongzhong Feng, Xiaojiao Wang, Guangxin Ren, 2015, Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 45, 2015, Pages 540-555, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>. Consultado el 02 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001203>.
- Cuéllar Amanda y Webber Michael E., 2008, Cow power: The energy and emissions benefits of converting manure to biogas, *Environmental Research Letter*, Volumen 3, 2008, Universidad de Texas, Consultado el 3 de mayo de 2018 en: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/3/3/034002/pdf>.
- Cuetos María José, Gómez Xiomar, Otero Marta, Morán Antonio, 2008, Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW), *Biochemical Engineering Journal*, Volume 40, Issue 1, 2008, Pages 99-106, ISSN 1369-703X, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X07004421>
- De Baere, L. (2000). Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the art. *Wat. Sci. Tech.*, 41(3), 283–290.
- De Lemos Chernicharo Carlos Augusto, 2007, *Vol. 4 Anaerobic Reactors*, Biological Wastewater Treatment Series, Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais, Brazil, 2007.
- Deublein, D. and A. Steinhauser (2008), *Biogas from waste and renewable resources*. Weinheim, Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Dong, L., Zhenhong, Y., Yongming, S., 2010, Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW), *Bioresource Technology*, 101 (8), 2722-2728
- Durán-Moreno, A., Garcés-Rodríguez, M., Velasco, A. R., Marín-Enriquez, J. C., Gutiérrez-Lara, R., Moreno-Gutiérrez, A., Delgadillo-Hernández, 2013, N. A. Mexico City's municipal solid waste characteristics and composition analysis. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 29(1), 39-46
- Fang Cheng, O-Thong Sompong, Boe Kanokwan, Angelidaki Irini, 2011, Comparison of UASB and EGSB reactors performance, for treatment of raw and deoiled palm oil mill effluent (POME), *Journal of Hazardous Materials*, Volume 189, Issues 1–2, 2011, Pages 229-234, ISSN 0304-3894, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438941100210X>
- FAO, 2013, Food Wastage Footprint Impact on Natural Resources Summary Report, Consultado el 18 de junio de 2018 en: <http://www.fao.org/docrep/018/i3347e/i3347e.pdf>

- Farneti, A., Cozzolino, C., Bolzonella, D., Innocenti, L. and Cecchi, C. (1999). Semi-dry anaerobic digestion of OFMSW: the new full-scale plant of Verona (Italy). In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste*, held in Barcelona, June 15–17, 1999 (eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 2, 330–333, Int. Assoc. Wat. Qual.
- Fdez.-Güelfo L.A., Álvarez-Gallego C., Sales D., Romero García L.I., 2011, Determination of critical and optimum conditions for biomethanization of OFMSW in a semi-continuous stirred tank reactor, *Chemical Engineering Journal*, Volume 171, Issue 2, 2011, Pages 418-424, ISSN 1385-8947, Consultado el 20 de junio de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711004256>
- Fernández-Rodríguez J., Pérez M., Romero L.I., 2013, Comparison of mesophilic and thermophilic dry anaerobic digestion of OFMSW: Kinetic analysis, *Chemical Engineering Journal*, 232 (2013), 59-64
- Ferrer Ivet, Garfí Marianna, Uggetti Enrica, Ferrer-Martí Laia, Calderon Arcadio, Velo Enric, 2011, Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes, *Biomass and Bioenergy*, Volume 35, Issue 5, 2011, Pages 1668-1674, ISSN 0961-9534, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410004940>
- Forster-Carneiro T., Pérez M., Romero L.I., Sales D., 2007, Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: Focusing on the inoculum sources, *Bioresource Technology*, Volume 98, Issue 17, 2007, Pages 3195-3203, ISSN 0960-8524, Consultado el 25 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406003129>
- Forster-Carneiro, T., Pérez, M., Romero, L.I., 2008, Anaerobic digestion of municipal solid waste: Dry thermophilic performance, *Bioresource Technology*, 99 (17), 8180-8184
- Fotidis Ioannis A., Karakashev Dimitar, Kotsopoulos Thomas A., Martzopoulos Gerassimos G., Angelidaki Irini, (2013), Effect of ammonium and acetate on methanogenic pathway and methanogenic community composition, *FEMS Microbiology Ecology*, Volume 83, Issue 1, 1 January 2013, Pages 38–48, Consultado el 11 de junio de 2018 en: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2012.01456.x>
- Fulvia Tambone, Barbara Scaglia, Giuliana D'Imporzano, Andrea Schievano, Valentina Orzi, Silvia Salati, Fabrizio Adani, 2010, Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost, *Chemosphere*, Volume 81, Issue 5, 2010, Pages 577-583, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.08.034>. Consultado el 3 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653510009422>.
- G. Lissens, P. Vandevivere, L. De Baere, E.M. Biey and W. Verstraete, 2001, *Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion*, Water Science and Technology Vol 44 No 8 pp 91–102 © IWA Publishing 2001.

- GDF., 2010, Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal 2009-2014, Gaceta Oficial del Distrito Federal, Décima séptima época, No. 925. México
- Goberna M., Schoen M.A., Sperl D., Wett B., Insam H., 2010, Mesophilic and thermophilic co-fermentation of cattle excreta and olive mill wastes in pilot anaerobic digesters, *Biomass and Bioenergy*, Volume 34, Issue 3, 2010, Pages 340-346, ISSN 0961-9534, Consultado el 28 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953409002347>
- Gómez X., Cuertos M.J., Cara J., Morán A., García A.I., 2006, Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate, *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 12, 2006, Pages 2017-2024, ISSN 0960-1481, Consultado el 28 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105002892>
- Gregor D. Zupančič and Viktor Grilc (2012). Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste, *Management of Organic Waste*, Dr. Sunil Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-307-925-7, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/management-of-organic-waste/anaerobic-treatment-and-biogas-productionfrom-organic-wastes>.
- Hansen Trine Lund, Jansen Jes la Cour, Davidsson Åsa, Christensen Thomas Højlund, 2007, Effects of pre-treatment technologies on quantity and quality of source-sorted municipal organic waste for biogas recovery, *Waste Management*, Volume 27, Issue 3, 2007, Pages 398-405, ISSN 0956-053X, Consultado el 18 de junio de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X0600081X>
- Hill D.T. y Barth C.L., (1977), A dynamic model for simulation of animals waste digestion, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 49 (10), 2129-2143
- Hoornweg Daniel, Bhada-Tata Perinaz, 2012, What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management, *Urban development series; knowledge papers*, No. 15, World Bank, Washington, DC
- Igoni, A. Hilkih, Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D., 2008, Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste, *Applied Energy*, Volume 85, Issue 6, Pages 430-438, Consultado el 28 de septiembre de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626190700133X>.
- Imachi, H., Sakai, S., Sekiguchi, Y., Hanada, S., Kamagata, Y., Ohashi, A. & Harada, H, (2008), *Methanolinea tarda* gen. nov., sp. nov., a methane-producing archaeon isolated from a methanogenic digester sludge. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 58, 294–301.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2017, Mitigación del cambio climático, Consultado el 24 de octubre de 2018 en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/mitigacion-al-cambio-climatico-91062>

- Jabłoński S., Rodowicz P., Łukaszewicz M., (2015), Methanogenic archaea database containing physiological and biochemical characteristics, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 65 (2015), pp. 1360-1368
- Jayasinghe P.A., Hettiaratchi J.P.A., Mehrotra A.K., Kumar Sunil, 2011, Effect of enzyme additions on methane production and lignin degradation of landfilled sample of municipal solid waste, *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 7, 2011, Pages 4633-4637, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411000599>
- Juárez Hernández Sergio, 2012, Tesis: Planeación, diseño e instalación de un prototipo para la conversión de desechos orgánicos a energía térmica, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- Khalid Azeem, Arshad Muhammad, Anjum Muzammil, Tariq Mahmood, Dawson Lorna, 2011, The anaerobic digestion of solid organic waste, *Waste Management*, Volume 31, Issue 8, 2011, Pages 1737-1744, ISSN 0956-053X, Consultado el 25 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11001668>
- Khanal S., 2008, Anaerobic biotechnology for bioenergy production, John Wiley and Sons, Iowa, EEUU, Pp 1-92
- Lei Zhongfang, Chen Jiayi, Zhang Zhenya, Sugiura Norio, 2010, Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 12, 2010, Pages 4343-4348, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410001690>
- Lettinga, G., Hulshoff, Pol, L.W. and Zeeman, G. (1996) *Biological Wastewater Treatment. Part : Anaerobic Wastewater Treatment*. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, edn January 1996.
- Lo H.M., Kurniawan T.A., Sillanpää M.E.T., Pai T.Y., Chiang C.F., Chao K.P., Liu M.H., Chuang S.H., Banks C.J., Wang S.C., Lin K.C., Lin C.Y., Liu W.F., Cheng P.H., Chen C.K., Chiu H.Y., Wu H.Y., 2010, Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 16, 2010, Pages 6329-6335, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410005250>
- Martín-González L., Colturato L.F., Font X., Vicent T., 2010, Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: Recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield, *Waste Management*, Volume 30, Issue 10, 2010, Pages 1854-1859, ISSN 0956-053X, Consultado el 28 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1000200X>

- Mata-Alvarez, J. (Ed.), 2003, *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*; IWA Publishing: London, UK, 2003; ISBN 1900222140.
- Mattheeus, Bruno, OWS, 2012, State of the Art of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste in Europe, *DAKOFA Conference 2012*, Copenhagen.
- McDonald Norma, 2012, Case Study Dranco Anaerobic Digestion Plant, in Hengelo, Netherlands, *OWS*, Consultado el 18 de octubre de 2018 en: [http://www.biocyclerefor.com/2012/presents\\_tuesday/McDonald\\_s.pdf](http://www.biocyclerefor.com/2012/presents_tuesday/McDonald_s.pdf)
- McInerney, M. J., Bryant, M. P. & Pfennig, N., (1979), Anaerobic bacterium that degrades fatty-acids in syntrophic association with methanogens, *Arch. Microbiol.* 122, 129–135
- Mori, K., Lino, T., Suzuki, K., Yamaguchi, K. & Kamagata, Y., (2012), Aceticlastic and NaCl-requiring methanogen “*Methanosaeta pelagica*” sp. nov., isolated from marine tidal flat sediment, *Appl. Environ. Microbiol.*, 78, 3416–3423.
- Mountfort, D. O. & Bryant, M. P., (1982), Isolation and characterization of an anaerobic benzoate-degrading bacterium from sewage sludge, *Arch. Microbiol.*, 133, 249–256
- Mumme Jan, Linke Bernd, Tölle Rainer, 2010, Novel upflow anaerobic solid-state (UASS) reactor, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 2, 2010, Pages 592-599, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409011389>
- Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-024-AMBT-2013, Establece los criterios y especificaciones técnicas bajo las cuáles se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y el almacenamiento de los residuos del Distrito Federal, *Diario Oficial de la Federación*, 8 de julio de 2015
- NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural (cancela y sustituye a la NOM-001-SECRE-2003, Calidad del gas natural y la NOM-EM-002-SECRE-2009, Calidad del gas natural durante el periodo de emergencia severa), *Diario Oficial de la Federación*, 19 de marzo de 2010.
- Oleszkiewicz, J.A. and Poggi-Varaldo (1997). High-solids anaerobic digestion of mixed municipal and industrial wastes. *J. Environ. Eng.* 123, 1087–1092.
- Ouedraogo, A., 1999, Pilot scale two-phase anaerobic digestion of the biodegradable organic fraction of Bamako district municipal solid waste. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, held in Barcelona*, June 15-17, 1999 (eds. J. Mata- Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 2, pp. 73-76, *Int. Assoc. Wat. Qual.*
- OWS, Biogas Plants, DRANCO, *Organic Waste Systems*, consultado el 10 de abril de 2018 en: [http://www.ows.be/household\\_waste/dranco/](http://www.ows.be/household_waste/dranco/).



- OWS, Biogas Plants, References, *Organic Waste Systems*, consultado el 15 de abril de 2018 en: <http://www.ows.be/biogas-plants/references/?dranco=ref-householdwaste-dranco>.
- Parawira W., Murto M., Zvauya R., Mattiasson B., 2004, Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves, *Renewable Energy*, Volume 29, Issue 11, 2004, Pages 1811-1823, ISSN 0960-1481, Consultado el 28 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104000849>
- Patel, G. B. & Sprott, G. D., (1990), *Methanosaeta concilii* gen. nov., sp. nov. (“*Methanothrix concilii*”) and *Methanosaeta thermoacetophila* nom. rev., comb. nov., *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 40, 79–82
- Ranieri Luigi, Mossa Giorgio, Pallegriano Roberta y Digiesi Salvatore, 2018, Energy Recovery from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste: A Real Options-Based Facility Assessment, *Sustainability*, MDPI, 31 de enero de 2018.
- Riano B., Molinuevo B., Garcia-Gonzalez M.C., 2011, Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater, *Bioresource Technology*, 102 (2011), pp. 41-4136
- Romero Aguilar, M. A., Fdez.-Güelfo, L.A., Álvarez-Gallego, C. J., Romero-García, L.I., 2013, Effect of HRT on hydrogen production and organic matter solubilization in acidogenic anaerobic digestion of OFMSW, *Chemical Engineering Journal*, 219 (2013), 443-449
- Sam-Soon Palns, Wentzel M.C., Dold P.L., Loewenthal R.E. y Marais Gv.R., (1991), Mathematical modelling of upflow anaerobic sludge bed (UASB) systems treating carbohydrate waste waters. *Water SA* 17 (2) 91-106
- SEDEMA, 2008, Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Gobierno del Distrito Federal. Publicada en la *Gaceta Oficial del Distrito Federal* el 07 de octubre de 2008. Gobierno del Distrito Federal, México.
- SEDEMA, 2017, Inventario de residuos sólidos Ciudad de México 2016, Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México
- SEMARNAT, 2015, Informe de la situación del Medio Ambiente en México, Capítulo 7 Residuos, Consultado el 24 de octubre de 2018 en: <http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/tema/cap7.html>
- SENER, 2017, Reporte de Avance de Energías Limpias, Primer semestre 2017, Diario Oficial de la Federación 2015 Ley de Transición Energética (LTE), tercero transitorio
- Siegriest, H., Renggli, D. and Gujer, W. (1993). Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage treatment. *Water Science and Technology*, 27(2):25-36.

- Sigrid Kusch, Winfried Schäfer and Martin Kranert (2011). *Dry Digestion of Organic Residues*, Integrated Waste Management - Volume I, Mr. Sunil Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-307-469-6, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-i/dry-digestion-of-organic-residues>.
- Song, Chae-Young, Cho, Changsik, Lee, Young-Chae, Yoon, Youngman, 2016, Plant (Dongdaemun Environment and Resources Center) Operation Case Study: Anaerobic Digestion of Food Waste, *J. of Korea Society of Waste Management*, Consultado el 19 de octubre de 2018 en: [https://www.researchgate.net/publication/312911298\\_Plant\\_Dongdaemun\\_Environment\\_and\\_Resources\\_Center\\_Operation\\_Case\\_Study\\_Anaerobic\\_Digestion\\_of\\_Food\\_Waste](https://www.researchgate.net/publication/312911298_Plant_Dongdaemun_Environment_and_Resources_Center_Operation_Case_Study_Anaerobic_Digestion_of_Food_Waste)
- Sosnowski P., Wieczorek A., Ledakowicz S., 2003, Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes, *Advances in Environmental Research*, Volume 7, Issue 3, 2003, Pages 609-616, ISSN 1093-0191, Consultado el 28 de mayo de 2018 en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1093019102000497>
- Stams A.J., Sousa D.Z., Kleerebezem R., Plugge C.M., (2012), Role of syntrophic microbial communities in high-rate methanogenic bioreactors, *Water Sci. Technol.*, 62 (2) (2012), pp. 352-362
- Strippel Florian, 2016, *Biowaste to Biogas!*, Fachverband Biogas, Department Waste, Fertilisation and Hygiene, Asia Clean Energy Forum 2016, 7th June 2016, Manila Philippines.
- Ten Brummeler, 1992, E., Dry anaerobic digestion of solid waste in the Biocel process with a full scale unit. In *Proc. Int. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste*, held in Venice, 14-17 April, 1992, (eds. F. Cecchi, J. Mata-Alvarez and F.G. Pohland), pp. 557-560, *Int. Assoc. on Wat. Poll. Res. and Control*.
- Ten Brummeler, 1999, E., Full scale experience with the Biocel-process. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste, held in Barcelona*, June 15-17, 1999 (eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 1, pp. 308-314, *Int. Assoc. Wat. Qual.*
- UNTHA, 2018, Productos, XR2000/3000, Consultada el 18 de octubre de 2018 en: [https://www.untha.com/en/shredders/industrial-shredders/xr2000/3000\\_p41](https://www.untha.com/en/shredders/industrial-shredders/xr2000/3000_p41)
- VALORGAS, 2010, Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe, *MTT Agrifood Research Finland VALORGAS Project*, Finland, Consultado el 15 de junio de 2018 en: <http://www.valorgas.soton.ac.uk/deliverables.htm>
- Vienna University of Technology, 2012, Biogas to Biomethane Technology Review, Institute of Chemical Engineering, Research Division Thermal Process Engineering and Simulation, *Intelligent Energy Europe Programme*, Mayo 2012.

- Vögeli Y., Lohri C. R., Gallardo A., Diener S., Zurbrügg C. (2014). Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies. *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)*, Dübendorf Switzerland
- Vogt G.M, Liu H.W, Kennedy K.J, Vogt H.S, Holbein B.E, 2002, Super blue box recycling (SUBBOR) enhanced two-stage anaerobic digestion process for recycling municipal solid waste: laboratory pilot studies, *Bioresource Technology*, Volume 85, Issue 3, 2002, Pages 291-299, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852402001141>
- Walker M., Banks C.J., Heaven S., 2009, Two-stage anaerobic digestion of biodegradable municipal solid waste using a rotating drum mesh filter bioreactor and anaerobic filter, *Bioresource Technology*, Volume 100, Issue 18, 2009, Pages 4121-4126, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085240900323X>
- Zhang Lei, Lee Yong-Woo, Jahng Deokjin, 2011, Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements, *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 8, 2011, Pages 5048-5059, ISSN 0960-8524, Consultado el 28 de mayo de 2018 en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411001751>

## ANEXOS

### Anexo A Estación de transferencia de Coyoacán.

**Estación de transferencia:** Coyoacán

**Dirección:** Calzada de Tlalpan No. 3330 esquina Viaducto Tlalpan, Col. Santa Úrsula Coapa.

**Teléfonos:** 52413820 y 56168538

**Fecha de muestreo:** 25 de octubre de 2012

#### Características:

Esta estación existe desde el año 1985, originalmente empezó a trabajar con dos tolvas y en 1991 se agregó una tolva más. La estación recibe los residuos de la Alcaldía Coyoacán, y parte de los residuos de las alcaldías Tlalpan, Xochimilco, Iztapalapa, Álvaro Obregón y Benito Juárez. El tipo de residuos que se reciben son Domiciliarios e Industriales.

Tiene una superficie total de 12,187 m<sup>2</sup> y una superficie construida de 6,798 m<sup>2</sup>. Recibe aproximadamente 1,500 toneladas por día y cuenta con 25 camiones para el transporte de los residuos a sitio de disposición final. Cuenta con 2 rampas de ascenso y descenso. Su báscula estima un peso máximo de 80 toneladas. Laboran 24 horas de domingo a jueves y de 6:00 a 21:00 horas de viernes a sábado.

#### Selección de camiones para muestreo:

Los camiones seleccionados, su procedencia y el tipo de residuos que llevaban se presentan en la Tabla A.1.

Tabla A.1 Camiones seleccionados mediante tabla de números aleatorios.

| No de camión | Placas  | Procedencia  | Tipo de residuos           |
|--------------|---------|--|----------------------------|
| 8            | 6560-CK | Bosques de Tletlameya, Coyoacán                          | Residencial y poda         |
| 11           | 5926-CA | Villa Coapa, Tlalpan                                     | Municipal                  |
| 12           | 3657-CE | Villa Coapa, Tlalpan                                     | Barrido manual y municipal |
| 13           | 2113    | Col el Mirador, Xochimilco                               | Municipal                  |
| 14           | 3806-CF | C.T.M. Culhuacán, Coyoacán                               | Municipal                  |
| 18           | 3723-CE | Pueblo de San Pedro Tepetlapa, Coyoacán                  | Municipal                  |
| 21           | 3442-CF | Del Carmen, Coyoacán                                     | Mercados                   |
| 22           | 4539-CF | Cuemanco, Tlalpan  | Municipal y preparatoria   |
| 23           | 9660-CH | Carmen Serdán, Coyoacán                                  | Municipal                  |
| 28           | 5605-CJ | Villa Coapa, Tlalpan                                     | Municipal                  |
| 30           | 1984-CF | La Fama, Tlalpan   | Municipal                  |
| 31           | 3678-CE | Atlántida, Coyoacán                                      | Municipal                  |
| 32           | 1973-CF | La Magdalena Petlascalco, Tlalpan                        | Municipal                  |
| 38           | 709     | San Lorenzo La Cebada y San Lucas Xochimanca, Xochimilco | Municipal                  |
| 39           | 5801-CK | Ejidos de Huipulco, Tlalpan                              | Municipal                  |