



Título de la Consultoría:

“CONSULTOR NACIONAL PARA CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y ANÁLISIS DE BARRERAS Y NECESIDADES PARA LA RECUPERACIÓN DE METANO, PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA META ESTABLECIDA EN LA CONTRIBUCIÓN DETERMINADA A NIVEL NACIONAL DE URUGUAY”

Proyecto URU/18/G31

“Creación de capacidades institucionales y técnicas para aumentar la transparencia en el marco del Acuerdo de París”

PRODUCTO 1 - INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS ANAEROBIOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE TODO EL PAÍS, INCLUYENDO BARRERAS, OPORTUNIDADES, Y VIABILIDAD TÉCNICA PARA APLICAR UN MECANISMO DE CAPTURA DE EMISIONES DE METANO.

SUBPRODUCTOS 1.1 Y 1.2

Ing. Quím. (M.Sc.) Alberto Hernández

Diciembre de 2020

El análisis y las recomendaciones de políticas contenidos en este informe no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva o de sus Estados miembros.

Contenido

1	MARCO Y OBJETIVO	5
2	METODOLOGÍA	5
3	SUBPRODUCTO 1.1	7
3.1	AFB - Alimentos Fray Bentos.....	7
3.2	BPU (Breeders&Packers Uruguay – NH Foods).....	11
3.3	COLEME Ltda.	13
3.4	CONAPROLE Villa Rodríguez (Planta 8).....	16
3.5	FNC Montevideo (Fábricas Nacionales de Cerveza S.A.).....	18
3.6	FNC Minas (Fábricas Nacionales de Cerveza S.A.).....	22
3.7	Frigorífico Canelones (Minerva Foods).....	22
3.8	Lanas Trinidad S.A.	24
3.9	Maltería Oriental S.A. (MOSA).....	31
3.10	RESUMEN.....	36
3.11	COMENTARIOS.....	40
3.11.1	Tipos de reactores y cargas de diseño.....	40
3.11.2	Datos de proyecto vs resultados de operación.....	41
3.12	BIBLIOGRAFÍA	43
3.13	ANEXO.....	45
3.13.1	Biodigestor Weltec.....	45
	• Aislación y revestimiento del tanque fermentador.....	45
	• Escotillas de inspección	46
	• Techo de fermentador de doble diafragma (gasómetro de tanque)	46
	• Equipo de inflado de techo de doble diafragma.....	47
	• Agitador de eje prolongado Biobull 11kW (2 piezas por biodigestor)	48
	• Agitador sumergible.....	48
	• Sistema de calefacción interno	49

• Tratamiento y manejo del biogás	49
○ Válvula de seguridad para biogás	49
○ Soplador para desulfurización de biogás	50
3.13.2 Biodigestor Archea New Energy	51
4 SUPRODUCTO 1.2	52
4.1 Información de base	52
4.2 Listado de casos posibles	56

1 MARCO Y OBJETIVO

El presente Informe se enmarca dentro de los Productos establecidos en los Términos de Referencia de la Consultoría IC URU/18/G31-972 *“Consultor Nacional para caracterización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales industriales y análisis de barreras y necesidades para la recuperación de metano, para el cumplimiento de la meta establecida en la Contribución Determinada a nivel nacional de Uruguay”*.

El objetivo de este Informe es presentar resultados parciales del **Producto 1: Informe de caracterización de los sistemas anaerobios de aguas residuales industriales de todo el país, incluyendo barreras, oportunidades, y viabilidad técnica para aplicar un mecanismo de captura de emisiones de metano.**

Corresponde en este informe presentar los resultados de los Subproductos 1.1 y 1.2:

- **Subproducto 1.1.:** Caracterización de los sistemas anaerobios de aguas residuales en los establecimientos industriales que ya cuentan con sistemas de recuperación de metano.
- **Subproducto 1.2.:** Listado de establecimientos industriales que según las características actuales de sus sistemas de tratamiento, podrían presentar la alternativa de la instalación de un mecanismo de captura viable, justificando dicha oportunidad.

2 METODOLOGÍA

Se trabajó en base a la información suministrada por:

Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente de Uruguay.

- Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero – INGEI
- Planilla de cálculo “Inventory Software” del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por su sigla en inglés) e Instructivo para Aguas Residuales Industriales.

Departamento de Control Ambiental de Actividades (DCAA) de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) del Ministerio de Ambiente de Uruguay.

- Planillas Excel® con datos de base para cálculo de emisiones de metano de aguas residuales industriales (años 2017 y 2018). Incluye listado de industrias ordenadas por emisiones de metano.
- Expedientes de trámites de Solicitud de Autorización de Desagüe Industrial (SADI), e Informes Ambientales de Operación.

En conjunto con personal del DCAA, se realizaron visitas presenciales a Plantas de Tratamiento de Efluentes (PTE) de industrias que ya cuentan con sistema de captación de biogás. Durante las mismas, se entrevistó a referentes de las empresas y a responsables operativos de las PTEs. Las visitas fueron las siguientes:

Día 6/11/2020

- Maltería Oriental S.A. (MOSA)
- FNC Montevideo

Día 17/11/2020

- Lanas Trinidad S.A
- Frigorífico BPU (“Breeders& Packers Uruguay”)
- Estancias del Lago

Nota: Por el tipo de producción involucrada, el caso de Estancias del Lago no está dentro del alcance específico de esta consultoría. Se trata de un tambo vacuno estabulado y fabricación de leche en polvo, por lo cual al momento de reportar sus emisiones de metano en el INGEI no queda incluido en la Categoría 4, Subcategoría 4.D. No obstante, se visitó esta empresa ya que se considera que la tecnología adoptada para la digestión anaerobia con captación y uso de biogás, es relevante a los efectos de esta consultoría, ya que podría ser aplicable a casos de tratamiento de efluentes industriales con elevada concentración de sólidos orgánicos en suspensión. Existe otra empresa en el país (Granmolino S.A.) que presenta una situación análoga: tambo ovino estabulado y fabricación de quesos, que cuenta con un biodigestor agitado con tecnología de origen Alemania (vía filial Brasil). La descripción de estas tecnologías se incluye como Anexo del Subproducto 1.1.

Por causa de las restricciones derivadas de las medidas de prevención por la pandemia de COVID -19, en algunos casos no se pudieron hacer visitas presenciales a las plantas, las cuales fueron sustituidas por entrevistas a distancia a través de plataformas informáticas (Zoom, Google Team). Fue el caso de las entrevistas mantenidas con técnicos de las siguientes empresas:

- CONAPROLE Planta 8 Complejo Industrial Villa Rodríguez (6/11/2020)
- Alimentos Fray Bentos (12/11/2020)

También se realizó una entrevista a distancia con técnicos de Frigorífico Tacuarembó (5/11/2020). Esta empresa no cuenta actualmente con sistema de captación de metano, pero según los cálculos realizados para la elaboración de los INGEIs 2017 y 2018 emite un porcentaje significativo del total nacional de metano originado en tratamiento de efluentes industriales. La DINAMA ha solicitado a esta empresa la presentación de un nuevo Proyecto de Ingeniería para su PTE; según informaron los técnicos de la empresa durante la entrevista, si bien el nuevo proyecto aún está en elaboración, el mismo no incluiría una etapa de digestión anaerobia del efluente, optándose por tecnologías aerobias, y remoción de nutrientes.

3 SUBPRODUCTO 1.1

Como ya se indicó, el alcance de este Subproducto es la “**caracterización de los sistemas anaerobios de aguas residuales en los establecimientos industriales que ya cuentan con sistemas de recuperación de metano.**”

En base a la información suministrada, se identificaron los siguientes establecimientos que ya cuentan con sistemas de captación de metano (en orden alfabético):

- **Alimentos Fray Bentos**
- **BPU (Breeders& Packers Uruguay – NH Foods)** (cuenta con reactores de contacto cubiertos, pero no tiene incorporada la quema de biogás)
- **COLEME (Cooperativa de Lechería de Melo Agraria de Responsabilidad Ltda.)**
- **CONAPROLE (Cooperativa Nacional de Productores de Leche) - Complejo industrial Villa Rodríguez (Planta 8)**
- **FNC (Fábricas Nacionales de Cerveza S.A.) - Planta Minas**
- **FNC (Fábricas Nacionales de Cerveza S.A.) - Planta Montevideo**
- **Frigorífico Canelones (Minerva Foods)** (actualmente la planta industrial no está en producción)
- **Lanas Trinidad S.A.**
- **MOSA (Maltería Oriental S.A.)**

A continuación (numerales 3.1 a 3.9) se presenta la caracterización de cada uno de los sistemas mencionados previamente. La información de datos de proyecto y los resultados operativos disponibles se resumen y comentan en los numerales 3.10 y 3.11 de este informe.

3.1 AFB - Alimentos Fray Bentos

Rama industrial: Láctea. Secado de suero lácteo (según proyecto). Actualmente se dedican a producción de leche en polvo (secado de leche, no de suero).

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: ADI Systems, Canadá

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor anaerobio ADI – BVF

Según los proveedores de la tecnología, el ADI – BVF es un “proceso anaeróbico de baja tasa, con alto tiempo de retención hidráulica y gran inventario de biomasa, lo que resulta en un proceso de tratamiento significativamente robusto. El reactor funciona bien en un rango de temperatura variado (20-40 ° C) y es estable frente a cargas de choque. El tamaño del reactor, la construcción y las tuberías internas proporcionan condiciones en las que los sólidos biológicos se depositan en un lecho de lodo.” (Fuente: ADI-BVF® Reactor brochure)

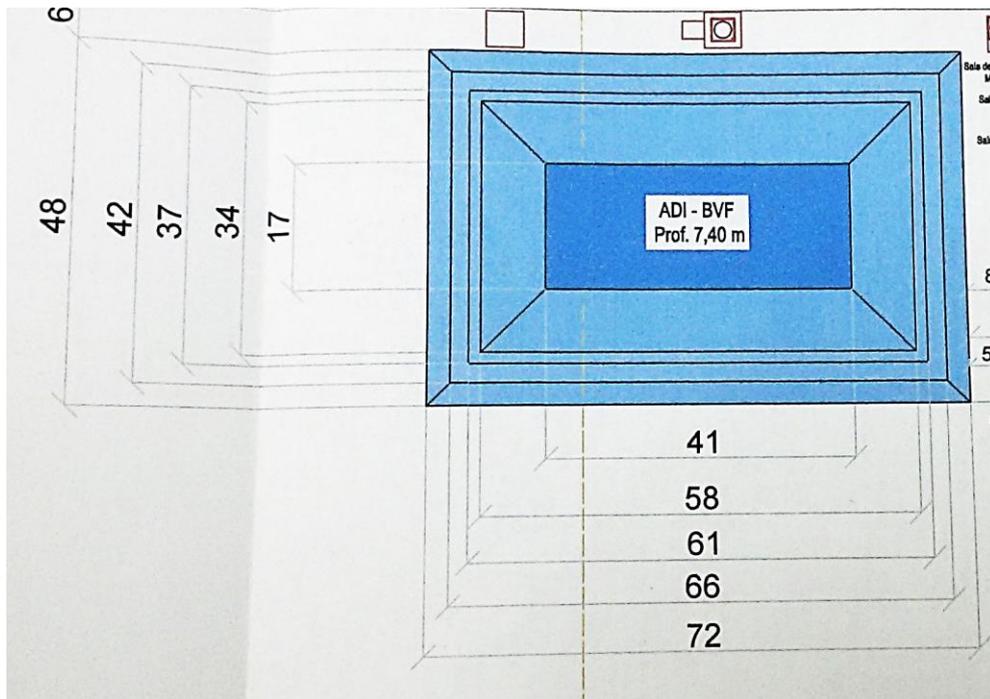


Figura 1 – Dimensiones del reactor ADI – BVF (Fuente: Expediente SADI)

Se trata de un reactor de planta rectangular, de 12000 m^3 de volumen de trabajo, parcialmente excavado y parcialmente elevado, con un muro perimetral de hormigón, el cual se usa también como anclaje de la cubierta del reactor. El fondo y los muros del reactor están recubiertos de geomembrana para asegurar impermeabilidad. La parte superior está cubierta por un sistema de membrana flotante, compuesta de una capa superior de geomembrana, una capa de espuma de polietileno como aislante térmico y una capa de polietileno en la parte inferior. La cubierta permite la recolección de biogás, control de temperatura y de olores.

La alimentación al reactor se hace por bombeo desde una pileta de equalización (con cubierta superior de geomembrana, con agitación por recirculación de líquido, y con medición de pH y temperatura). El ingreso de efluente equalizado al reactor se hace en forma distribuida en varios puntos del fondo, para favorecer el contacto con el lodo anaerobio. La salida de efluente es por rebose, en un único punto del reactor. El sistema cuenta con bombas de recirculación de lodos y de sobrenadante, para mezclado del contenido. La recirculación de lodos opera en forma temporizada, durante dos períodos diarios de dos horas. La recirculación de sobrenadante opera cuando no lo hace la recirculación de lodos.

El reactor cuenta con sistema de medición de temperatura y pH. Existe la posibilidad de dosificar solución de Hidróxido de Sodio para ajuste de pH, pero informan que nunca la han tenido que usar.

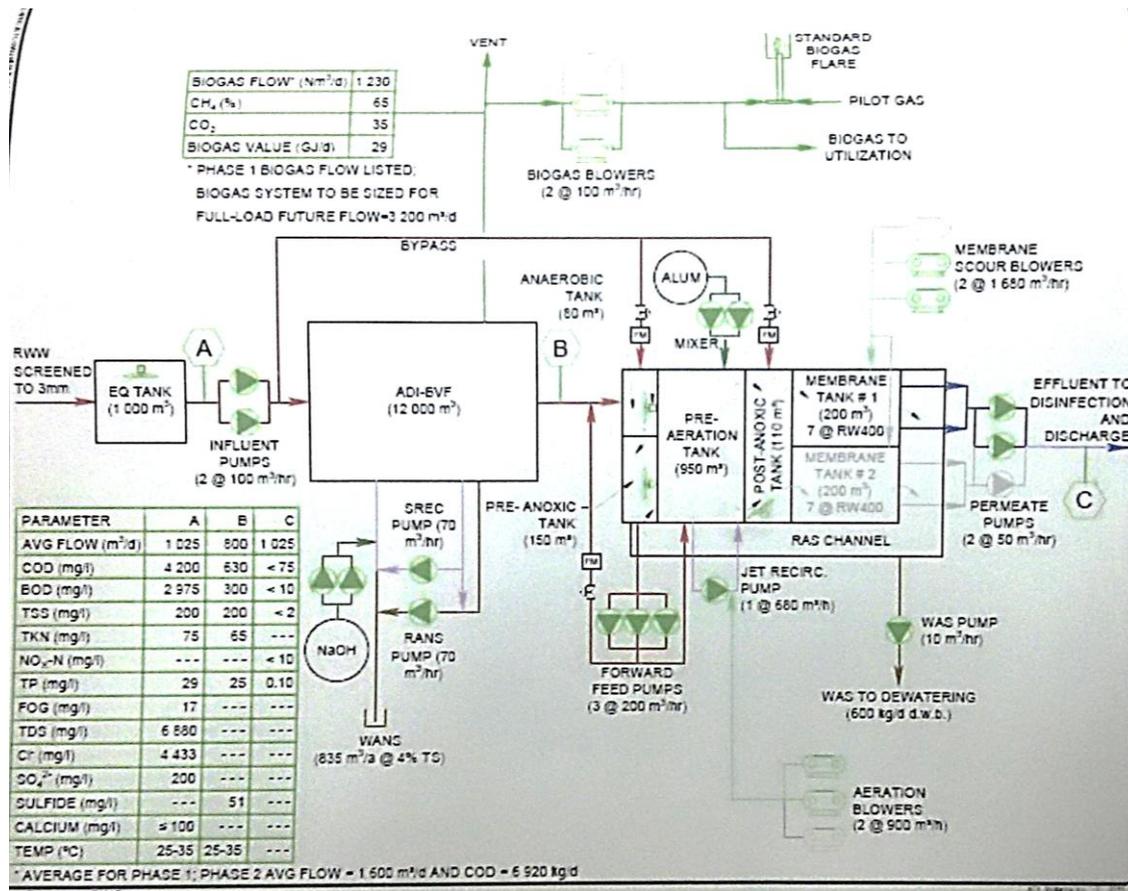


Figura 2 – Diagrama de flujo de la PTE de Alimentos Fray Bentos (Fuente: Expediente SADI)

El reactor cuenta con bocas tomamuestras, que se usan para medición del perfil de lodo a distintas profundidades. El perfil se mide una vez por mes, próximo a la entrada y a la salida del reactor.

Caudal de efluente de diseño de la PTE: 800 m³/d en la fase 1 (máximo 1600 m³/d)

Carga a procesar en el reactor: 3360 kgDQO/d en la fase 1 (máximo 5040 kgDQO/d)

Carga orgánica volumétrica (Bv) de diseño: 0,28 kgDQO/m³.d en fase 1 (máximo 0.56 kgDQO/m³.d)

Eficiencia de diseño: 85% en DQO

Caudal de efluente bruto actual: 900 a 1200 m³/d, dependiendo de la época del año. De ese total, el 67% ingresa al reactor anaerobio, y el resto se by-pasea hacia las unidades de remoción de nutrientes, donde se utiliza como fuente de carbono.

TRH actual: 12 días (promedio)



Figura 3 – Aspecto general del reactor ADI-BVF
(Fuente: captura de pantalla de video conferencia del 12/11/2020)

Biogás

El biogás es captado en un único punto debajo de la cubierta, próximo a uno de los vértices del reactor. El sistema trabaja en depresión, siendo el biogás extraído por succión mediante sopladores lobulares (uno titular y uno suplente). Los sopladores cuentan con variador de velocidad, que modulan en función de la presión bajo la cubierta.

El destino del biogás puede ser:

- i) quema en antorcha;
- ii) quema en caldera a biogás para calentar agua;
- iii) venteo a la atmósfera mediante chimenea, en caso de no poder quemarlo en ninguno de los sistemas anteriores.

El agua caliente generada en la caldera se utiliza para calentar el líquido del reactor, mediante un intercambiador de camisa y tubo, de un único pasaje. El agua de calentamiento opera en circuito cerrado. La temperatura recomendada de operación del reactor es de 33 – 35 °C, a la cual no se llega durante el invierno aunque se utilice todo el biogás en la caldera.

Caudal de biogás proyectado: 1230 Nm³/d (para un caudal de efluente al reactor de 800 m³/d)

Caudal de biogás actual: 680 Nm³/d. Este caudal no se mide, se estima mediante una tabla suministrada por el proveedor, usando como datos la concentración de DQO de entrada y de

salida, el caudal alimentado y la temperatura del reactor. Estiman un porcentaje de metano en el biogás del 65%. El menor caudal de biogás obtenido en relación al esperable lo atribuyen a menor concentración de DQO en el efluente (comparada con la de diseño) por diferente matriz de productos, y a la menor temperatura de operación.



Figura 4 – Tubería de salida de biogás y chimenea de venteo

(Fuente: capturas de pantalla de video conferencia del 12/11/2020)



Figura 5 – Antorcha de biogás con arrestallama y sistema de encendido

3.2 BPU (Breeders&Packers Uruguay – NH Foods)

Rama industrial: Frigorífico

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Consultora ITP S.R.L., Uruguay. Actualmente gestionado por Estudio Pittamiglio.

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor de contacto, de baja carga

El diseño original preveía dos reactores anaerobios de baja carga, funcionando en paralelo, con captación de biogás. Se trata de reactores de planta rectangular, de 12000 m³ de volumen útil cada uno. Son reactores excavados en el terreno, con una altura útil de 8 m, pisos y taludes recubiertos de geomembrana de polietileno de alta densidad, con geotextil Bidim RT 09 en la interfase suelo – membrana (para venteo en caso de presencia de gases bajo la cubierta de fondo).

Según el proyectista: “cada reactor cuenta con dos secciones, con objetivos diferentes. La primera sección del reactor, zona de contacto, que ocupa el 50% del volumen total, es donde se producen las reacciones de biodegradación, y maximiza la eliminación de DQO.”

“La zona de clarificación permite que los sólidos de la zona de contacto sedimenten para reciclo o purga.” (Fuente: SADI de BPU)

El agua residual se bombea a cada reactor anaeróbico a través de un tubo colector principal que ingresa por cinco laterales con orificios orientados hacia arriba. Los laterales se encuentran cerca de la parte inferior de la cama de lodos para maximizar el contacto de las aguas residuales con la biomasa activa.

Los tubos ubicados en la parte inferior de la zona de clarificación de cada reactor permiten el regreso de los sólidos fijos de la zona de clarificación a la zona de ingreso de efluente, aumentando la masa de los microorganismos activos de la zona de la biodegradación.

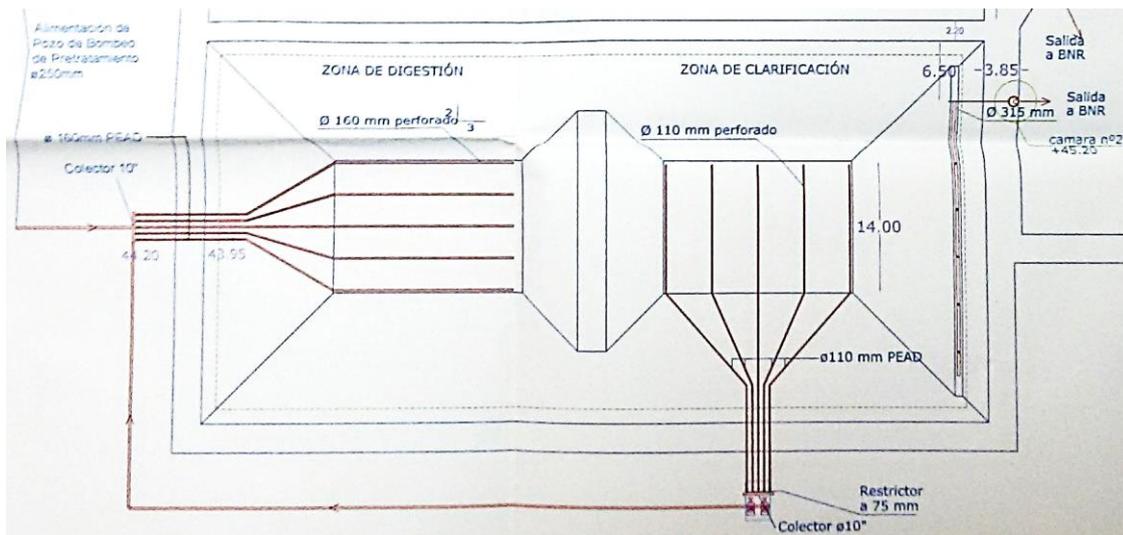


Figura 6 – Planta de uno de los reactores anaerobios de contacto (Fuente: Expediente SADI)

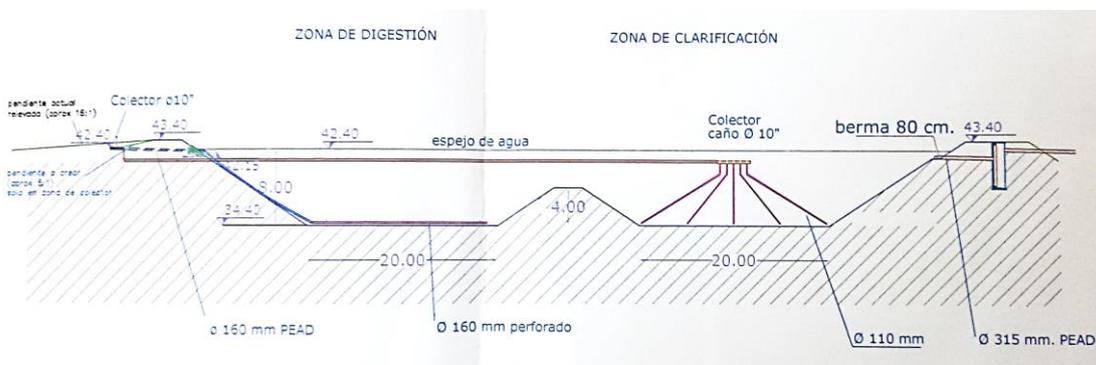


Figura 7 – Corte de uno de los reactores anaerobios de contacto (Fuente: Expediente SADI)

La superficie superior de los biodigestores está cubierta con una membrana de polietileno de baja densidad, para captación del biogás generado. La membrana está diseñada para trabajar a aproximadamente a 0.90 metros sobre el nivel del agua de manera de formar una cavidad para coleccionar los gases. La cubierta está equipada con puntos de muestreo, que permiten extraer muestras, realizar mediciones de profundidad de lodos, medir temperatura y pH. También cuenta con venteos de seguridad, que liberan el gas en caso de acumulación excesiva de gas, que pudiera poner en peligro la integridad de la membrana. Existe un caño colector de biogás, ubicado en el perímetro bajo la membrana, con un punto de salida en cada reactor.

Según información recabada en la visita del día 17/11/2020, actualmente la generación de efluente es de 2200 m³/d. Al haber instalado recientemente un sistema de tratamiento para remoción de nutrientes, el 40% del caudal total bypassa al tratamiento anaeróbico y se envía directamente a la remoción de nutrientes, como fuente de carbono para la desnitrificación. El 60% restante se alimenta a un único reactor anaerobio. El otro reactor se está usando actualmente como digestor de lodos.

Los reactores han estado funcionando durante aproximadamente 10 años; informan que en ese período no ha sido necesario purgar lodos. Para el seguimiento de los reactores se hacen análisis de laboratorio (cada 2 meses) de DBO₅, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Sedimentables en 1 hora, Nutrientes (N y P), y Alcalinidad Total, Alcalinidad al Bicarbonato y Acidos Grasos Volátiles (se usan los indicadores α y α').

Caudal de efluente de diseño de la PTE: 2280 m³/d , de los cuales 1140 m³/d a cada reactor anaerobio.

Caudal de efluente actual a la PTE: 2200 m³/d , de los cuales 1320 m³/d ingresan al reactor anaerobio que procesa efluente.

TRH de diseño: 10.5 días **TRH actual:** 9.0 días

Carga a procesar en el reactor: 6720 kgDQO/d

Carga orgánica volumétrica (Bv) de diseño: 0,28 kgDQO/m³.d

Eficiencia de diseño: 80% en DBO₅ operando a 25 °C.

Biogás

Caudal de biogás proyectado: 2000 Nm³/d

Actualmente no se está utilizando el biogás, que se ventea directamente desde los reactores. Informan que los análisis de composición realizados indican valores de concentración de H₂S en el gas del orden de 1000 ppm.

Según indica la empresa, en el caso de BPU el aprovechamiento energético del biogás no es rentable, debido a los elevados montos de inversión manejados: informan un valor del orden de U\$S 150.000.- para un sistema de captación y quema en antorcha exclusivamente (sin aprovechamiento energético).

3.3 COLEME Ltda.

Rama industrial: Láctea. Leche fluida y fábrica de quesos.

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Ing. Mauricio Passeggi / BIOPROA - FING – UDELAR, Uruguay

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor UASB modificado, con recirculación de lodos y con separación de grasa flotante

Según López et al. (2019) “los efluentes de la industria láctea se caracterizan por su alto contenido graso. Esto dificulta la aplicación de las tecnologías tradicionales dado que el material graso rodea los gránulos de microorganismos dificultando la transferencia de masa y favoreciendo su flotación. Por lo tanto fue necesario buscar una solución alternativa y se convirtió el problema de la flotación de los gránulos en una solución: los gránulos flotados son extraídos periódicamente, enviados a un pequeño digestor de lodos y después retornados al reactor. Adicionalmente, para evitar el escape de lodos durante el arranque se añadió un sedimentador laminar a la salida del reactor.”

Del Expediente de SADI transcribimos: “Dos reactores anaerobios de alta carga del tipo UASB, funcionando en paralelo, con captación de biogás. Son alimentados por gravedad, mediante caños que ingresan el efluente distribuyéndolo en el fondo. Sobre cada reactor se ubica una campana de captación de biogás parcialmente sumergida. Alrededor de las campanas se ubican vertederos perimetrales de salida del efluente. Este es conducido mediante canales perimetrales hacia un sedimentador de placas. El sedimentador de placas recibe el efluente en su parte superior y lo distribuye a sus dos cámaras internas donde se ubican las placas y las tolvas de barros. Mediante una bomba se extraen los lodos biológicos sedimentados en forma intermitente para devolverlos a los reactores.”

“El efluente que ingresa a los reactores anaerobios tiene un alto contenido de grasas. Las microburbujas de biogás generadas por el proceso biológico dentro del reactor, se asocian a los glóbulos de grasa, haciendo que el reactor biológico opere además como un sistema de flotación.

Se diseñó e instaló un sistema de extracción de grasas: un cono invertido se ubica en el centro de cada reactor con su base aproximadamente un centímetro por debajo del nivel de desborde del reactor. Rodeando el perímetro del cono se ubica un anillo cónico de 20 centímetros de espesor y con una pendiente hacia el centro del 10%. El vértice del cono se rosca a un codo de 2 pulgadas y éste a un caño de igual diámetro que lo conecta con una cámara de 60x60x60cm ubicada junto a cada reactor. En la cámara de extracción de grasa se ubica una bomba sumergible de achique con flotador de corte. Periódicamente, luego de despresurizar el biogás de la campana para llevar el nivel del efluente dentro de la campana al nivel de desborde del reactor, se acciona la bomba por unos minutos. Esto produce un descenso del nivel en la cámara y el consecuente flujo hacia ella desde el cono invertido, así como el flujo desde la superficie del reactor hacia el cono.”

Caudal de diseño de la PTE: 120 m³/d

Volumen: 38 m³ cada reactor

TRH: 15.2 horas

Carga a procesar en el reactor: 480 kgDQO/d (tasa de diseño)

Carga orgánica volumétrica (Bv) máxima: 6.3 kgDQO/m³.d

Eficiencia: 90% en DQO a un valor de Bv de 5.5 kgDQO/m³.d

En la actualidad (noviembre 2020), la planta industrial de COLEME está operando a bajo nivel de producción, y con discontinuidades. Esto ha ocasionado problemas operativos en los reactores.

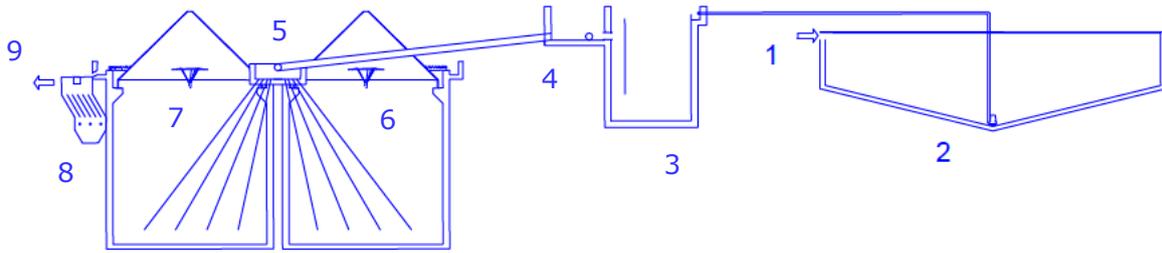


Figura 8 – Esquema de la PTE. 1 – Ingreso de efluente bruto, 2 – tanque pulmón; 3 – grasera; 4 y 5 – alimentación a reactores UASB; 6 y 7 – reactores UASB; 8 – sedimentador de placas; 9 – salida de efluente tratado. Fuente: adaptado de López et al. (2019)

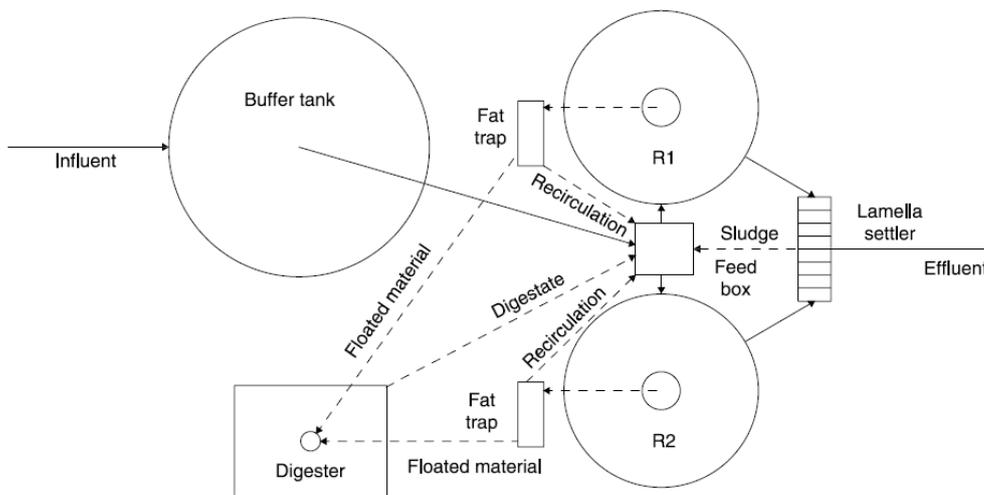


Figure 1 | Treatment plant lay-out. (→) continuous flow, (---) intermittent flow.

Figura 9 – Diagrama de flujo de la PTE de COLEME. Fuente: Passegi et al. (2009)

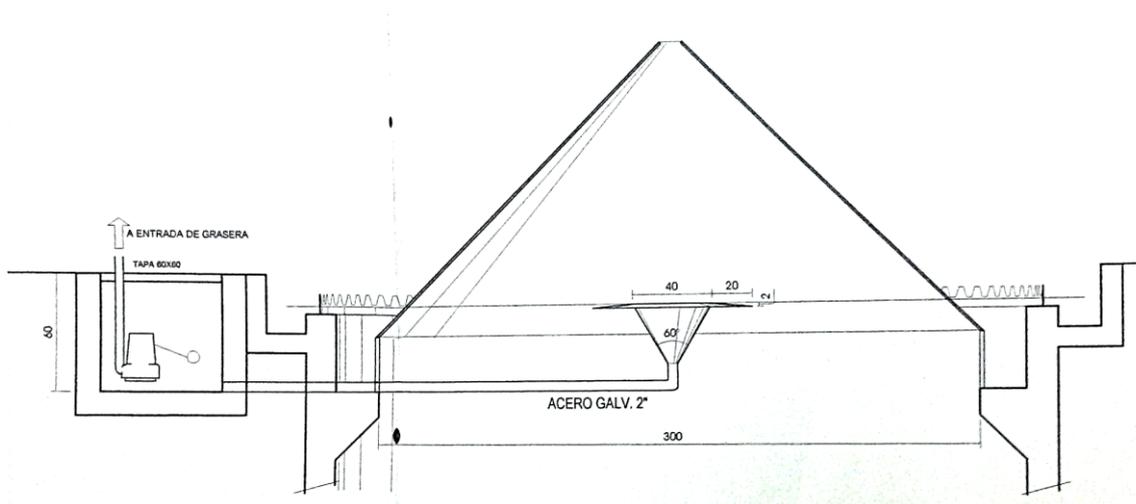


Figura 10 – Corte del sistema de extracción de flotantes de UASB de COLEME

Fuente: Expediente SADI



Figura 11 – Vista de reactores UASB de COLEME. Fuente: López et al. (2019)

Biogás

El biogás generado se usa para incrementar 3 – 4 °C la temperatura del influente a los reactores, así como para calentar el contenido de un digester de lodos que es parte de la PTE.

Caudal de biogás estimado: 150 a 200 Nm³/d (asumiendo 60% de metano)

3.4 CONAPROLE Villa Rodríguez (Planta 8)

Rama industrial: Láctea. Leche en polvo - Quesos - UHT - Desmineralización de sueros

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Estudio Pittamiglio y CONAPROLE, Uruguay

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor anaerobio de contacto, de baja carga.

Se trata de un sistema de 5 biodigestores, cuatro de ellos de 2500 m³ de volumen cada uno, y uno de 5000 m³. Dependiendo de la situación operativa de la PTE uno o dos de los reactores de 2500 m³ se utilizan para digestión de lodos, y los demás para tratamiento anaerobio del efluente. Se trata de piletas de hormigón tronco-piramidales, con recubrimiento de fondo y laterales con

biogás de esta planta es muy alto (entre 90 y 95% según medidas en línea). Tres muestreos puntuales de biogás para análisis externos (realizados por PraxisLab S.R.L. entre 2015 y 2018, usando analizadores de Lanas Trinidad S.A.) arrojaron resultados de 85% de metano. Estos valores elevados se atribuyen a un probable efecto de retención del CO₂ generado anaeróbicamente mediante precipitación de carbonato de calcio en la fase líquida.

Caudal de biogás: 2200 Nm³/d (utilizando un valor promedio de 90% de metano en el biogás,).

3.5 FNC Montevideo (Fábricas Nacionales de Cerveza S.A.)

Rama industrial: Bebidas, cervecería.

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Paques Technology BV (<https://en.paques.nl/>), Países Bajos. Inicialmente el sistema fue suministrado por la empresa Dedini S.A. de Brasil <https://www.dedini.com.br/index.php>, con apoyo de Ecopreneur S.A para el montaje. Actualmente reciben soporte técnico desde Paques Brasil.

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor BIOPAQ® IC (“Internal Circulation”)



Figura 13 – Reactor anaerobio BIOPAQ® IC y tanque de acondicionamiento en FNC Montevideo
Fuente: fotografía tomada por el autor, con autorización de FNC. Fecha: 19/05/2017

La PTE cuenta con una etapa de pretratamiento, formada por un primer tanque de equalización, tamizado de efluente en filtro rotativo, cuatro piletas de equalización con agitación por aireadores y tres piletas de homogeneización final. Todas estas unidades se encuentran localizadas en el mismo edificio de fabricación. De allí se bombean al otro sector de la PTE, que está ubicado en un predio cercano (calle Mendoza esquina Santa Fe, Montevideo), donde el efluente llega a un Tanque de Homogeneización (TH) cilíndrico de acero inoxidable de 300 m³. Este volumen representa una capacidad de acumulación del orden de 12 horas de producción de efluente.

Este tanque cuenta con:

- Recirculación de efluente por bombeo, para homogeneización
- Sistema de control de pH (electrodo de medición, que comanda el agregado de soda o ácido)
- Medición de potencial redox (ORP)
- Control de nivel de líquido con sensor de medición por ultrasonido
- Sistema de alarmas y enclavamientos por nivel alto o bajo, y por ORP alto.

Desde el Tanque de Homogeneización, el efluente se envía mediante bombas centrífugas y tuberías apropiadas hacia el Tanque de Acondicionamiento. El caudal bombeado es medido y controlado, y su valor lo setea el operador de acuerdo a la carga orgánica que puede ser aplicada, respetando el caudal máximo de diseño y la capacidad del Reactor IC.

El Tanque de Acondicionamiento (TA) es una unidad de 52 m³ de volumen, consistente en un cilindro vertical de diseño esbelto colocado adyacente al Reactor IC (ver Figura 13). Está dimensionado para un caudal de diseño de 65 m³/h, resultando un TRH de 48 minutos.

Las funciones del TA son:

- Pre acidificación biológica (etapa de formación de ácidos orgánicos volátiles) del efluente previamente equalizado proveniente del TH.
- Permitir un ajuste “fino” de pH en el rango de 6,8 a 7,2 (óptimo para el reactor anaerobio), mediante la dosificación de solución de NaOH. Cuenta con un pHímetro que comanda la bomba dosificadora de soda (circuito de control de pH).
- Realizar una mezcla entre el efluente “fresco” (proveniente del TH) y una fracción de efluente tratado que se recircula desde la salida del Reactor IC. Esto permite reducir la concentración de DQO en el líquido que ingresa al reactor IC, y aprovechar la alcalinidad al bicarbonato del efluente tratado, lo cual aporta capacidad buffer y, por lo tanto, contribuye a la estabilidad del pH.

El contenido del TA se homogeneiza con una bomba centrífuga horizontal y un eyecto - mezclador que se instala en el interior del tanque.

El reactor anaerobio es del tipo de “Recirculación Interna” (en inglés “Internal Circulation”).

El reactor IC consiste de un tanque circular, relativamente alto, que contiene dos zonas distintas para la conversión biológica del efluente. La zona inferior del tratamiento (ver número 2 en la

Figura 14 a continuación) posee el lodo granuloso en forma expandida o fluidizada. Esta zona de mezcla completa está caracterizada por las altas velocidades de flujo ascendente. Estas velocidades se producen por la acción del efluente alimentado, más el caudal de reciclo interno. El caudal de reciclo es generado por el biogás colectado en la parte superior del primer separador (3) ubicado en la parte central del reactor y resulta en un “gaslift” que arrastra la mezcla de efluente/lodo granuloso para la parte superior del reactor, donde está instalado el tanque de segregación de fases (5). Una vez segregada del biogás, la fase líquida es automáticamente reciclada por gravedad para el fondo del reactor (1) donde es efectivamente mezclada con el efluente acondicionado que está ingresando en el proceso. La fluidización creada en la zona inferior del reactor por el caudal de reciclo y la alta tasa de generación de biogás, optimiza el contacto entre el efluente y la biomasa anaeróbica. Este contacto es mucho mejor que el logrado en un reactor UASB.

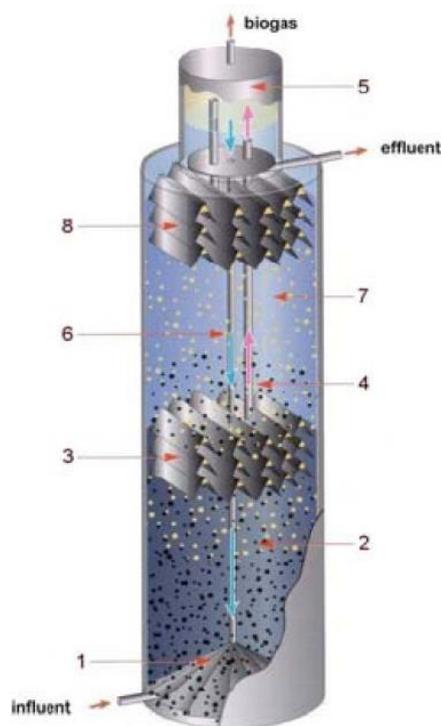


Figura 14 – Reactor anaerobio BIOPAQ® IC Paques.
Fuente: Expediente SADI de FNC Montevideo

Cerca de 80 - 90% de la conversión de la materia orgánica en biogás ocurre en esta zona inferior del reactor IC. Una vez que ese biogás se produjo, es utilizado para el efecto “gas-lift” que produce la recirculación interna que no afectará el régimen en la parte superior del reactor, además no causará el arrastre no deseado del lodo anaeróbico. Por lo tanto, el caudal del efluente reciclado transportado por el “gas-lift” está restringido a la zona inferior del reactor, lo que posibilitará operar la parte superior con un régimen hidráulico bastante estable, que permitirá retener el lodo anaeróbico dentro del sistema.

El separador modular instalado en la parte superior del reactor (8) se encarga de la captación de la pequeña fracción del biogás generado en la zona superior de todo el caudal del efluente tratado en el sistema.

Una fracción del efluente tratado en el reactor anaeróbico es reciclado automáticamente al proceso (Tanque de Acondicionamiento) con caudal equivalente al 30 a 100% del nominal.

El reactor no cuenta con aislación térmica. Al momento de la visita (6/11/2020) se estaba instalando un sistema de calentamiento del contenido del reactor, mediante intercambiadores de calor externos, del tipo camisa y tubos, con agua caliente generada utilizando el biogás. Instalación a cargo de la empresa RUMBOS Ingeniería y Servicios (Ing. Álvaro Berreta).

La planta cuenta con un laboratorio donde se realizan los controles analíticos necesarios para el seguimiento del reactor: pH, Temperatura, Sólidos Suspendidos y caudal se miden o controlan cada 2 horas; DQO, ácidos volátiles y alcalinidad al bicarbonato, 1 vez por turno. Periódicamente se extraen muestras de lodo a diferentes alturas del reactor; el perfil de lodo es usado como indicador de la estabilidad del proceso y del estado de agregación del lodo (lodo granular o con diferentes proporciones de lodo pulverulento). También se hacen ensayos de actividad metanogénica del lodo (midiendo el volumen generado de gas por la técnica de desplazamiento hidroneumático) una vez al mes. Se dispone de datos de actividad metanogénica a diferentes temperaturas, que se utiliza conjuntamente con el dato de inventario de lodos (del perfil) para establecer la carga orgánica máxima a alimentar diariamente en cada caso. Se cuenta con el soporte técnico de Bioproa (FING- UDELAR), para la medición de actividad metanogénica acetilclástica e hidrogenotrófica, aplicadas al seguimiento del estado del lodo y a la evaluación de posibles inhibiciones por presencia en el efluente de diversos productos químicos, como detergentes o lubricantes.

Caudal total de efluente a tratamiento anaerobio: 1290 m³/d máximo (SADI)

Caudal máximo de alimentación al reactor anaerobio (diseño): 65 m³/h

TRH en el reactor anaerobio: 2.9 horas

Carga a procesar: 4000 kgDQO/d

Carga orgánica volumétrica (Bv): 21.0 kgDQO/m³.d

Eficiencia: 80% en DQO.

Biogás

El biogás generado en el proceso se separa en la parte superior del reactor IC y pasa por un medidor de caudal por medio de placa de orificio y transmisor de presión diferencial. Luego el biogás es conducido a un gasómetro, y de allí a una antorcha. La antorcha es del tipo atmosférico, con dispositivo anti-retorno de llama (“arrestallama”), válvula solenoide, y transformador de ignición, mediante llama piloto encendida con GLP. Cuenta con sensor de llama mediante termocupla. Tiene una capacidad de quema de 100 m³/h de biogás.

Caudal de biogás: 460 a 600 Nm³/d (dato de producción medido, informado por FNC Montevideo) (Nota: este valor debería ser mayor en función de los valores declarados de carga aplicada y eficiencia de remoción de DQO).

3.6 FNC Minas (Fábricas Nacionales de Cerveza S.A.)

Rama industrial: Bebidas, cervecería.

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Paques Technology BV, Países Bajos.

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor BIOPAQ® IC (“Internal Circulation”)

Se trata de un sistema análogo al de FNC Montevideo, aunque de diferente capacidad. A continuación se resumen los principales datos de diseño.

Caudal total de efluente a tratamiento anaerobio: 1246 m³/d (diseño Paques); 1032 m³/d máximo (SADI)

Caudal máximo de alimentación al reactor anaerobio: 52 m³/h (diseño Paques); 43 m³/h (SADI)

Volumen de reactor: 190 m³

TRH en el reactor anaerobio: 3.6 horas (diseño Paques); 4.4 horas (según caudal SADI)

Carga a procesar: 3381 kgDQO/d (diseño Paques, incluyendo un 20% de sobrecapacidad, a pedido de FNC); 2400 kgDQO/d (SADI)

Carga orgánica volumétrica (Bv): 17.8 kgDQO/m³.d

Eficiencia: mayor a 80% en DQO.

Biogás

Según diseño de Paques, la tasa de generación de biogás se estima en 0.35 – 0.50 Nm³/kg DQO removida.

Composición esperable del biogás (según Paques):

CH₄ 65 – 80%

CO₂ 24 – 34,5%

Vapor de agua 0,5 a 1,0%

Para la capacidad nominal de carga (3381 kgDQO/d) se espera según diseño una generación de biogás de 1150 m³/d (promedio), que corresponde a 800 m³/d de metano.

3.7 Frigorífico Canelones (Minerva Foods)

Rama industrial: Frigorífico

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Estudio Pittamiglio, Uruguay

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor anaerobio de contacto, de baja carga.

Se trata de un sistema de 2 reactores anaerobios para efluente y 1 digestor de lodos. La tecnología es la misma ya vista para el caso 3.4 CONAPROLE Villa Rodríguez. Los dos reactores anaerobios de efluente, que operan en paralelo, son excavados y cubiertos con membrana de PEAD en el fondo, taludes y superficie. Tienen un volumen útil de 2248 m³ cada uno, profundidad útil 4,5 m y dimensiones a nivel de terreno de 21 X 49 m. El digestor de lodos tiene un volumen de 3640 m³.

Caudal a tratamiento anaerobio: 1550 m³/d máximo (corresponde a 2/3 del efluente total; el tercio restante se usa como fuente carbono para la remoción de nitrógeno).

TRH: 2.9 días (cada reactor)

Carga total a procesar: 8670 kgDQO/d

Carga orgánica volumétrica (Bv): 1.93 kgDQO/m³.d

Eficiencia: 82% en DQO ; 79% en DBO₅.

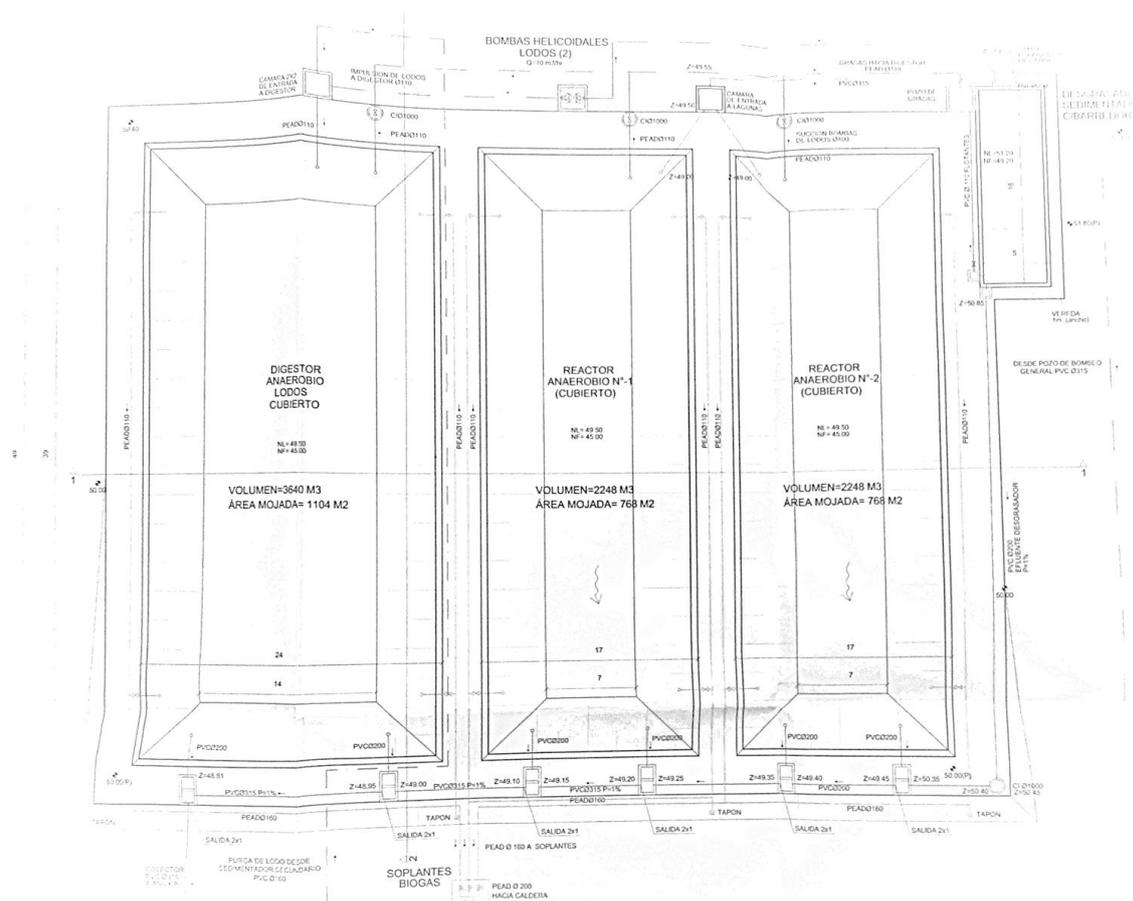


Figura 15 – Plantas de reactores anaerobios y digestor de lodos de Frigorífico Canelones.

Fuente: planos de expediente SADI

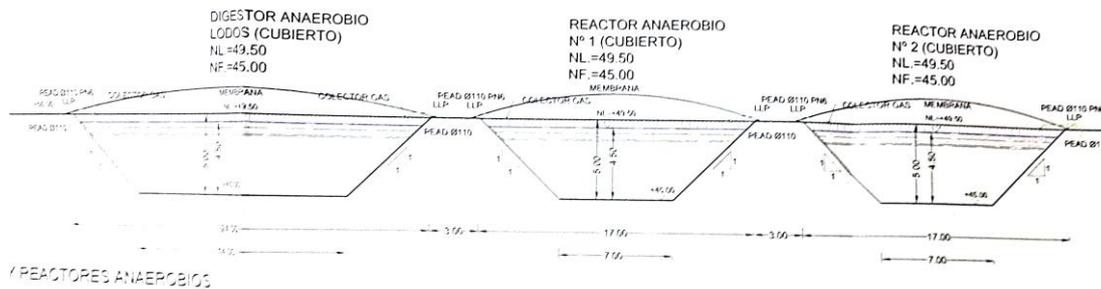


Figura 16 – Cortes de reactores anaerobios y digestor de lodos de Frigorífico Canelones.

Fuente: planos de expediente SADI

Biogás

Debajo de la cubierta superior de PEAD, cada reactor anaerobio cuenta con una tubería de PEAD de 200 mm de diámetro, corrugado y perforado (similar a las usadas para drenajes), para captación y conducción del biogás. Dicha tubería conforma un anillo perimetral, con una única salida. Las salidas confluyen a una misma tubería de PEAD de 200 mm de diámetro, que conduce el biogás a una antorcha de seguridad o a ser usado como combustible en la caldera.

En base a los datos de proyecto, se realiza la siguiente estimación de caudal de biogás esperable, para las condiciones de diseño. Se asume que 5 puntos porcentuales de la eficiencia de remoción de DQO corresponden a crecimiento microbiano, y el restante 79% es DQO metanizada. Resulta por lo tanto:

Caudal de biogás proyectado: 1870 Nm³/d (se supuso 60% de metano en el biogás).

Actualmente (Noviembre 2020) el Frigorífico Canelones no se encuentra operativo, por lo cual no se dispone de datos recientes de eficiencia de remoción de DQO ni de generación de metano.

3.8 Lanás Trinidad S.A.

Rama industrial: Textil. Lavadero y Peinaduría de lanas

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Desarrollo conjunto entre Lanás Trinidad e Ing. Alberto Hernández (consultora PRAXIS LAB), Uruguay. Basado en resultados de convenios de investigación previos entre Lanás Trinidad y Facultad de Ingeniería – UDELAR.

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor anaerobio del tipo laguna cubierta (RALC), de flujo pistón con chicanas internas, posibilidad de inversión de flujo y de recirculación de líquido, con sistema de calefacción (intercambiadores de calor interno y externo).

Se trata de un reactor anaerobio construido a partir de una laguna anaerobia pre-existente, que fue modificada, convirtiéndola en un reactor anaerobio de “flujo pistón”, mediante instalación

de mamparas flotantes de PEAD para conducción del flujo de líquido. Es alimentado por gravedad desde un desarenador previo (para retirar arenas y otros áridos). Cuenta con posibilidad de inversión de flujo mediante un sistema de compuertas en las cámaras de ingreso y salida del líquido. Existe posibilidad de recirculación del líquido, mediante pozo de bombeo externo. Este diseño es el resultado de varios años de trabajo conjunto con el Departamento de Reactores de la Facultad de Ingeniería (UDELAR), iniciados en la década del '90 bajo la dirección de la Profesora María Viñas. Se ensayaron a escala de laboratorio diversos tipos de reactores, como ser UASB, reactor de contacto, UASB con rascador de flotantes, reactor flujo pistón con chicanas. Este último, si bien no es el que maximiza el contacto entre el efluente y los microorganismos, es el único que no presentó problemas de flotación de "grasas" que obstruyeran los distintos separadores gas – sólido – líquido. Debe tenerse en cuenta que el efluente de lavadero de lanas es una emulsión lipídica estabilizada por detergentes no iónicos. En condiciones de flujo de gas elevado (valores altos de m^3 de biogás por m^2 de planta de reactor), como es el caso de los reactores anaerobios de flujo líquido ascendente, se favorece la formación de espumas, y la consolidación de capas flotantes. Esto último se puede evitar en alguna medida en los reactores del tipo "continuo agitado", pero por el contrario, se favorece el espumado. Por ello, el reactor de tipo flujo pistón demostró ser una opción tecnológicamente simple pero muy apropiada. (Hernández et al. (1994)).

El reactor cuenta con un intercambiador de calor interno en base a un doble circuito de calefacción, cada uno formado por tres cañerías en paralelo, construidas en polipropileno para agua caliente (como forma de evitar temperatura de pared excesiva). El agua de calefacción funciona en circuito cerrado, intercambiando a su vez con el agua de refrigeración de los motogeneradores a biogás. Recientemente se complementó con dos intercambiadores de placas externos, en serie con el intercambiador interno, que precalientan el líquido que ingresa al reactor.

El reactor posee una cubierta inflable de PEAD, con posibilidad de almacenamiento de biogás, provista de lingas de seguridad para minimizar el efecto de los vientos. La cubierta tiene 33 bocas que se pueden usar para inspección, toma de muestras y eventualmente purga de lodos. En el perímetro y bajo la cubierta, posee una tubería de PEAD corrugado y perforado (similar a las usadas para drenajes), para captación y conducción del biogás. La tubería conforma un anillo perimetral, con una única salida, por debajo del nivel del terreno.

Para el seguimiento operativo del reactor anaerobio, se hacen muestreos de efluente de entrada y salida, para análisis semanales de DQO total y soluble, pH, Ácidos Orgánicos Volátiles, Alcalinidad al Bicarbonato. Mensualmente se mide DBO₅, Aceites y grasas, NTK, Nitrógeno amoniacal y Fósforo total.

Anualmente se determina el perfil de lodos ("batimetría") a lo largo del reactor. Se realiza luego de la parada anual de planta, aprovechando que el contenido de biogás bajo la cubierta está en un valor mínimo. Se evacúa totalmente el biogás por aspiración y posteriormente se van abriendo una a una las bocas de inspección para hacer las mediciones y muestreos. Por razones de seguridad, se trabaja de a dos personas sobre la cubierta, equipadas con detector de explosividad, máscara antigás, "línea de vida" y chalecos salvavidas. Además, otra persona siempre permanece próxima al reactor (pero fuera de la cubierta) por cualquier emergencia.

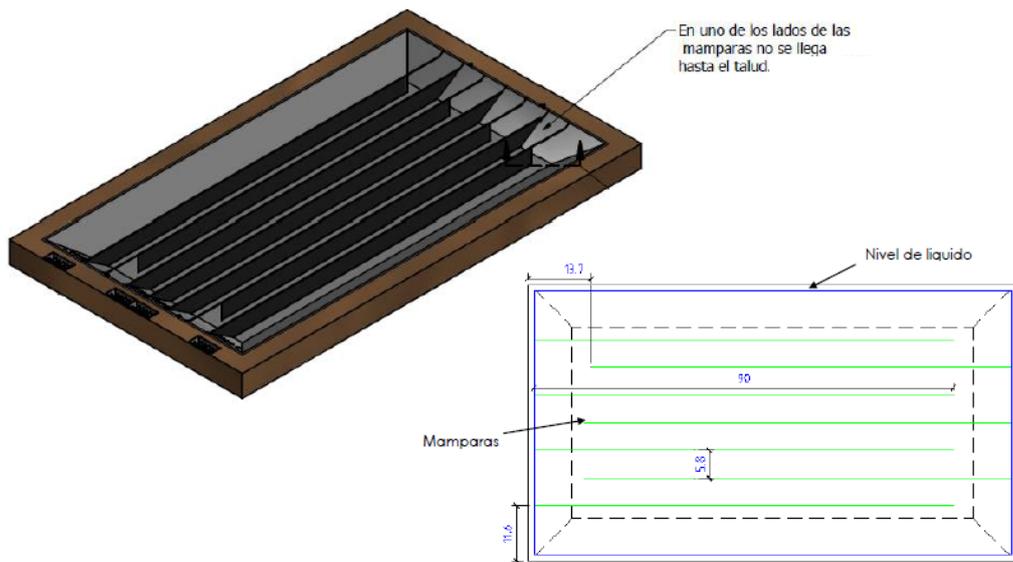
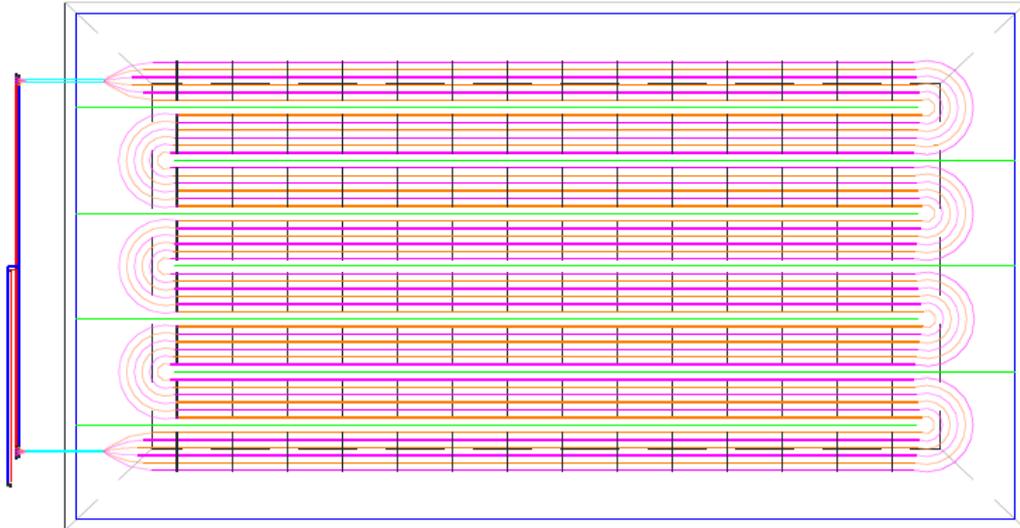


Figura 17 – Reactor anaerobio de Lanas Trinidad. Mamparas de canalización de flujo.
Fuente: Hernández (2017)



Figura 18 – Colocación de mamparas flotantes (previo a instalar la cubierta)
Fuente: Hernández (2017)



**Figura 19 – Reactor anaerobio de Lanas Trinidad. Intercambiador de calor interno (caños rojos) y mamparas (en verde).
Fuente: Hernández (2017)**



**Figura 20 – Reactor anaerobio de Lanas Trinidad. Intercambiadores de calor externos
Fuente: Fotografía del autor, con autorización de Lanas Trinidad S.A. Fecha: 15/03/2019**



Figura 21 – Vista aérea del reactor anaerobio de Lanás Trinidad
Fuente: Hernández (2017)

Caudal de alimentación: 310 m³/d (máximo 450 m³/d) (actual 250 m³/d)

Volumen de reactor: 18500 m³

TRH: 60 días

Carga a procesar: 15500 kgDQO/d (máximo 22500 kgDQO/d) (actual 8000 kgDQO/d)

Carga orgánica volumétrica (Bv): 0.84 kgDQO/m³.d (máximo 1.22 kgDQO/ m³.d) (actual 0.39 kgDQO/m³.d)

Eficiencia: 70% en DQO

Biogás

La salida de la tubería de biogás bajo la membrana, se conecta con la tubería de succión desde la cual se lo extrae mediante sopladores centrífugos. El primero de ellos trabaja succionando para que el gas atraviese la desulfuradora (ver más abajo), y posteriormente existen otros sopladores, uno para la antorcha y uno para cada motogenerador.

Para el acondicionamiento del biogás se cuenta con:

- Planta desulfuradora tipo scrubber con NaOH
- Enfriamiento / condensación / purga
- Filtros de carbón activado
- Filtro de partículas, válvula reguladora de presión, arrestallama
- Analizador de biogás on line (mide CH₄, CO₂, H₂S y O₂ cada 20 minutos)
- Caudalímetro de biogás

El biogás puede ser quemado en antorcha o usado como combustible para generación de energía eléctrica en unidades de co-generación (“Combined Heat and Power”, CHP por su sigla en inglés)

La antorcha es de tipo Flare con capacidad de quema 1,6 MW térmicos. Cuenta con: Caudalímetro de biogás, arrestallama, presóstato, sensor de llama mediante UV, piloto de encendido (con el propio biogás), PLC de control de ciclo de encendido y apagado.

Tabla 1 – Datos de composición del biogás. Fuente: Hernández (2017)

	Salida del biodigestor	Entrada al motor
CH ₄	71%	75%
CO ₂	23%	24%
O ₂	0%	0,3%
H ₂ S	650 ppm	7 ppm

Para la generación eléctrica se cuenta con 2 Motogeneradores provistos por la firma Dreyer&Bosse de Alemania. Los motores son de ciclo Otto Marca MAN 12 cilindros en V, 21.900 cm³. Cada uno esta acoplado a un alternador “Leroy-Sommer”, generador sincrónico trifásico, de 4 polos, potencia eléctrica de salida de 366 kW cada uno, voltaje 400 V/ 230 V, 50 Hz. Cuentan con intercambiadores de calor para recuperación de energía térmica proveniente del circuito de enfriamiento de los motores, y del enfriamiento de los gases de escape (cogeneración). La potencia térmica aprovechable es de 408 kW. Dentro de los contenedores donde están los Motogeneradores existe circulación forzada de aire en forma permanente; además cuentan con detector de ambiente explosivo, que activa distintas acciones y alarmas según el nivel de riesgo detectado. Todas las alarmas desencadenan señales luminosas y sonoras, perceptibles desde el exterior de los contenedores, y que además son comunicadas vía teléfono celular a los operadores y responsables del proceso.

Tabla 2 – Características de los Motogeneradores. Fuente: Hernández (2017)

PARÁMETRO		
Potencia eléctrica	kW	366
Potencia térmica (con intercambiador de calor de gases de escape)	kW	408
Consumo de biogás (a 6kWh/Nm ³)	Nm ³ /h	158
Eficiencia eléctrica a 100% de carga	%	39,3
Eficiencia eléctrica a 75% de carga	%	37,4
Eficiencia térmica	%	43,8
Eficiencia total	%	83,0



Figura 23 – Acondicionamiento de biogás, antorcha y CHPs. Fuente: Hernández (2017)

Se cuenta con un sistema de supervisión (SCADA) que almacena y grafica la información de varios parámetros operativos de la planta de tratamiento anaerobio que tienen monitoreo continuo o semicontinuo: caudal de efluente alimentado al reactor, temperaturas internas del reactor en cuatro lugares (tres en distintos puntos del líquido y un sensor de temperatura en la pared externa del intercambiador de calor interior), caudal y composición del biogás, energía eléctrica generada. Otros parámetros referidos a la generación eléctrica pueden ser consultados en pantallas “touch screen” en las unidades de cogeneración.

La energía eléctrica generada equivale al 25 a 30% del consumo eléctrico total de la planta industrial (incluyendo los consumos eléctricos en la propia PTE).

Actualmente (noviembre 2020), la producción de la planta industrial es baja, por problemas de mercado derivados de la situación mundial originada por la pandemia de COVID 19. Consecuentemente, la carga orgánica alimentada al reactor es también baja (del orden de 1/3 del valor de diseño).

Caudal de biogás: Proyectado 3100 Nm³/d. (Actual: 1400 Nm³/d, por trabajar a baja carga)

Caudal de metano: Proyectado 2300 Nm³ de CH₄/d. (Actual: 980 Nm³ CH₄/d)

Energía eléctrica: Proyectada 8,6 MWh/d. (Actual: 2 a 3 MWh/d)

3.9 Maltería Oriental S.A. (MOSA)

Rama industrial: Maltería (malteo de cebada)

Origen de la tecnología de digestión anaerobia: Desarrollo conjunto de BIOPROA - Facultad de Ingeniería – UDELAR e Ingenieros Luis Lieberman e Inés Fuentes, a partir de tanque Imhoff pre-existente.

Tipo de tecnología anaerobia: Reactor anaerobio de manta de lodos y flujo ascendente (“UASB” por su sigla en inglés).

La PTE de MOSA cuenta con dos reactores UASB operando en paralelo, construidos por transformación de antiguos tanques Imhoff. Según López et al. “partiendo de un estudio de prefactibilidad técnico-económica y de una experiencia previa a escala piloto con un reactor de 3 m³ se llevó a cabo la transformación de un viejo tanque Imhoff en un reactor UASB de 250 m³.” (...) “Del viejo tanque Imhoff se conservó la carcasa exterior y el anillo perimetral de salida, demoliéndose la estructura interior. En su lugar se construyó una estructura de hierro que incluye la campana de captación de gas, el separador de fases y el sistema de alimentación.” (...) “La geometría especial del reactor disminuye la velocidad ascensional en la zona del separador de fases, trabajando con altas velocidades en la zona inferior que ocupa la manta de lodos.” (López et al., 2004).

En la Figura 24 se presenta un corte del UASB, mostrando las distintas estructuras y componentes.

Tabla 3 – Principales dimensiones del primer UASB de MOSA.

Fuente: adaptado de Borzacconi et al.(2006)

Volumen de reactor	250 m ³
Profundidad total	8.65 m
Diámetro del primer cilindro	7.64 m
Diámetro del segundo cilindro	4.85 m
Área de colecta de gas	33.2 m ²
Cantidad de tubos de alimentación	4

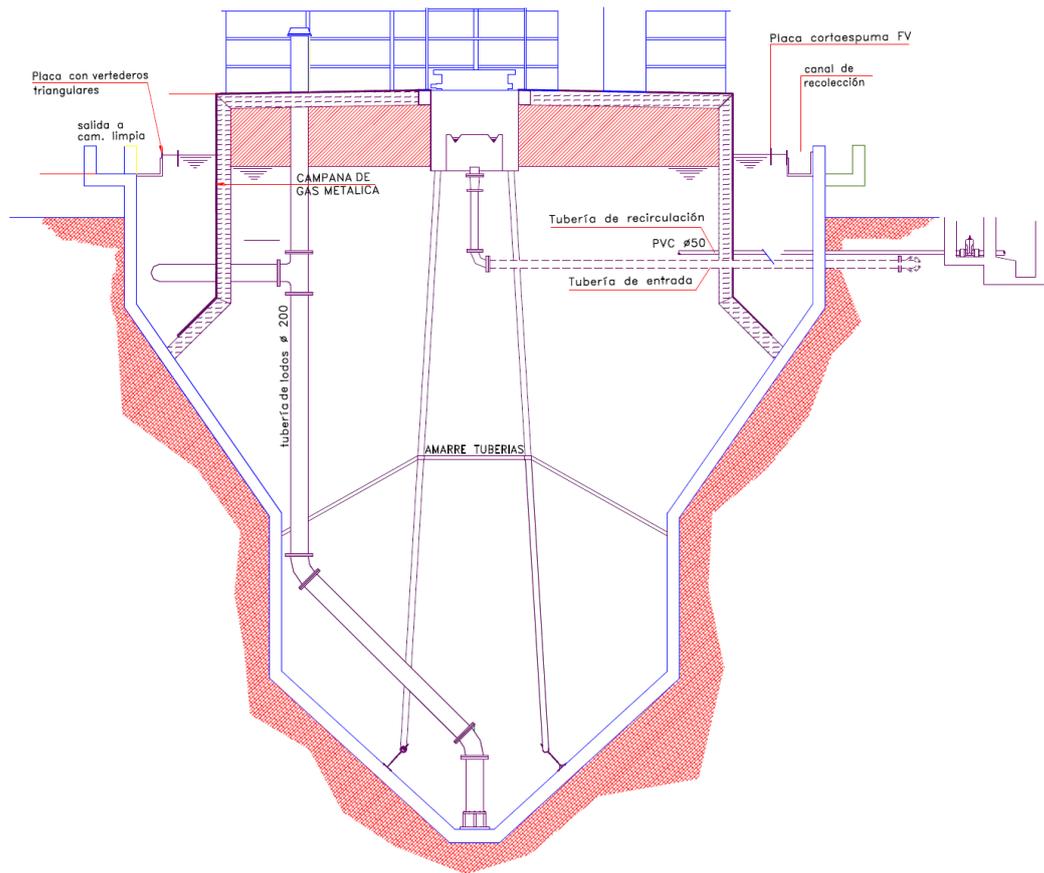


Figura 24 – Corte del reactor UASB de MOSA. Fuente: López et al. (2019)



Figura 25 – Fotografía del primer reactor UASB de MOSA. Fuente: López et al. (2019)

Los reactores anaerobios son alimentados por bombeo desde un Tanque de Homogeneización que cuenta con agitadores sumergidos (“mixers”). Se realiza dosificación de solución de hidróxido de sodio en la alimentación a cada reactor, con un lazo de control comandado por una sonda de pH en línea. La dosificación de soda se hace con una bomba de cavidad progresiva Netzsch, mediante una cañería aislada para evitar cristalización durante el invierno. También se cuenta con medición de pH en línea a la salida de los UASB. El caudal de efluente alimentado a cada reactor se mide con un caudalímetro magnético en línea; también se mide la temperatura de alimentación con una sonda en línea. Se dispone de un sistema SCADA que registra y grafica los valores medidos en línea, y el estado operativo de diversos elementos de la PTE (bombas, válvulas, etc.).

Se realizan controles analíticos de DQO (entrada y salida) y Sólidos Suspendidos Totales. Periódicamente se hacen mediciones del perfil de lodos dentro de cada reactor.

Semanalmente se purgan 8 m³ de lodos de cada reactor anaerobio. Actualmente se cuenta con centrífuga decanter y con lechos de secado para acondicionar los lodos de toda la PTE.

Caudal de alimentación: de diseño: 1047 m³/d; actualmente 600 m³/d (se bypasea una fracción del efluente bruto para utilizar como fuente de carbono en reactor desnitrificante).

Volumen de reactor: 2 reactores UASB de 250 m³ cada uno

TRH: de diseño 11.5 horas; actual: 20 horas

Carga a procesar: 1921 kgDQO/d (actual: 2325 kgDQO/d, pero varía según la zafra de cebada,)

Carga orgánica volumétrica (Bv): 3.8 kgDQO/m³.d (actual 4.7 kgDQO/m³.d)

Eficiencia: Según SADI: 50% en DQO. Valores medidos entre 80 y 90% en DQO.

Biogás

El biogás generado en los reactores UASB es conducido (impulsado por la propia presión interna de las campanas de los UASBs) hacia una estación de quemado, que opera en forma permanente. La estación de quemado de biogás fue suministrada por la empresa “Ing. Manuel Berger y Cía” y cuenta con:

- Purga de condensado
- Desulfurización mediante viruta de hierro oxidada
- Contador volumétrico de gas
- Manómetros varios
- Quemador de biogás, con sistema de encendido mediante bujías y alimentación con GLP para el arranque.

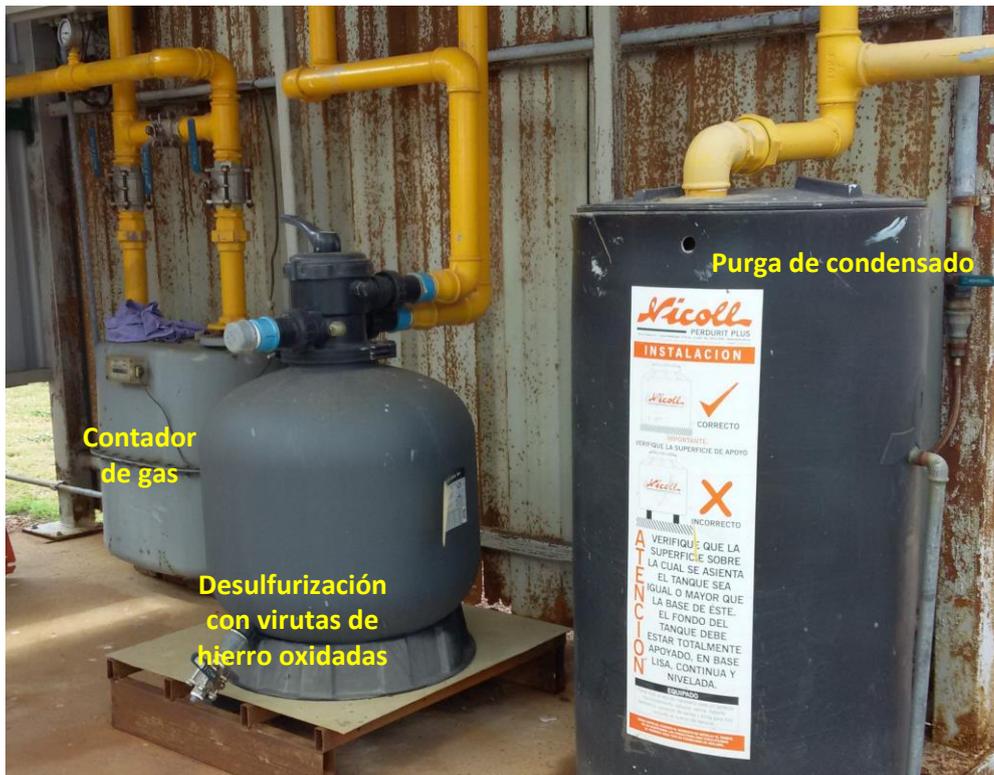


Figura 26 – Acondicionamiento de biogás en MOSA. Fuente: Fotografía del autor, con autorización de MOSA. Fecha: 6/11/2020



Figura 27 – Vista interior del quemador de biogás en MOSA (se retiró cubierta aislante delantera). Fuente: Fotografía del autor, con autorización de MOSA. Fecha: 6/11/2020

Los técnicos de MOSA informaron que en el año 2008 se estudió la posibilidad de aprovechar energéticamente el biogás, quemándolo en una caldera a fuel – oil existente en ese momento. Posteriormente la empresa pasó a usar solamente chips de madera como combustible para sus calderas.

Otra posibilidad estudiada fue el uso térmico del biogás para secado del lodo generado en la PTE, pero se demostró que la producción de metano no era suficiente para satisfacer esa demanda, que tendría que haber sido complementada con uso de gas natural.

Por las razones mencionadas, la empresa descartó la posibilidad de aprovechamiento energético del metano, y decidió continuar quemándolo en el equipo existente.

Según datos publicados por López et al. (2006) referidos a la puesta en marcha del primer reactor UASB, el porcentaje de metano medido en el biogás varió entre 72 y 79%.

Caudal de biogás proyectado: 670 Nm³/d (estimado para un caudal de efluente al reactor de 1047 m³/d)

Caudal de biogás actual: 450 - 580 Nm³/d. (dato informado por MOSA).

Nota: la empresa MOSA tiene actualmente una capacidad de procesamiento de 140.000 toneladas de malta por año, y proyecta aumentar esa capacidad a 220.000 toneladas de malta por año. Está pendiente la presentación a DINAMA de la correspondiente actualización de SADI; según lo adelantado por técnicos de la empresa, no se prevé instalar nuevos reactores anaerobios.

3.10 RESUMEN

En la Tabla 4 se resumen los datos de diseño de los sistemas de tratamiento anaerobio de efluentes industriales con captación de biogás existentes actualmente en Uruguay.

Tabla 4– Datos de diseño de los sistemas con captación de metano.

Empresa	Tipo de reactor anaerobio	Volumen (m ³)	Carga Volumétrica B _v (kgDQO aplicados/m ³ .d)	Eficiencia remoción de DQO (%)	Carga aplicada (kgDQO aplicados/d)	Carga removida (kgDQO removidos/d)	Volumen de metano captado (Nm ³ /d)
Alimentos Fray Bentos	ADI - BVF	12.000	0.28 (máximo 0.56)	85	3360	2860	770
BPU	Contacto	2x 12.000	0.28	80 en DBO ₅	6720	5400	1600
COLEME	UASB modificado	2x 38	5.5 (máximo 6.3)	90	420	380	110
CONAPROLE P8	Contacto	1x 5000 y 4x 2500 ^(a)	0.73	85	7300	6200	1940
FNC Montevideo	Biopaq [®] IC	190	21.0	80	4000	3200	890
FNC Minas	Biopaq [®] IC	190	17.8	80	3380	2700	750
Frigorífico Canelones	Contacto	2x 2248 y 1x 3640 ^(b)	1.93	82	8700	7100	1870
Lanas Trinidad	RALC Flujo Pistón	18.500	0.84 (máximo 1.22)	70	15500	10850	2300
MOSA	UASB	2x 250	3.8 (máximo 4.3)	50 (SADI) 80 (medido)	1920	1540	500

(a) Uno los reactores de 2500 m³ corresponde a un digestor de lodos.

(b) Digestor de lodos

Los valores de “Volumen de metano captado” presentados en la Tabla 4 fueron calculados con las siguientes metodologías:

- Para los casos de FNC, el proveedor de la tecnología (Paques) indica valores esperables de 0.25 a 0.35 $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgDQO}_{\text{rem}}$, por lo cual para estos casos se adoptó un valor promedio de 0.30 $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgDQO}_{\text{rem}}$;
- En el caso de Lanas Trinidad se empleó el coeficiente de 0.23 $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgDQO}_{\text{rem}}$, determinado experimentalmente en base a los datos de Gutiérrez et al. (1999);
- en los demás casos, se afectó el valor estequiométrico por el dato de eficiencia declarada por el proyectista.

En la Figura 28 se muestra gráficamente la relación entre la generación teóricamente esperable de metano en función de la carga de DQO removida. El valor que se aparta de la tendencia general (punto color naranja) corresponde al caso de Lanas Trinidad. Esto se atribuye a que en la digestión anaerobia de efluentes de lavadero de lana, existe remoción física del material lipídico (“grasa de lana”= ésteres de ácidos grasos de cadena larga y esteroides), del cual solamente es metanizable la fracción de ácidos grasos de cadena larga (Gutiérrez et al. (1999)).

Nótese que el valor de la pendiente de la recta que incluye los demás casos (0,2845) es concordante con el valor resultante de multiplicar el coeficiente estequiométrico 0.35 $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgDQO}_{\text{rem}}$ por el “Factor de corrección para el metano” (MCF) definido por IPCC (2006) con un valor de 0.8 para reactores anaerobios ($0.35 \times 0.8 = 0.28$).

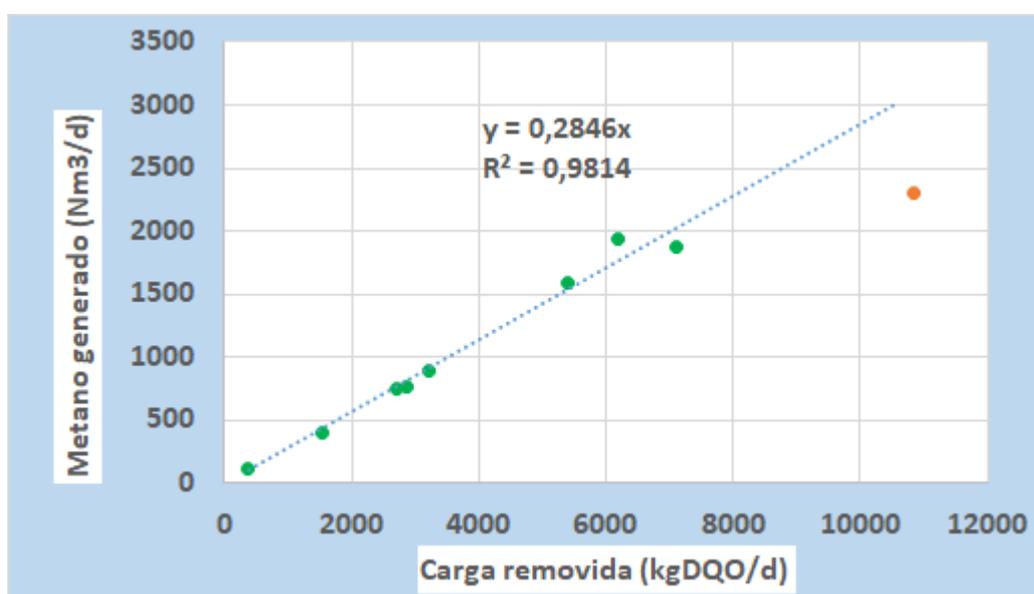


Figura 28 – Relación entre generación de metano y carga removida (valores de proyecto).

En la Tabla 5 se presentan datos de funcionamiento, y en la Figura 29 se presenta gráficamente la relación entre la generación de metano en condiciones de operación, en función de la carga de DQO removida.

Tabla 5– Resultados operativos de los sistemas con captación de metano.

Empresa	Tipo de reactor anaerobio	Período reportado	Carga Volumétrica B_v (kgDQO aplicados/ $m^3.d$)	Eficiencia remoción de DQO (%)	Carga aplicada (kgDQO aplicados/d)	Carga removida (kgDQO removidos/d)	Volumen de metano captado (Nm^3/d)
Alimentos Fray Bentos	ADI - BVF	2018	0.10	82	1260	1030	290
BPU	Contacto	2018	0.43	70	10300	7200	1700
COLEME	UASB modificado	2018	4.4	80	330	265	80
CONAPROLE P8	Contacto	2018	0.53	85	5300	4500	1270
FNC Montevideo	Biopaq® IC	2018	9.9	80	1900	1500	500
FNC Minas	Biopaq® IC	2018	7.5	85	1430	1215	350
Frigorífico Canelones	Contacto	2018	0.81	82	3650	3000	806
Lanas Trinidad	RALC Flujo Pistón	2020	0.39	70	7140	5000	980 ^(a)
MOSA	UASB	2020	4.7	85	2325	1970	464 ^(a)

Nota: Los valores de metano captado son calculados en función de la remoción de DQO, con excepción de los que se indican con (a), que son resultados de mediciones de caudal de gas.

Tabla 6 – Datos recabados por cada industria que podrían usarse para reportar captación de metano

Empresa	Medición de caudal de efluente	Análisis de DQO entrada / salida	Medición de caudal de biogás	Análisis de biogás en línea	Comentarios
Alimentos Fray Bentos	Sí	Sí	No	No (sólo durante la puesta en marcha)	Dispone de una planilla de estimación de biogás generado en función de DQO entrada y salida y del caudal alimentado.
BPU	Sí	Sí	No	No	Cuenta con análisis puntual del biogás, realizado en Lanás Trinidad.
COLEME	s/d	s/d	s/d	s/d	Planta actualmente con baja producción; problemas operativos en PTE.
CONAPROLE P8	Sí	Sí	Sí	Sí	Caudalímetro magnético de biogás y analizador de porcentaje de metano en línea
FNC Montevideo	Sí	Sí	Sí	No	
FNC Minas	Sí	Sí	Sí	No	
Frigorífico Canelones	Sí	Sí	s/d	s/d	Planta actualmente parada, no se posee información
Lanás Trinidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Caudalímetro magnético de biogás y analizador de composición de biogás (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂) en línea
MOSA	Sí	Sí	Sí	No	Dispone de contador mecánico de gas. Análisis puntuales de composición de biogás realizados por Bioproa – FING - UDELAR

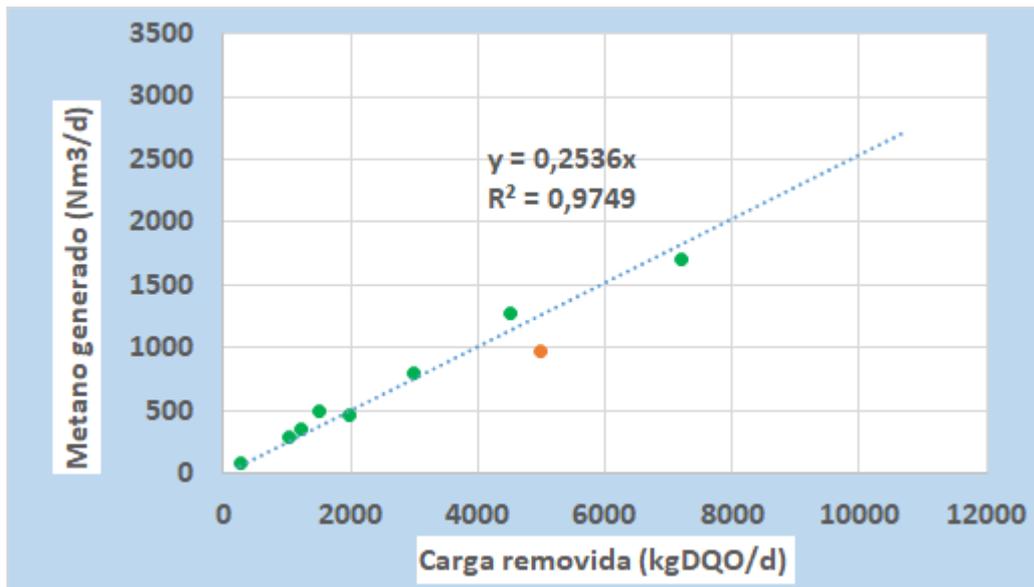


Figura 29 – Relación entre generación de metano y carga removida (valores de operación).

De la comparación entre las gráficas de las Figuras 28 y 29, se concluye que la pendiente de la recta de metano generado versus carga removida en condiciones de operación es un 10% menor en comparación con la de proyecto. Esto puede deberse, entre otros factores, a la influencia de la temperatura en los reactores anaerobios, que en su mayoría no son calefaccionados.

3.11 COMENTARIOS

3.11.1 Tipos de reactores y cargas de diseño

La descripción de casos presentada previamente, y en particular los valores de carga volumétrica aplicada (B_v) en condiciones de proyecto a los diferentes reactores anaerobios, permite clasificarlos en tres categorías, correspondientes a distintos grados de complejidad tecnológica, que a su vez se asocian con diferentes rangos de B_v (Tabla 7).

Tabla 7 – Categorías de reactores anaerobios.

Categorías de reactores	Rango de B_v (kgDQO aplicados/m3.d)	Tipos de reactores	Casos
Baja carga	<2	Contacto. RALC Flujo pistón. ADI-BVF	BPU; Conaprole; Frig. Canelones Lanas Trinidad Alimentos Fray Bentos
Media carga	Entre 2 y 15	UASB UASB modificado	MOSA COLEME
Alta carga	>15	Circulación interna	FNC Montevideo, FNC Minas

Mayores valores de B_v implican reactores más compactos; en particular los Biopaq® IC son reactores muy esbeltos, con poco requerimiento de espacio.

En general, la posibilidad de trabajar a mayores cargas volumétricas se asocia a un mejor contacto del lodo anaerobio con el efluente a tratar, lo cual redunda en mayores eficiencias por unidad de volumen de reactor. No obstante, la opción de reactores de baja carga puede verse justificada por razones diversas: en general son de menor costo de inversión; son más simples de operar; intrínsecamente más estables al operar a mayores tiempos de residencia hidráulica; pueden estar indicados por necesidades hidrodinámicas (baja agitación, como en el caso del efluente de lavadero de lanas). Como contrapartida, al no estar provistos de separadores sólido – líquido internos, el tiempo de residencia del lodo es próximo al tiempo de residencia hidráulico, lo cual lleva a considerar la necesidad de instalar separadores externos, en algunos casos con retorno del lodo al reactor.

Los reactores de media y alta carga suelen requerir de sistemas de control más robustos (por ejemplo, control de pH), y una supervisión analítica mayor por parte de los operadores (análisis más frecuentes de DQO, SST, perfil de lodos, etc.).

3.11.2 Datos de proyecto vs resultados de operación

En la Figura 30 se presenta una comparación entre los valores de carga aplicada (kgDQO/d) de diseño y de operación, para los casos relevados.

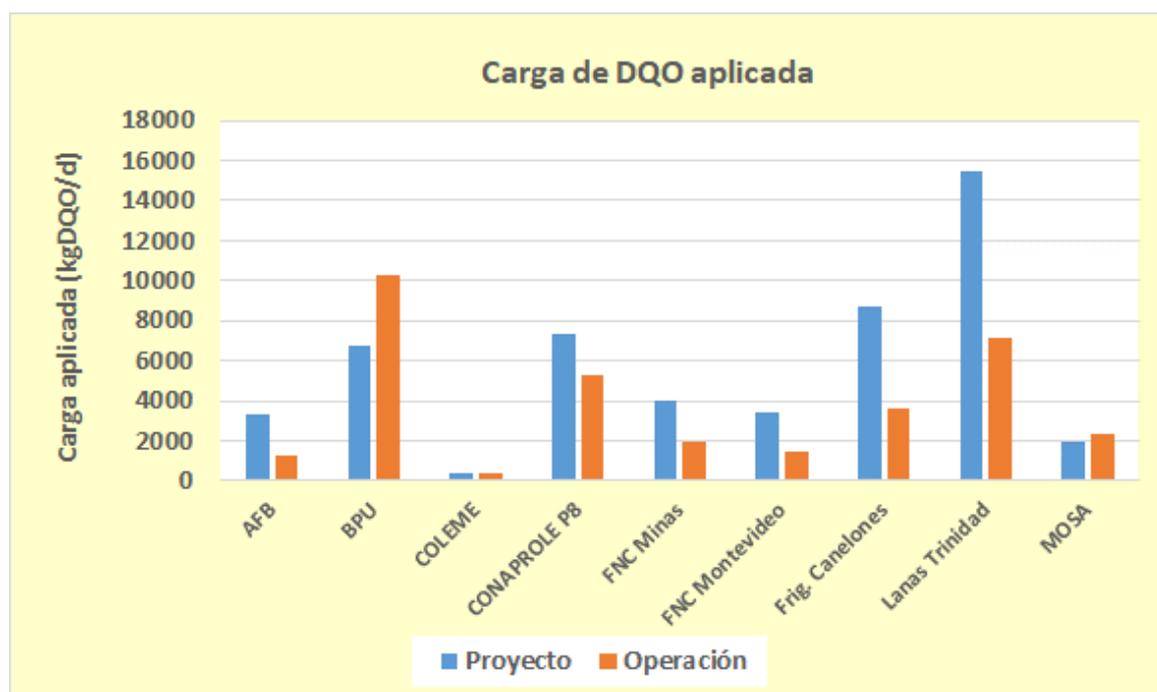


Figura 30 – Comparación entre cargas de diseño y cargas aplicadas en condiciones de operación (referidas a las Tablas 4 y 5)

Resulta claro de la gráfica anterior, que en los casos en que se deben procesar mayores cargas diarias de DQO se optó por reactores de baja carga volumétrica (menores valores de Bv, según Tablas 4 y 5).

Las diferencias entre los valores de carga diaria de proyecto y de operación tienen varias explicaciones:

- a) Casos en que hubo una disminución de la producción de la planta industrial en relación a lo proyectado (Frig. Canelones, Lanas Trinidad), y por lo tanto menor generación de efluente, o casos en que aún no se llegó al nivel de producción de diseño del proyecto (AFB).
- b) Casos en los que los reactores fueron sobredimensionados en relación a los valores promedio de diseño (reactores de FNC).
- c) Situaciones en las que actualmente el efluente es más concentrado que en las condiciones de proyecto (MOSA).
- d) Menor carga disponible para tratamiento anaerobio, debido a que se usa una fracción de efluente como fuente de carbono para remoción de nitrógeno (CONAPROLE P8).
- e) Situaciones en las que se combinan algunos de los efectos anteriores: efluente más concentrado que lo proyectado, pero se desvía una fracción hacia la remoción de nutrientes (BPU).

En relación a los volúmenes de metano captados (Figura 31), los comportamientos siguen las mismas tendencias generales que las cargas aplicadas a los reactores.

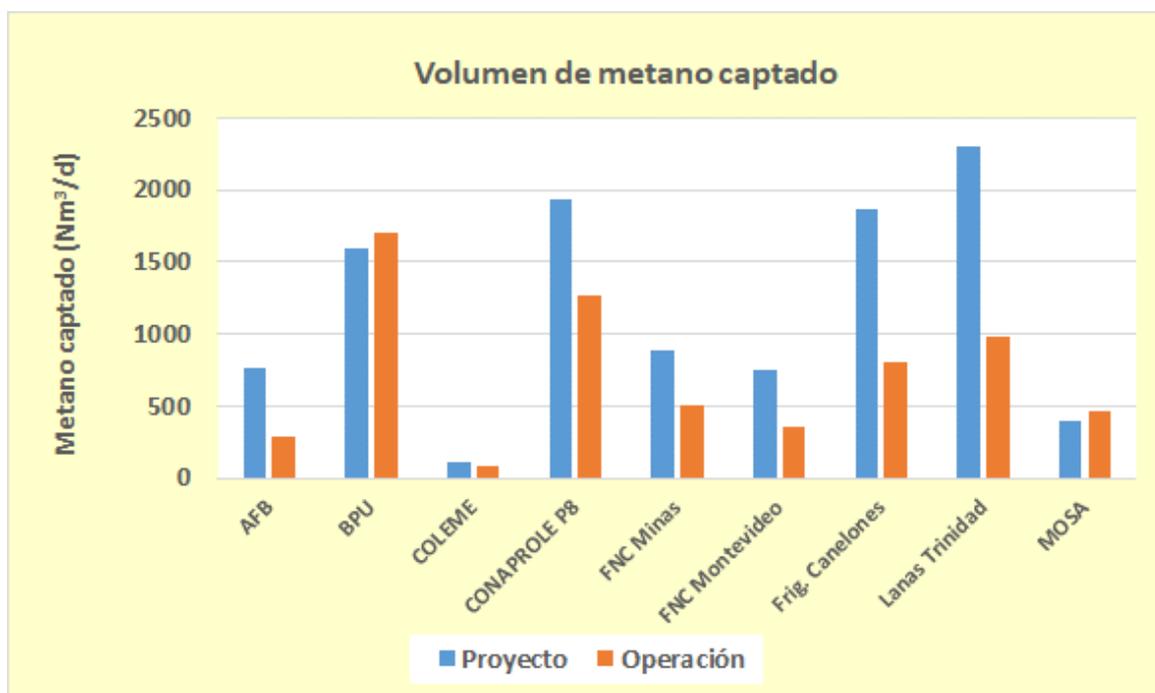


Figura 31 – Comparación entre volúmenes diarios de metano proyectado y generado en condiciones de operación (referidos a las Tablas 4 y 5)

Los usos del biogás en los casos relevados se resumen y comentan en la Tabla 8.

Tabla 8 – Usos del biogás.

Uso del biogás	Caso	Comentarios
Venteo a la atmósfera	BPU	La empresa afirma que el aprovechamiento es muy costoso y no rentable.
Combustión en antorcha o quemador, sin recuperación de calor	MOSA FNC Montevideo	FNC Montevideo está instalando recuperación de calor para precalentar el influente al reactor.
Combustión con recuperación de calor, para calentamiento del influente	AFB COLEME	En COLEME existe discontinuidad en la producción industrial, que ocasionaron problemas operativos en la PTE.
Combustión en caldera (con antorcha como respaldo de seguridad)	CONAPROLE P8 Frigorífico Canelones	CONAPROLE comenzó a quemar en caldera recientemente, luego de solucionar problemas en el gasoducto. Frigorífico Canelones actualmente no tiene producción industrial; estaba previsto quemar el biogás en caldera.
Cogeneración (generación eléctrica y agua caliente), con antorcha como respaldo de seguridad	Lanas Trinidad	Lanas Trinidad genera energía eléctrica para autoconsumo y venta a UTE; el agua caliente la emplea para calentar el influente y también el propio reactor internamente.

3.12 BIBLIOGRAFÍA

Expedientes de SADI e IAOs de diversas industrias (acceso suministrado por DCAA de DINAMA).

ADI-BFV® Reactor. Evoqua Water Technologies. Recuperado el 12/11/2020 de: <https://www.evoqua.com/siteassets/documents/products/anaerobic/adi-bvf-reactor-brochure.pdf>

Borzacconi, L., López, I., Passeggi, M. (2006). Start up and steady state results of a full scale UASB reactor treating malting wastewater. *Water Sci Technol* 54 (2): 261–267.

Gutiérrez, S., Hernández, A y Viñas, M. (1999) Mechanism of degradation of wool wax in the anaerobic treatment of woolscouring wastewater. *Water Sci Technol* 40 (8): 17–23.

Hernández, A. y Viñas, M. (1994). Tratamiento anaerobio de efluentes de lavadero de lanas *Memorias del III Taller y Seminario Latinoamericano de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales*. Pág 461 – 465. Ed. Graphis, Montevideo, Uruguay.

Hernández, A. (2017). Generación eléctrica con biogás y gestión ambiental en el marco de la economía circular. Presentación oral en el *VI Encuentro regional de Ingeniería Química*. 25 al 27 de octubre de 2017, Montevideo, Uruguay.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006) Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5: Desechos. Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales. Recuperado de: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol5.html>

López, I., Passeggi, M. y Borzacconi, L. (2019) Aportes de la tecnología anaerobia al tratamiento de efluentes industriales en el Uruguay. Presentado en el *II Congreso de Agua, Ambiente y Energía*. Asociación de Universidades Grupo Montevideo. 25 al 27 de setiembre de 2017, Montevideo, Uruguay. Recuperado de: https://www.fing.edu.uy/imfia/congresos/caae//assets/trabajos/109_Aportes_de_la_tecnolog%C3%ADa_anaerobia_al_tratamiento_de_efluentes_industriales_en_el_Uruguay.pdf

López, I., Passeggi, M., Boix, C., Barcia, R., Borzacconi, L. y Lieberman, L. (2006). Generación de lodos y evolución de la biomasa de un reactor UASB escala real tratando efluente de maltería. Presentado en *XXX Congreso de AIDIS*, Punta del Este, Uruguay.

Passeggi, M., López, I. y Borzacconi, L. (2009). Integrated anaerobic treatment of dairy industrial wastewater and sludge. *Water Sci Technol* 59 (3): 501–506.

3.13 ANEXO

Se presenta un resumen de caracterización de biodigestores agitados instalados actualmente en Uruguay, correspondiente a tecnologías de las empresas Weltec Biopower GmbH (en Estancias del Lago) y Archea New Energy (en Granmolino).

3.13.1 Biodigestor Weltec

Estancias del Lago (EDL) dispone de 8 biodigestores suministrados por la empresa Weltec Biopower GmbH de Alemania (<https://www.weltec-biopower.com/>) para tratamiento de estiércol de vacas lecheras estabuladas, restos de alimentación del ganado, y efluente y residuo graso de fábrica de leche en polvo.

Se trata de biodigestores agitados, construido en paneles de acero inoxidable reforzados de manera modular, ensamblados dentro de una base de hormigón armado y fijados usando perfiles y conexiones de acero inoxidable. En las culatas verticales, los paneles de acero son solapados y emperrados en dos filas con juntas de acero inoxidable.



Figura A1 – Biodigestor WELTEC en Estancias del Lago (EDL)

Fuente: fotografía del autor, con autorización, visita de BIOVALOR a EDL, 31/3/2017

A continuación se detallan las características generales y algunos de los componentes de los biodigestores Weltec, en base a datos genéricos suministrados al consultor por el representante regional de la empresa Weltec Biopower (Claudio Díaz, comunicación personal 14/05/2019)

- **Aislación y revestimiento del tanque fermentador**

Aislación térmica de poliestireno 80 mm ($k=0,35W/mK$), clase de inflamabilidad E (norma EN13501-1), revestido con láminas de aluminio trapezoidal, 20/125, calibre 0,5mm

- **Escotillas de inspección**

El biodigestor se suministra con 2 escotillas de inspección, con “limpia parabrisas” manual y sistema de limpieza por chorro de agua.



Figura A2 – Escotilla de inspección con sistema de lavado

(Fuente: <https://www.biogaskontor.de/>)

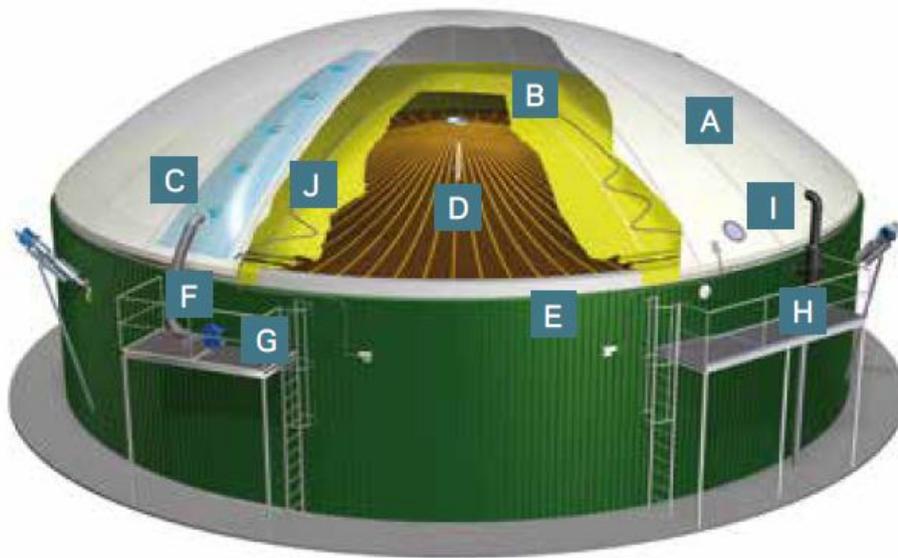
- **Techo de fermentador de doble diafragma (gasómetro de tanque)**

Techo inflable de poliéster, cubierto en ambas caras con PVC-P resistente a radiación ultravioleta. Volumen máximo=1359m³, Volumen variable =1060m³, H=5,53m
Presión operativa entre ambas membranas: aprox. 2 mbar.
Presión operativa del lado del gas: máx. 5 mbar.

En la Figura A3 se presenta una imagen genérica del sistema de doble membrana.

Los objetivos de la cubierta exterior son:

- i) mantener una conformación exterior apropiada para evitar la acumulación de agua de lluvia sobre la lona
- ii) minimizar la influencia de los vientos, evitando el “flameo” de la cubierta;
- iii) ayudar a mantener una presión constante sobre la cubierta inferior. Para todo ello existen varios ciclos de control, que regulan la operativa normal, y también que ofician como mecanismos de seguridad ante sobrepresiones.



A membrana exterior B membrana interior C AIRFLOW-SYSTEM™
 D sistema de cintas E anillo de anclaje F válvula de conservación de aire
 G soplantes H válvula de seguridad I mirilla J medición del nivel del depósito

Figura A3 – Dibujo esquemático de sistema de techo de doble membrana para biodigestor anaerobio.

Fuente: <https://ceno.sattler.com/es/gasspeicherung>

- **Equipo de inflado de techo de doble diafragma**

La cubierta externa, en PVC resistente a UV, se mantiene inflada con aire por medio de un soplador (equipo G – 102, con redundancia por seguridad).

Ventilador doble (2x 0,18kW ATEX), caudal máximo 500 m³/h, con conexión al techo.



Figura A4- Ventiladores para inflado de techo del biodigestor Weltec, Estancias del Lago

Fuente: fotografía del autor, con autorización, visita de BIOVALOR a EDL, 31/3/2017

- **Agitador de eje prolongado Biobull 11kW (2 piezas por biodigestor)**

Eje de agitación diagonal de acero inoxidable 100x100mm con perforación hermética en la pared, con colector de líquido en el área del gas. Soporte externo y bastidor del motor. 2 juegos de propelas agitadoras de aprox. Ø 2,65m, motoreductor 11kW/400V/50Hz en ejecución segura de explosión y variador de frecuencia.



Figura A5 – Agitador doble de eje inclinado

Fuente: <https://www.weltec-biopower.es/>

- **Agitador sumergible**

Modelo TMR 11kW

Rendimiento (en agua): 5010 m³/h, empuje axial 3040N.

Motor trifásico 440 +/- 5% VAC, 50Hz (nominal), 1470rpm, caja IP68, clase IE2. Caja de motor en hierro fundido, propela agitadora en acero inoxidable Ø 900 mm, 193 rpm. Motor 11kW, cable eléctrico de 15 m, deslizador SST, prensaestopas vertida, motor con llenado de aceite. Soporte del agitador hermético al gas. Cable de izaje y soporte de pared, fijación al suelo y riel de guía en acero inoxidable.



Figura A6 – Agitador sumergible

Fuente: <https://www.weltec-biopower.es/>

- **Sistema de calefacción interno**

El sistema calefacción con agua caliente de los biodigestores de Weltec consiste en un serpentín interno con circulación de agua caliente. Será una tubería de acero inoxidable, de diámetro 63mm, superficie = 0,297m²/m, ubicada en la mitad inferior de la pared del biodigestor.



Figura A7 – A la izquierda, vista interior de un biodigestor Weltec, con la tubería de calefacción, y el soporte de la cubierta interior. A la derecha, detalle de la tubería de calefacción

Fuente: <https://www.weltec-biopower.es/>

- **Tratamiento y manejo del biogás**
 - **Válvula de seguridad para biogás**

Instalación compuesta por una brida de conexión de gas, una válvula eléctrica y una válvula manual, una válvula contra sobrepresión y depresión, un interruptor de presión (+ 0,4 mbar) y tubos de acero inoxidable hasta el borde superior de la regla.

Las ventajas de la válvula son:

- Su protección contra heladas gracias al contacto de la pared posterior con la pared caliente del digestor, por lo cual no es necesaria la instalación de un calentador de reserva

- El biogás caliente circula a través de la válvula, su constitución específica permite utilizar la condensación del biogás como nivel de presión y depresión y no requiere casi ningún mantenimiento.



Figura A8– Válvula de seguridad para biodigestores con techo de membrana

Fuente: <https://www.biogaskontor.de/>

○ **Soplador para desulfurización de biogás**

Con motor de 0,44kW y fijación

El biogás es almacenado en la cubierta inferior del sistema de doble cubierta del biodigestor. En ella se insufla un volumen controlado de aire mediante un pequeño soplador (ver Figura A9). El caudal de aire se mide con un rotámetro y se ajusta en función de la concentración de oxígeno interna. El objetivo es mantener un aporte mínimo de oxígeno, que favorece el desarrollo de las bacterias oxidantes de sulfuros (mecanismo de desulfurización biológica del biogás).

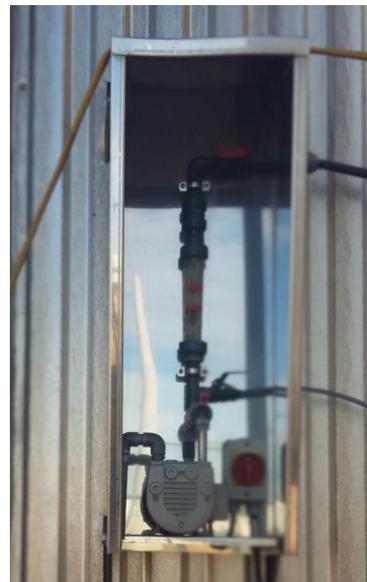


Figura A9 – Ventilador y rotámetro para aire de desulfurización

Fuente: fotografía del autor, con autorización, visita de BIOVALOR a EDL, 31/3/2017

3.13.2 Biodigestor Archea New Energy

Granmolino S.A. dispone de un biodigestor suministrado por la firma Archea New Energy (<https://www.archea-biogas.com/index.htm>) para digestión anaerobia de estiércol ovino (4000 ovejas estabuladas) y efluente de fabricación de quesos.

La planta de tratamiento anaerobio y generación de biogás cuenta con los siguientes componentes:

Biodigestor. Instalado durante el año 2019, se encuentra en fase de puesta en marcha. Es un biodigestor del tipo “tanque agitado”, construido en hormigón armado y con recubrimiento interior de geomembrana de PEAD, para asegurar estanqueidad. Está provisto de:

- Captación de gas mediante cubierta inflable (con membrana única, a diferencia del caso anterior).
- Calentamiento interno del biodigestor por tubería de agua caliente
- Sistema de agitación (agitadores sumergidos, similares a los del caso anterior)
- Medición de presión interna de gas
- Válvula de seguridad de biogás

El **biogás** puede tener los siguientes destinos:

- Antorcha de seguridad
- Unidad de cogeneración de energía eléctrica y térmica (CHP “combined heat and power”). Motogenerador a biogás para generación eléctrica (150 kW eléctricos) con destino a la red de UTE en régimen de microgeneración. Intercambiador de calor de placas para recuperación de energía térmica (enfriamiento del motor y de los gases de escape) para producir agua caliente para calentar el biodigestor. Cuenta con analizador de biogás.
- Caldereta a biogás para calentamiento de agua (para cuando no está funcionando el motogenerador).

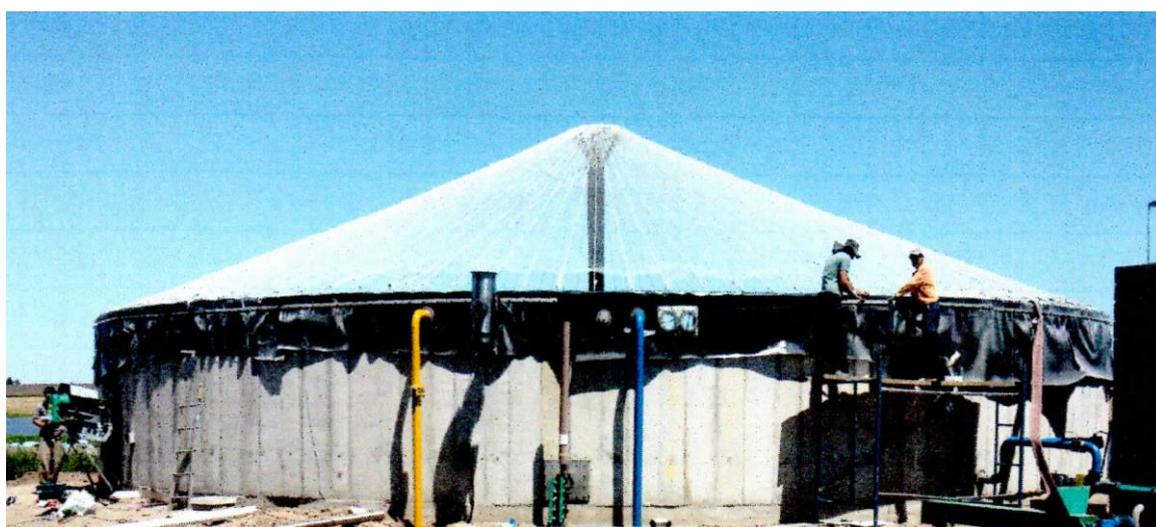


Figura A10 – Biodigestor Archea en Granmolino, en etapa de montaje.

Fuente: DINAMA, trámite de AAO de Granmolino

4 SUPRODUCTO 1.2

El alcance de este Subproducto es generar un *“listado de establecimientos industriales que según las características actuales de sus sistemas de tratamiento, podrían presentar la alternativa de la instalación de un mecanismo de captura viable, justificando dicha oportunidad”*.

4.1 Información de base

Se toma como fuente de información de base, el archivo Excel® “Inventario 2018.xlsx” elaborado por la Ing. Alfonsina Fernández del DCAA de DINAMA. Esa información es la misma que se suministra a la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente para la elaboración del correspondiente Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), en lo relativo a las emisiones de la *Categoría 4 – Desechos, Subcategoría 4.D – Tratamiento y eliminación de aguas residuales*. En dicha planilla se calcula la generación anual de metano para cada industria (expresada como kg de DQO equivalentes) a partir de:

- Dato de volumen anual de efluente bruto (Fuente: IAO)
- Concentración de DQO en efluente bruto (Fuente: IAO o valor promedio por categoría industrial en los casos en que no lo reportan)
- Eficiencia de remoción de DQO en el tratamiento anaerobio (Fuente: Proyecto de Ingeniería – SADI).
- En algunos casos solo se dispone de información de eficiencias en DBO₅ o exclusivamente de concentraciones expresadas en DBO₅. En esos casos, y a falta de mejor información, para el cálculo se asume equivalencia entre los kilogramos removidos de DBO₅ y DQO.

A partir de los datos individuales, en la planilla se presentan listados ordenados de las industrias, discriminando entre aquellas que emiten directamente a la atmósfera y aquellas que captan el metano y lo queman, ya sea en antorcha u otro medio. Se calculan los porcentajes de kg de DQO equivalente a metano para cada industria, expresados sobre el total emitido o captado. Las industrias que emiten metano a la atmósfera se identifican en la Tabla 8 designándolas con el tipo de rama industrial (por ejemplo, “cárnica” o “láctea”) y un número correlativo dentro de cada rama, que resulta del ordenamiento según porcentaje de metano emitido en relación al total generado nacional. La numeración comienza con los mayores emisores de cada rama y continúa en orden decreciente de emisiones.

En los casos de las industrias que ya realizan captación de metano, se las identificó con su razón social o nombre comercial, en el entendido de que son situaciones de conocimiento público.

Los resultados indican que al año 2018 la captación de metano era el 17,8% del total generado, todavía inferior a la meta de 30% establecida en la Primera Contribución Determinada a nivel Nacional al Acuerdo de París como *“medida de mitigación del cambio climático que Uruguay implementará de manera de aportar al logro de los objetivos condicionales de mitigación establecidos en esta CDN.”*

Tabla 8 – Listados ordenados de industrias según porcentaje de metano emitido o captado. Fuente: adaptado de la planilla “Inventario 2018.xlsx”, Alfonsina Fernández, DCAA - DINAMA

Industrias	Kg DQO metano/año 2018	% sobre el total emitido	% sobre el total generado
EMISIÓN A LA ATMÓSFERA			
Cárnica 1	1.762.230	12,71%	10,44%
Cárnica 2	1.139.774	8,22%	6,75%
Cárnica 3	1.025.631	7,39%	6,08%
Cárnica 4	792.971	5,72%	4,70%
Alimenticia 1	782.905	5,64%	4,64%
Láctea 1	569.728	4,11%	3,38%
Cárnica 5	527.492	3,80%	3,12%
Láctea 2	518.999	3,74%	3,07%
Cárnica 6	517.720	3,73%	3,07%
Cárnica 7	464.058	3,35%	2,75%
Cárnica 8	377.111	2,72%	2,23%
Avícola 1	369.648	2,67%	2,19%
Cárnica 9	339.872	2,45%	2,01%
Textil 1	335.310	2,42%	1,99%
Láctea 3	279.177	2,01%	1,65%
Cárnica 10	264.113	1,90%	1,56%
Cuero 1	261.804	1,89%	1,55%
Cárnica 11	233.503	1,68%	1,38%
Cárnica 12	232.576	1,68%	1,38%
Cárnica 13	226.641	1,63%	1,34%
Alimenticia 2	187.053	1,35%	1,11%
Cárnica 14	182.624	1,32%	1,08%
Textil 2	159.558	1,15%	0,95%
Láctea 4	145.608	1,05%	0,86%
Cárnica 15	143.337	1,03%	0,85%
Cárnica 16	140.425	1,01%	0,83%
Avícola 2	132.058	0,95%	0,78%
Láctea 5	129.739	0,94%	0,77%
Cárnica 17	125.197	0,90%	0,74%
Cárnica 18	115.020	0,83%	0,68%
Láctea 6	110.999	0,80%	0,66%
Textil 3	90.396	0,65%	0,54%
Láctea 7	86.539	0,62%	0,51%
Cárnica 19	81.893	0,59%	0,49%
Cárnica 20	69.362	0,50%	0,41%
Cárnica 21	68.264	0,49%	0,40%
Láctea 8	64.387	0,46%	0,38%
Cárnica 22	64.370	0,46%	0,38%
Cárnica 23	62.865	0,45%	0,37%
Láctea 9	62.052	0,45%	0,37%

Láctea 10	57.241	0,41%	0,34%
Chacinería 1	56.695	0,41%	0,34%
Textil 4	45.882	0,33%	0,27%
Láctea 11	37.450	0,27%	0,22%
Cárnica 24	36.123	0,26%	0,21%
Láctea 12	32.101	0,23%	0,19%
Láctea 13	31.670	0,23%	0,19%
Cárnica 25	26.963	0,19%	0,16%
Alimenticia 3	26.433	0,19%	0,16%
Pescado 1	24.086	0,17%	0,14%
Láctea 14	23.101	0,17%	0,14%
Pescado 2	22.972	0,17%	0,14%
Cárnica 26	22.654	0,16%	0,13%
Láctea 15	22.029	0,16%	0,13%
Cárnica 27	18.454	0,13%	0,11%
Cárnica 28	16.831	0,12%	0,10%
Cárnica 29	14.187	0,10%	0,08%
Avícola 3	14.181	0,10%	0,08%
Cárnica 30	13.160	0,09%	0,08%
Cárnica 31	11.275	0,08%	0,07%
Láctea 16	9.999	0,07%	0,06%
Chacinería 2	7.871	0,06%	0,05%
Cárnica 32	6.367	0,05%	0,04%
Láctea 17	5.821	0,04%	0,03%
Cárnica 33	5.806	0,04%	0,03%
Avícola 4	4.736	0,03%	0,03%
Láctea 18	4.541	0,03%	0,03%
Láctea 19	4.082	0,03%	0,02%
Chacinería 3	3.538	0,03%	0,02%
Química 1	2.922	0,02%	0,02%
Láctea 20	2.801	0,02%	0,02%
Láctea 21	2.236	0,02%	0,01%
Cárnica 34	1.965	0,01%	0,01%
Láctea 22	1.523	0,01%	0,01%
Alimenticia 4	1.449	0,01%	0,01%
Láctea 23	1.403	0,01%	0,01%
Bebidas 1	1.194	0,01%	0,01%
Bodega 1	1.044	0,01%	0,01%
Cárnica 35	996	0,01%	0,01%
Pescado 3	918	0,01%	0,01%
Alimenticia 5	756	0,01%	0,00%
Láctea 24	610	0,00%	0,00%
Pescado 4	517	0,00%	0,00%
Alimenticia 6	356	0,00%	0,00%
Láctea 25	315	0,00%	0,00%

Bodega 2	13	0,00%	0,00%
TOTAL EMITIDO	13.870.276	100,0%	82,2%

Industrias	Kg DQO metano/año 2018	% sobre el total captado	% sobre el total generado
CAPTACIÓN DE METANO			
COLEME	45360	1,5%	0,27%
MOSA	244794	8,1%	1,45%
FNC Montevideo	518345	17,2%	3,07%
FNC Minas	246241	8,2%	1,46%
Lanas Trinidad	148868	4,9%	0,88%
CONAPROLE - Villa Rodriguez (Nº 8)	1554688	51,6%	9,21%
Alimentos Fray Bentos	252101	8,4%	1,49%
TOTAL CAPTADO	3.010.396	100,0%	17,8%

TOTAL GENERADO (Emitido + Captado) 2018	16.880.672	Kg DQO metano/año
--	-------------------	--------------------------

Como comentario general sobre la Tabla 8, se entiende y comparte que la misma fue elaborada con la información disponible, que puede no reflejar estrictamente las condiciones operativas reales de las unidades de tratamiento anaerobio. Esto es una indicación a tener en cuenta más adelante en esta Consultoría, cuando se aborde el Sub-producto 2.4 *“Propuesta para la incorporación de información de mecanismos de captura de metano de las plantas industriales con sistemas de tratamiento anaerobio, en los instrumentos actuales de autorización y control de DINAMA, que faciliten el registro de los datos y resultados de la captura de metano que se van incorporando.”*

En particular, se deja constancia que este consultor considera que los valores de generación de metano en los lavaderos de lanas incluidos en “Inventario 2018.xlsx” pueden tener sesgos importantes.

4.2 Listado de casos posibles

Como ya se indicó, en el Subproducto 1.2 se solicita la elaboración de un *“listado de establecimientos industriales que según las características actuales de sus sistemas de tratamiento, podrían presentar la alternativa de la instalación de un mecanismo de captura viable”*. En ese marco, se considera que un mecanismo de captura de emisiones que puede ser viable en algunos casos de PTE actuales, consiste en la cobertura superior de lagunas anaerobias (o eventualmente otro tipo de reservorios, piletas o tanques donde exista digestión anaerobia con emisión de metano a la atmósfera) para captación y quema del metano.

La instalación de la cubierta superior de una laguna se realiza generalmente construyendo la cubierta en el lugar, en forma paralela y adyacente a uno de los lados de la laguna. En el caso de las membranas de PEAD, se van soldando en campo las fajas del material, y la cubierta se va deslizando sobre la laguna, traccionando con mecanismos apropiados un frente de avance de la cubierta desde el lado opuesto, hasta cubrir totalmente el área requerida.

Para que esta tarea sea realizable en una laguna existente, deben darse algunas condiciones:

- Las dimensiones de la laguna o pileta no deben ser excesivas, para permitir la manipulación de la cubierta al momento de la instalación. Se entiende que no son convenientes dimensiones mayores a 100 m x 50 m.
- La planta de la laguna debe ser de una forma geométrica lo más regular posible (preferentemente rectangular o cuadrada). Las formas irregulares pueden ocasionar interferencias de los taludes con la cubierta, que pueden dar lugar a roturas de la cubierta por desgarro o pinchadura.
- Los taludes de la laguna deben presentar buena compactación, y dimensiones tales que permitan excavar una zanja de anclaje de la cubierta a lo largo de todo el coronamiento.
- Es recomendable que los coronamientos de todos los taludes se encuentren a un mismo nivel de cota.

La colocación de una cubierta superior en las lagunas anaerobias existentes permite la captura del metano generado, con una tecnología relativamente simple de implementar. No obstante, además de colocar la cubierta, es recomendable completar la transformación de las lagunas anaerobias “clásicas” en reactores anaerobios del tipo laguna cubierta (RALC), incluyendo sistemas de purga de lodos y mecanismos de recirculación y /o agitación del contenido. Es recomendable también la instalación de sistemas de calentamiento del efluente, buscando que la temperatura interna de los reactores sea próxima al rango óptimo para la digestión anaerobia en condiciones mesófilas (35 – 38 °C).

Como comentario general, se observa que en muchos casos las lagunas anaerobias funcionan en la práctica como sedimentadores o separadores de grasa por flotación (por ejemplo, en frigoríficos). En esos casos, deberían considerarse mejoras en los sistemas de pretratamiento (separación de sólidos) conjuntamente con la posibilidad de cubrir las lagunas. Si bien las lagunas

cubiertas deben incluir sistemas de purga de lodos, no es recomendable que cumplan funciones de sedimentador primario, ya que sería muy dificultosa su limpieza periódica.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, conjuntamente con los técnicos del DCAA se realizó una revisión del listado de la Tabla 8, buscando identificar aquellos establecimientos que por las condiciones actuales de sus PTE podrían instalar sistemas de captura de metano.

Para ello deben satisfacer las siguientes condiciones: a) las lagunas anaerobias cumplen con los criterios detallados más arriba; b) las características generales de las empresas (tamaño, capacidad técnica) y su condición productiva actual son adecuadas para encarar un proyecto de este tipo.

Como criterio de ordenamiento, se revisaron los casos posibles en el orden en que figuran en la Tabla 8 (criterio de volumen). En la Tabla 9 se presentan los resultados de la evaluación (casos posibles), los cuales se discriminaron en: i) casos más probables (color violeta y **negrita**); y ii) otros casos posibles pero que requieren mayor evaluación (resaltados en naranja). Los casos que no se consideran viables técnicamente no se incluyeron en la Tabla 9.

Nota 1: En varios casos se considera la posibilidad de cobertura en base a la información disponible (datos de SADI, conocimiento directo de los técnicos del DCAA que realizan inspecciones, registros fotográficos disponibles e imágenes satelitales). No obstante, esa posibilidad deberá verificarse y estará sujeta a los resultados de una eventual evaluación más detallada a nivel de terreno.

Nota 2: Como ya se indicó, el listado de la Tabla 9 fue realizado en base a una evaluación preliminar de la factibilidad técnica de instalación de mecanismos de captura de metano. No se consideraron en esta evaluación los aspectos económicos (inversiones requeridas, costos, eventual repago de la inversión), que serán evaluados en el Producto 2 – Subproducto 2.3.

Tabla 9 – Listado ordenado de industrias según porcentaje de metano emitido, con evaluación de casos probables y posibles.

Industria	% de metano emitido, sobre el total nacional generado	Comentario	
Cárnica 1	10,44%	Nuevo proyecto de PTE sin digestión anaerobia del efluente	
Cárnica 2	6,75%	Cobertura y sistema de captación instalados; no tiene antorcha	✓
Cárnica 3	6,08%	No está en actividad actualmente; en caso de retomar actividad podría poner en funcionamiento en uso de biogás en caldera o quema en antorcha	
Cárnica 4	4,70%	La industria tiene un plan para aumentar su capacidad de faena. Cuenta con lagunas anaerobias.	✓

Alimenticia 1	4,64%	Proyecto de digestor anaerobio agitado sin cobertura. Técnicamente es posible modificarlo para incluir captación y quema de biogás.	✓
Láctea 1	3,38%	La industria ha realizado estudios de factibilidad de cobertura de lagunas anaerobias.	✓
Cárnica 5	3,12%	Debería evaluarse en terreno la posibilidad física de cubrir laguna(s) anaerobia(s)	✓
Láctea 2	3,07%	La industria ha realizado estudios de factibilidad de cobertura de lagunas anaerobias	✓
Cárnica 6	3,07%	Podría evaluarse en terreno la posibilidad física de cubrir laguna(s) anaerobia(s). No obstante la empresa está en situación complicada. No se considera viable.	
Cárnica 7	2,75%	Debería evaluarse en terreno la posibilidad física de cubrir laguna(s) anaerobia(s)	✓
Cárnica 8	2,23%	Línea roja y línea verde de un mismo frigorífico. Tiene plazo de 2 años para actualizar SADI para remoción de N y P. Si bien tiene lagunas anaerobias, se lo considera un caso de posible captación futura, pero no en la PTE actual.	
Cárnica 14	1,08%		
Avícola 1	2,19%	Laguna en desnivel, ex cantera.	
Cárnica 9	2,01%	Están dejando de usar laguna anaerobias	
Textil 1	1,99%	Debería evaluarse en terreno la posibilidad física de cubrir laguna(s) anaerobia(s)	✓
Láctea 3	1,65%	Tiene 2 lagunas anaerobias colmatadas. Pocas posibilidades de inversión.	
Cuero 1	1,55%	No está produciendo	
Cárnica 11	1,38%	Tiene lodos activados con remoción simultánea de nutrientes.	
Cárnica 12	1,38%	Debería evaluarse en terreno la posibilidad física de cubrir laguna(s) anaerobia(s)	✓
Cárnica 13	1,34%	Debe cambiar punto de vertido (conectar a colector). No se considera probable que la empresa haga inversiones en recuperación de metano.	
Textil 2	0,95%	Debería evaluarse en terreno la posibilidad física de cubrir laguna(s) anaerobia(s)	✓
Láctea 4	0,86%	La empresa está en situación económica complicada	
Cárnica 17	0,74%	La empresa está cerrada	
Láctea 5	0,77%	La empresa está en situación económica complicada	
Láctea 8	0,38%		
Láctea 6	0,66%		
Láctea 10	0,34%	Funcionamiento irregular (secan suero de otras plantas)	
Textil 3	0,54%	Cuenta con piletas de hormigón, que presentan actividad metanogénica. Podrían ser sencillas de cubrir y captar metano. Debería evaluarse posibilidad de separación de flujos (lavado/ enjuague) para aumento de TRH en las piletas	✓
Láctea 7	0,51%	Debería evaluarse en terreno la posibilidad física de cubrir laguna(s) anaerobia(s)	✓
Cárnica 19	0,49%	Tienen digestor en hormigón y lagunas anaerobias. Están ampliando su capacidad y cambiando punto de	

		vertido. Si bien tiene lagunas anaerobias, se lo considera un caso de posible captación futura, pero no en la PTE actual.	
Láctea 9	0,37%	Empresa que ha crecido. Tienen laguna anaerobia. Podría evaluarse en terreno.	✓
Textil 4	0,27%	Tienen lagunas anaerobias pero localizadas lejos de la planta industrial. Poco apto para uso del biogás.	
SUMA DE CASOS MÁS PROBABLES	23.1%		
SUMA DE OTROS CASOS POSIBLES	11.1%		

En resumen, para llegar a la meta de 30% de captación de metano originado en tratamiento de efluentes industriales, según los datos de la Tabla 8 hace falta un $(30,0 - 17,8) = 12,2\%$ adicional. Si se lograra implementar la captura de metano en los casos más probables de la Tabla 9, se cubriría con creces ese faltante, ya que se contaría con un 23,1% adicional al 17,8% ya existente.

Con algunas combinaciones de pocos casos permitirían superar el mínimo requerido para llegar al 30% de captación de metano. Por ejemplo, si se implementara captación en Cárnica 2, Láctea 1 y Láctea 2, se lograría una captación del 13,2%, con lo cual se llegaría a un total del orden del 31%. Se menciona esa combinación de casos ya que la Cárnica 2 cuenta con reactores anaerobios cubiertos pero no está quemando el biogás, y las Lácteas 1 y 2 han manifestado interés en cubrir sus lagunas anaerobias y usar energéticamente el metano capturado.

Ing. Quím. (M.Sc.) Alberto Hernández