

OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LACTOSUERO: UNA ALTERNATIVA RESILIENTE

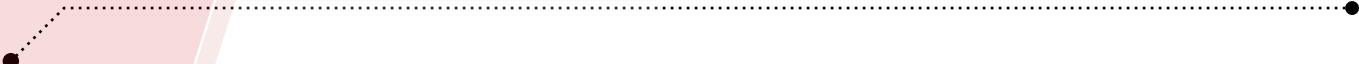
OBTAINING BIOGAS FROM WHEY:
A RESILIENT ALTERNATIVE

OBTER BIOGÁS A PARTIR DO SORO DE
LEITE: UMA ALTERNATIVA RESILIENTE

Rafael Ramírez Alvarado^a
Freddy Torres-Payoma^a
Carlos Vega Cárdenas^a
Katherine Ojeda^a
Manuel Escobar Díaz^b
Daniela Neira Quintero^a
Nicolás Vega Velásquez^a

^a Semillero de Investigación Mathphysics,
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
UNAD, mathphysics.zcbc@unad.edu.co

^b Fundación Aleph, manuel.escobar@
fundacionaleph.org

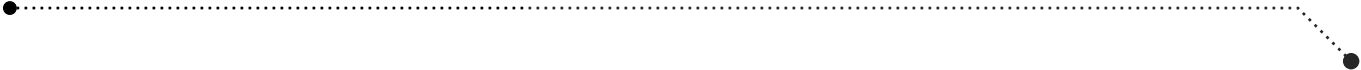


Resumen— En el desarrollo de nuevas tecnologías sostenibles, la producción de biomasa a través del lactosuero obtenido en la transformación de derivados lácteos como materia prima, se presenta como alternativa de bajo costo. En el artículo se desarrolla una revisión bibliográfica detallada, desde el proceso de producción del lactosuero hasta la propuesta para la implementación de un sistema de cogeneración de energía térmica y eléctrica útil. En la primera sección del documento se introduce al lector en el proceso bioquímico e industrial de tratamiento de productos lácteos, en las secciones intermedias se describe el proceso de generación de corriente eléctrica mediante la propuesta fundada en el proyecto de investigación PS362020-2 de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD en alianza con la Alcaldía del municipio de Sopó en Cundinamarca, donde se plantea una visión del impacto ambiental esperado en el caso de usar lactosuero como materia prima. Finalmente, en la discusión y conclusiones se menciona el proceso como una alternativa para la generación de energía viable y resiliente, capaz de abrir un mercado en torno al aprovechamiento sostenible en el sector de lácteos.

Palabras clave— Lactosuero, biogás, generación de energía, tecnologías sostenibles, resiliente.

Abstract— In the development of new sustainable technologies, the production of biomass through the whey obtained in the transformation of dairy derivatives as raw material, is presented as a low-cost alternative. In the article, a detailed bibliographic review is developed, from the whey production process to the proposal for the implementation of a useful thermal and electrical energy cogeneration system. In the first section of the document, the reader is introduced to the biochemical and industrial process of treatment of dairy products, in the intermediate sections the process of generating electric current is described through the proposal based on the research project PS362020-2 of the University Nacional Abierta y a Distancia - UNAD in alliance with the Mayor's Office of the municipality of Sopó in Cundinamarca, where a vision of the expected environmental impact is proposed in the case of using whey as raw material. Finally, in the discussion and conclusions, the process is mentioned as an alternative for the generation of viable and resilient energy, capable of opening a market around sustainable use in the dairy sector.

Keywords— Whey, biogas, energy generation, sustainable technologies, resilient.



Resumo— No desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis, a produção de biomassa a partir do soro obtido na transformação de derivados lácteos como matéria-prima, apresenta-se como uma alternativa de baixo custo. Neste artigo, é desenvolvida uma detalhada revisão bibliográfica, desde o processo de produção do soro de leite até a proposta de implantação de um sistema útil de cogeração de energia elétrica e térmica. Na primeira seção do documento, o leitor é apresentado ao processo bioquímico e industrial de tratamento de laticínios, nas seções intermediárias o processo de geração de corrente elétrica é descrito através da proposta baseada no projeto de pesquisa PS362020-2 da Universidad Nacional Abierta ya Distancia - UNAD em aliança com a Prefeitura do município de Sopó em Cundinamarca, onde se propõe uma visão do impacto ambiental esperado no caso da utilização do soro de leite como matéria-prima. Por fim, na discussão e nas conclusões, o processo é citado como uma alternativa para a geração de energia viável e resiliente, capaz de abrir um mercado em torno do uso sustentável no setor de leiteiro.

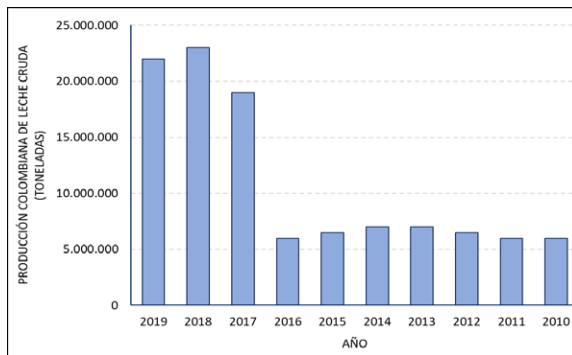
Palavras chave— Soro de leite, biogás, geração de energia, tecnologias sustentáveis, resilientes.

I. INTRODUCCIÓN

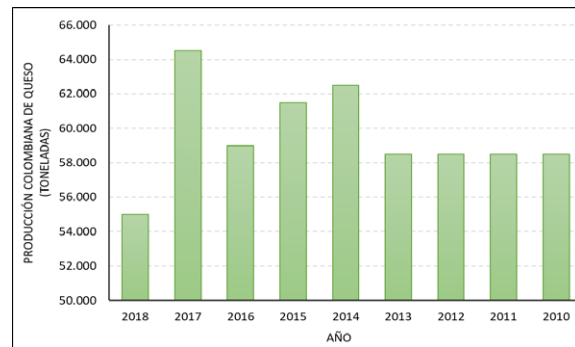
Para el año 2019, la producción colombiana de leche de origen bovino fue de 21'847.085 toneladas según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, según sus siglas en inglés), presentando

un incremento desde el año 2017 Fig. (1, a). Colombia ocupa el noveno lugar entre los mayores productores de leche a nivel mundial, sin embargo, la capacidad de Colombia para generar este producto es inferior en un 30% en comparación con Estados Unidos e Italia, quienes ocupan los primeros lugares [1].

a) Producción colombiana de leche cruda de vaca en toneladas.



b) Producción colombiana de queso a base de leche cruda de vaca en toneladas



c) Producción continental de queso en toneladas.

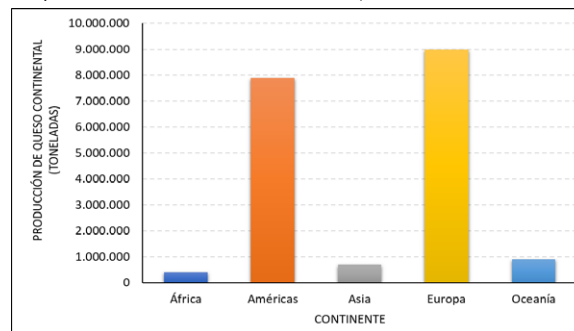


Fig. 1. Cifras de producción de leche cruda de vaca y queso. Tomadas de [1].

Parte de la producción de leche bovina, es destinada a la producción de queso, según se indica en 2018 la cantidad destinada para este fin alcanzó las 55.386 toneladas en Colombia, describiendo una producción semejante desde el año 2010 (Fig. 1, b). Para ese mismo año, en América se producían 7'758.819 toneladas

de queso, con 1'034.238 correspondiente a producción en América del Sur, 257.016 a América Central y el Caribe y 6'467.565 a América del Norte. En comparación, Europa produce niveles semejantes de queso, superando a América en 2'069.781 de toneladas (Fig.1, c). El consumo de queso a nivel mundial ha aumentado en

un 5%, en los últimos 4 años, se espera que la tendencia se mantenga en los años próximos, podría el mercado mundial de quesos aproximarse a los 124 billones de dólares para 2022 [2].

Entre tanto, la producción de queso genera cantidades de suero de leche aproximadas a los 9 litros por cada kilogramo de queso producido. El lactosuero es un subproducto que se considera residuo contaminante con alta demanda de oxígeno (DBO de 27 a 60 g/L y DQO de 50 a 102 g/L), aproximadamente

el 47% termina en afluentes y sistemas de alcantarillado [3].

Sin embargo, existen alternativas para el aprovechamiento del lactosuero derivado de la producción de queso [4], desde la elaboración de productos como mantequillas, cultivos de kéfir, bebidas fermentadas y carbonatadas, algunas fórmulas lácteas y ácido láctico, hasta su exploración en la generación de biomasa microbiana y cultivos iniciadores (Fig. 2).

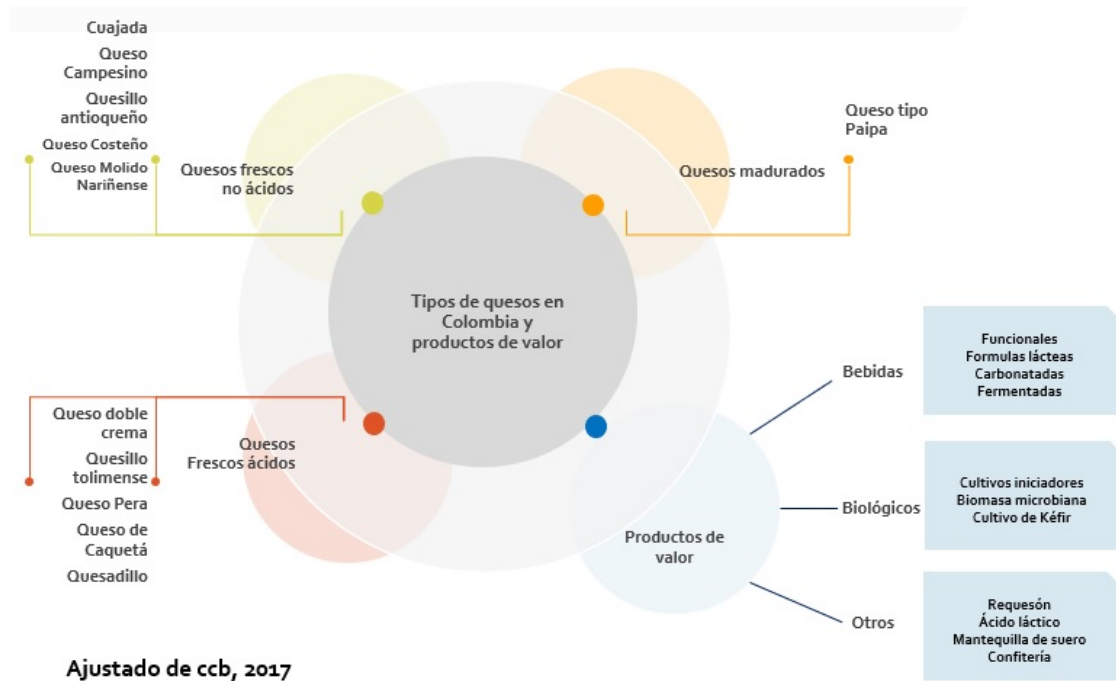


Fig 2. Alternativas de procesamiento de Lactosuero de quesería. Adaptado de [4].

La Fig. 3 contextualiza el aprovechamiento del lactosuero a través del proceso biológico para el tratamiento de residuos con alto contenido orgánico que produce biogás, el cual puede ser empleado como energía térmica y eléctrica, al tiempo que es un proceso que implica

un bajo consumo energético y una baja producción de sedimentos residuales. La técnica es empleada a escala comercial frente a la eficiencia en el tratamiento de los residuos de alimentos y a sus productos finales ricos en nutrientes [5].

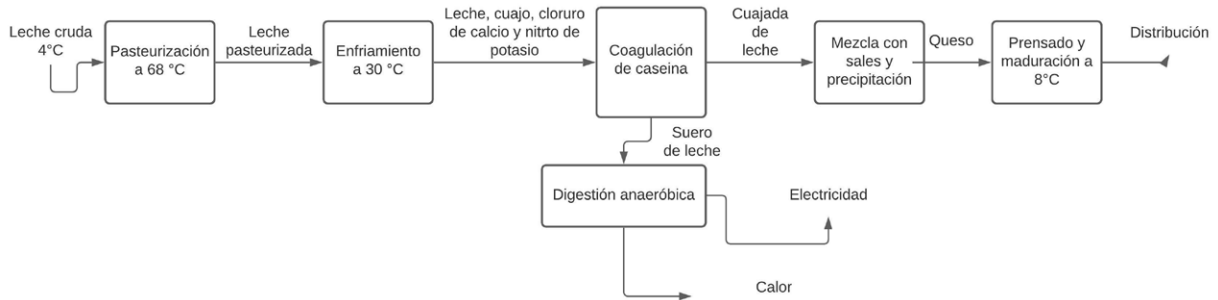


Fig. 3. Proceso de elaboración del queso derivado de la leche cruda de vaca, adaptado de [5].

II. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍA TÉRMICA

A) Fuentes térmicas y generación de electricidad

En general, la fuente calórica define la energía disponible en un sistema termodinámico en equilibrio (proporcional a su temperatura absoluta) que será usada para la generación de electricidad; esto en sistemas piloto y para plantas industriales [6].

La energía térmica, a diferencia de la energía interna de un gas, no es definida únicamente por la temperatura; los detalles particulares del proceso de transferencia de calor en un sistema definen qué tanto de energía térmica puede ser utilizada en la conversión a otros tipos de energía [7]. Típicamente, la transferencia de calor se origina en una combustión, producida a partir de combustibles fósiles como carbón, gas natural, petróleo, biogás o biomasa. En concreto, el ciclo termodinámico del agua en evaporación, se puede utilizar la energía térmica de combustión transformándose en eléctrica a través de turbinas. La combustión en

caldera produce vapor a alta presión que mediante interacción mecánica sobre las turbinas generan energía eléctrica [8].

B) Generación de energía térmica y eléctrica en nuestro contexto

En Colombia hay un estimado de 190 operadores generadores de energía, de los cuales un 27% son generadores de energía térmica. El gas natural es la fuente dominante, vital para el país en tiempos de sequía debido a su menor requerimiento de agua en comparación a las de combustión de carbón, que están equipadas con calderas de baja presión, cuya capacidad es de 134 kg/cm² [9]. La asociación Nacional de Empresas Generadoras informó que en el año 2020 el sector enfrentó dos problemáticas fundamentales [10]: reducción de la demanda en consecuencia a la emergencia sanitaria Covid-19 y disminución de las reservas hídricas debido a condiciones climatológicas en el primer semestre.

Algunas empresas colombianas han optado por utilizar los residuos orgánicos para generar combustible por

biodigestión. Como medida mitigante, el papel higiénico, envases y plásticos que no se pueden reutilizar pueden producir energía térmica suficiente para reducir de manera significativa el uso de combustibles fósiles [11].

C) Proceso bioquímico y factores determinantes para la obtención de biogás

El biogás se compone principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), en menores cantidades contiene ácido sulfhídrico (H_2S) y amoníaco (NH_3). En un digestor bien controlado, el porcentaje de metano del biogás puede variar entre el 55% - 65%. En un digestor de alimentación continua en estado estacionario, la composición diaria del biogás debe permanecer constante a lo largo del tiempo. El contenido de metano por debajo del 55% o contenidos superiores al 35-40% de CO_2 , indican acumulación de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) e inhibición de la actividad de las bacterias metanógenas. El metano es el resultado de la destrucción de sólidos volátiles y es el producto final de la vía de digestión anaeróbica [12].

El proceso más importante a nivel mundial para la generación de biogás es conocido como digestión anaeróbica, la cual corresponde a una tecnología probada para la recuperación de residuos en forma de energía, biofertilizantes y otros subproductos útiles y valiosos [13]. Generalmente es considerada como el método de gestión de residuos alimentarios más sostenible.

Respecto a las tecnologías convencionales, en la actualidad es considerado como un proceso resiliente debido a que permite obtener estabilidad en los sistemas de producción, en la medida que disminuye el consumo de energía proveniente de fuentes convencionales o de costo [14].

En la Fig. 4 se presenta un modelo de unidad de trabajo de sustrato mixto, en la que intervienen compuestos orgánicos como ensilaje de maíz diluido con agua y estiércol de cerdo. La cadena de producción contiene dos reactores que funcionan en modo continuo, en serie que permite la recolección del biogás [15].

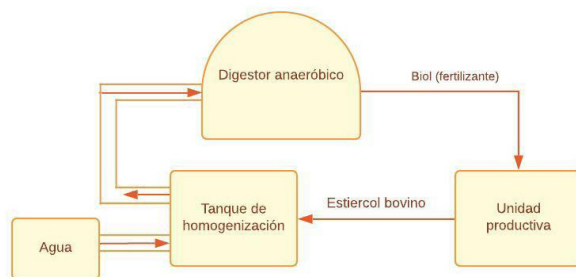


Fig. 4: Configuración de una planta de biogás. Adaptado de [15].

Es así que se hace necesario conocer e interpretar el proceso de conversión simplificado de materia orgánica a biogás a través de cuatro momentos fundamentales de acuerdo con [15]:

Hidrólisis: los carbohidratos, proteínas y lípidos presentes en la materia orgánica, se disocian y forman compuestos más simples: azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga. El proceso es impulsado por microorganismos anaerobios facultativos

y actúan principalmente enzimas extracelulares.

Acidogénesis: proceso estrictamente biológico, en el cual las bacterias acidógenas convierten los azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga. en ácidos grasos de cadena corta, alcoholes y compuestos aromáticos, el proceso es mediado por enzimas intracelulares.

Acetogénesis: En este proceso, la materia orgánica se digiere a acetato en su gran mayoría y sus principales sustratos son los ácidos grasos. También se generan subproductos como el dióxido de carbono y el hidrógeno. El proceso es mediado principalmente por enzimas intracelulares.

Metanogénesis: Los ácidos grasos producidos en la acetogénesis son convertidos por la acción de microorganismos anaerobios facultativos en ácidos, y finalmente estos ácidos por acción de microorganismos metanogénicos dan origen al metano, compuesto principal del biogás. En la Fig. 5 se presenta resumen de las vías de descomposición de la digestión anaeróbica.

Como se mencionó en los cuatro pasos anteriores, el proceso bioquímico de la digestión anaeróbica implica un metabolismo asociado entre diferentes clases de microorganismos, especialmente bacterias hidrolizantes, acetógenas, acidógenas y metanógenas, estos microorganismos difieren en su morfología y condiciones óptimas de desarrollo, incluso pueden ser sensibles a cambios en las condiciones micro ambientales, siendo estas últimas variables muy analizadas y controladas en los sistemas a nivel industrial con el fin de obtener poblaciones y procesos estables.

De las clases de microorganismos mencionadas se destacan dos grandes grupos de bacterias formadoras de metano, a saber: las bacterias metanogénicas - acetoclásticas y las bacterias hidrogenotróficas. Este conjunto de microorganismos, dependen de un sustrato de desarrollo, que usualmente corresponde a residuos de origen alimenticio, medio predilecto de las bacterias debido a que son ricas en nitrógeno asociado a las altas concentraciones de proteína de los alimentos, las rutas metabólicas implicadas en la producción de biogás a partir de microorganismos metanogénicos [16].

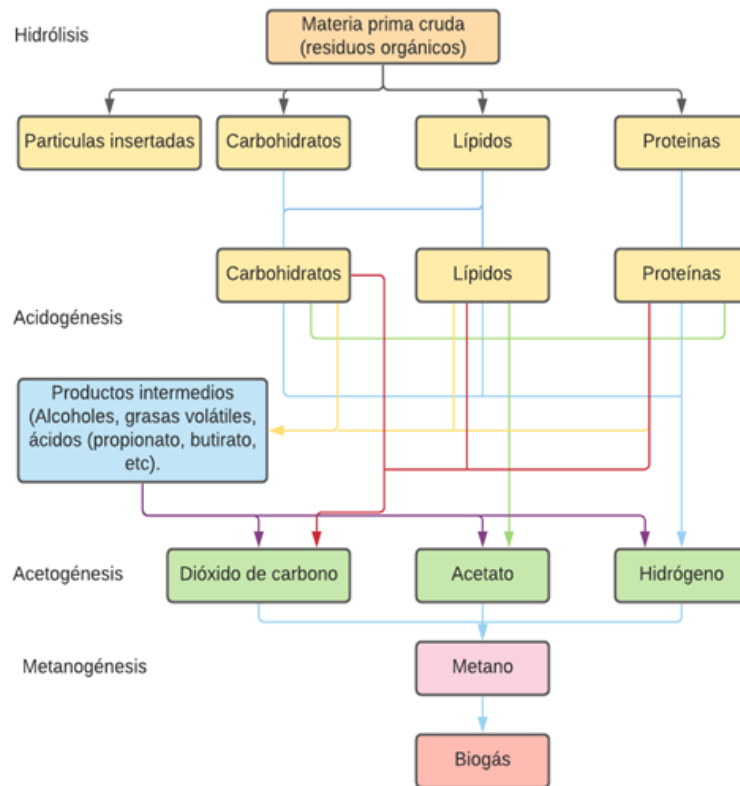


Fig. 5. Representación esquemática de la vía de descomposición en la digestión anaeróbica. Adaptado de [15].

No obstante, en la digestión de los desechos alimenticios se produce amoníaco, siendo este compuesto antagonista en el desarrollo de las bacterias metanógenas-acetoclásticas. Cuando se presenta esta situación, las bacterias metanógenas-hidrogenotróficas, continúan en la producción de metano. Sin embargo, la reducción en el rendimiento de producción puede ser significativa a pesar de la aclimatación de los microorganismos metanógenos a los aumentos de la concentración de amoníaco.

La digestión generada por BAS y MA se presentan con líneas sólidas, mientras que BSOA y HM se presentan con líneas pun-

teadas. Las abreviaturas: BAS: bacterias acetogénicas sintróficas; BSOA: bacterias sintróficas oxidantes de acetato; MA: microorganismos acetoclásticos metanogénicos y MH: microorganismos metanogénicos hidrogenotróficos Adaptado de [16].

Por tanto, es fundamental en el proceso de metanogénesis controlar las concentraciones de H₂ y de S presente en el biogás generado, puesto que los sulfuros ayudan a mantener la alcalinidad del sustrato de digestión, concentraciones altas de sulfuros pueden ser tóxicas para las bacterias metanogénicas y concentraciones altas de H₂ y S en el biogás requiere la inclusión de procesos adicionales para la purificación del

biogás antes de su uso. En la actualidad se emplea de forma industrial la cafeína como estimulante para la producción de biogás [17].

La producción máxima de biogás se obtiene cuando el pH de los residuos de alimentos es de 7,0, con una reducción significativa en la producción de biogás a partir de pH de 5,0 y 9,0. Por su parte compuestos como los carbohidratos, lípidos y proteínas aportan al sostenimiento de una relación Carbono - Nitrógeno (C/N) estable, gracias a que las proteínas actúan como fuente de nitrógeno al degradarse en amoníaco. No obstante, altos contenidos proteicos en los sustratos de fermentación pueden producir relaciones C/N bajas, generando inestabilidad debido a la producción excesiva de amoníaco, estas situaciones suelen presentarse cuando se emplean como cosustratos de origen cárnicos [12].

Se sugiere realizar el monitoreo de las variables como el pH de forma diaria en los digestores anaeróbicos, puesto que cambios fuertes en esta variable afecta directamente el rendimiento del digestor y de esta forma reducen la tasa de transferencia de masa. Una de las situaciones más comunes en el montaje de un biodigestor es el uso de sustratos con altos contenidos de nitrógeno amoniacal, en estos escenarios el pH puede afectar la proporción entre el amoníaco libre (NH_3) y su forma ionizada (NH_4^+), esto genera un aumento en el pH que induce a un aumento en el amoníaco disponible conllevando a la toxicidad para las bacterias metanógenas que suelen ser

más susceptibles a las variaciones en la concentración amoniacal. Lo anterior produce un consumo bajo de AGV con una posterior acumulación, que crea un ambiente de pH bajo en los digestores, razón que modifica la relación entre los microorganismos acetógenos, inhibiendo la acción de los microorganismos metanógenos, generando de esta forma fallas en los digestores [18].

Se consideran condiciones óptimas de funcionamiento para un digestor anaeróbico, que emplea como medio de co-digestión estiércol bovino, el rango de pH entre 6,8 - 7,5, el cual permite una relación equilibrada entre microorganismos acetogénicos y metanógenos, mientras que para un digestor que emplea como medio de co-digestión residuos vegetales se recomienda mantener el pH en rangos de 7,2 - 7,8 [19], en el último sistema mencionado, se pueden presentar fallas en los digestores producto de las altas concentraciones de AGV, si bien en la literatura disponible es ambigua respecto a los niveles aceptables de AGV, se recomienda que siempre esté por debajo de los 800 mg de CH_3COOH . L-1 en todo momento del proceso, motivo por el cual se han implementado estrategias para mitigar este efecto negativo mediante la adición de iones metálicos como lo son el Mg^{+2} y el Ca^{+2} , en general se pueden emplear reactivos que aumentan la alcalinidad y/o mediante la reducción controlada de la temperatura del digestor entre 3 y 5 °C durante algunos días mientras el pH se normaliza o ajusta, si esto no sucede se sugiere proceder con la

adición de un reactivo básico como lo es el hidróxido de sodio [20].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se desarrolló un modelo estándar para la implementación de un sistema de cogeneración de energía eléctrica y térmica, adaptado a las condiciones climáticas de la región de sabana centro, especialmente para el municipio de Sopó.

Para el diseño del modelo se establecieron las siguientes etapas:

Etapa I. Identificación de las variables del sector de instalación:

En este proceso se definieron las variables climáticas asociadas con el buen funcionamiento del sistema de digestión, que permiten establecer los requerimientos básicos del biodigestor.

Etapa II. Ajuste de las necesidades de producción eléctrica y térmica a escala:

En este paso, se definieron las necesidades de energía eléctrica y térmica para una plantuladora ubicada en la vereda "La Violeta" municipio de Sopó coordenadas 4°52'10" N y 73°57'18" W altitud media 2563 msnm.

Etapa III. Cálculo de las necesidades y relación lactosuero/estiércol/agua R/(LEA) para el sistema de digestión:

En este proceso se definió la tabla de comportamiento para lograr la producción estimada necesaria para

mejorar las condiciones de humedad y temperatura de la plantuladora.

Etapa IV. Definición de las salidas del sistema (cantidad de gas metano producido): Durante el desarrollo de esta etapa, se estimaron las cantidades de gas metano que será producido una vez se finalice el proceso de aclimatación del digestor.

Etapa V. Diseño electrónico para el sistema de cogeneración: para la elaboración del diseño se emplearon los softwares licenciados Matlab.

Etapa VI. Simulación del sistema diseñado: Para las pruebas de validación teórica y/o simulación se empleó el software Matlab-LabVIEW.

Etapa VII. Estimación del impacto ambiental: para el desarrollo de esta etapa se realizó una revisión bibliográfica de los posibles impactos tanto benéficos como nocivos de la implementación de sistemas de cogeneración eléctrica y térmica.

IV. RESULTADOS

A) Etapa I. Identificación de las variables del sector de instalación

Las variables climáticas para tener en cuenta durante la instalación del sistema que se definieron son: temperatura media, humedad relativa, precipitación.

Para el municipio del Sopó se establece un clima cálido y templado, siendo febrero es

el mes más cálido del año. Con promedios de 13.6 - 12.1 °C, julio es el mes más frío del año, es importante mencionar que la variación en la temperatura anual está alrededor de 1.5 °C, se identifica que la precipitación en Sopó es significativa, incluso con precipitaciones durante el mes más seco es agosto, con 67 mm de lluvia y en abril, la precipitación alcanza su pico, con un promedio de 225 mm. La humedad relativa más alta se presenta en el mes de mayo (80.27 %) y la humedad relativa más baja se presente en febrero (66.61 %). De acuerdo con el sistema Köppen-Geiger, Sopó se clasifica como Cfb (Marítimo de costa occidental (oceánico), la temperatura promedio en Sopó es 12.9 °C y la precipitación media es de 1493 mm al año [21].

B) Etapa II. Ajuste de las necesidades de producción eléctrica y térmica a escala

De acuerdo con las necesidades establecidas para el aumento de temperatura en la plantuladora, en cálculos previos se estableció como mínimo adecuado el aumento de 1.5 °C en los meses fríos y/o propensos a heladas a saber diciembre y enero, en los meses siguientes se estimó una demanda mínima de aumento de 0.5°C. es importante mencionar que al ser un sistema piloto y experimental se definieron los parámetros teniendo en cuenta que un invernadero debe calentarse, solo si la temperatura exterior cae por debajo de la temperatura que necesitan los cultivos para su correcto crecimiento y desarrollo [22], de esta forma para lograr la producción estimada de gas metano se requiere de la instalación de un

digestor con un volumen mínimo de 6m³, de acuerdo con los datos de cuaderno de campo de la empresa proveedora SISTEMA.Bio.

Respecto a la articulación con el proyecto PS362020-2 de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD en alianza con la Alcaldía del municipio de Sopó en Cundinamarca, la etapa de generación eléctrica en el contexto de la implementación en un cuarto de plantulación, está siendo investigada. Una porción de la electricidad generada a partir del biogás en el sistema de cogeneración se utilizará para incrementar la temperatura en los meses fríos y el resto de la electricidad se exporta a la red. Del mismo modo, parte del calor del biogás se consumiría en calderas apoyar el proceso de aumento de temperatura, considerándose un proceso eficiente puesto que teóricamente alcanzará una eficiencia del 90% en calentamiento.

C) Etapa III. Cálculo de las necesidades y relación lactosuero/estiércol/agua para el sistema de digestión

Una vez definidas las necesidades térmicas se realizaron los cálculos y se definieron de forma experimental las proporciones R/ (LEA) para el digestor y se definió el sistema de alimentación teniendo en cuenta las recomendaciones del proveedor del sistema de digestión la empresa mexicana SISTEMA.Bio, quienes cuentan con experiencia probada en instalación y puesta en marcha de más de 7000 digestores para producción de biogás en Latinoamérica, África e India.

En la tabla 1 se describen los aspectos fundamentales para el proceso de instalación del sistema, en el cual se estimó la necesidad de 500 kg de estiércol bovino, 1000 litros de lactosuero y 5000 litros de agua, posteriormente se deben realizar ingresos al sistema durante los

días 45 a 74 después de instalación, 75 a 104, 105 a 134 y 135 a 164 en las proporciones indicadas, esto con el fin de lograr una aclimatación efectiva de los microorganismos productores de metano del biodigestor.

Tabla 1. Protocolo de alimentación del sistema de biodigestión. Adaptado de: SISTEMA.bio

Insumo	Instalación Unidad	DIA (Producción de gas metano)				
		Intervalos				
			[45-75]	(75, 104]	(1 0 5 , (1 3 5 , 134]	164]
Estiércol bovino	kg	500	50	50	50	50
Lactosuero	L	1000	50	75	100	125
Agua	L	5000	100	75	50	25

D) Etapa IV. Definición de las salidas del sistema (cantidad de gas metano producido)

De acuerdo con los cálculos de conversión de materia orgánica a biogás se estimó que mediante la implementación de un digestor con volumen de 6m³ se puede producir al menos 1.8 m³ de gas por día, valor que es equivalente a 51 lb.mes⁻¹ de gas propano, Situación que permita el accionar mínimo de 3.6 horas de gas. día⁻¹ en un quemador convencional.

E) Etapa V. Diseño del sistema de adquisición de datos (SAD) para el sistema de cogeneración

Para lograr el proceso de cogeneración se acoplará al sistema de biodigestión un motor tipo Stirling con aplicación básica del ciclo de Carnot como se presenta en la figura 4, en la cual se plasma el diseño electrónico del sistema de cogeneración incluyendo el sistema de automatización

teniendo en cuenta las posibles variaciones de velocidad, temperatura, presión y voltaje que puede sufrir el sistema de adquisición de datos (SAD).

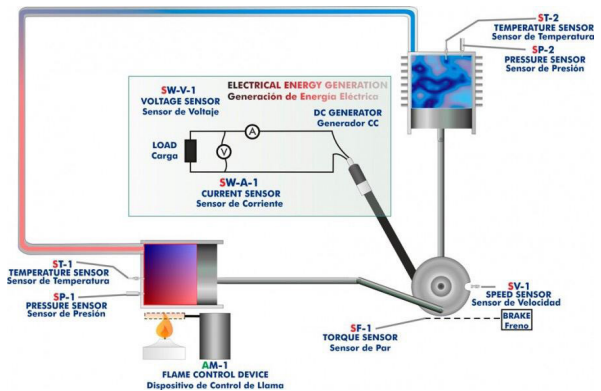


Fig. 6. Esquema del sistema de adquisición de datos (SAD) electrónico para el sistema de cogeneración.

F) Etapa VI. Simulación del sistema diseñado

Una vez establecido el sistema electrónico y de censado, se realizaron pruebas de simulación mediante la implementación del software Matlab-LabVIEW como se presenta en la figura 5, logrando un

sistema teóricamente estable y con gran potencial para su implementación en el municipio de Sopó.

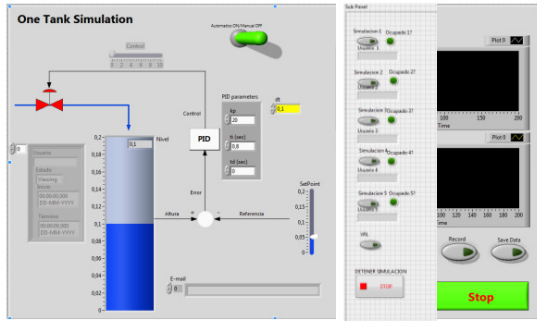


Fig. 7. Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) del software con la simulación del sistema eléctrico de cogeneración.

G) Etapa VII. Estimación del impacto ambiental

La sostenibilidad ambiental es la estrategia que puede revertir las afectaciones negativas propias del desarrollo industrial a causa de las actividades económicas del ser humano.

Los parámetros Fisicoquímicos como la temperatura, acidez, cantidad de sólidos, composición de todo efluente, entre otros, están asociados a la generación de un impacto ambiental y requiere medidas de mitigación del riesgo; monitoreo y seguimiento de acuerdo con los requerimientos para recurso hídrico. El análisis de DQO es una prueba ampliamente usada en laboratorios ambientales, sus residuos son considerados como peligrosos debido al alto contenido de iones de Cr, Ag y Hg [23].

Entre las principales características del lactosuero que deben ser tratadas

por su alta carga orgánica, está la demanda química de oxígeno DQO y la demanda biológica de oxígeno DBO. Las concentraciones varían en los rangos, para DQO de 30633 mg/L, DBO de 7997.6 mg/L y un pH de 4.24. Su estudio y evaluación a través de un tratamiento de 48 horas en biorreactores anaerobios, permitió la reducción de carga contaminante en un 94,7% [24] un aporte, considerable, desde la Responsabilidad Social Empresarial.

Abordar posibles soluciones que respondan al impacto ambiental generado a causa del bajo porcentaje de aprovechamiento del lactosuero, considerando su naturaleza, fuente de generación u origen, procesamiento; como tecnología alternativa, es la ruta trazada en el presente trabajo.

La digestión anaeróbica, también conocida como tecnología del biogás, está asociada a la reducción de gases de efecto invernadero en el sector ganadero y agrícola, el reciclaje de nutrientes para la agricultura, la producción de energía renovable y, en general, la protección del medio ambiente.

Todo ello, impulsando la economía circular en el sector primario y para el interés del presente trabajo, el agroindustrial. La tecnología del biogás está presente en todo el mundo cubriendo desde plantas altamente industrializadas, en cualquier caso, el uso de sustratos locales, sostenibles y de alto contenido energético es fundamental para llevar la tecnología allí donde no está, adaptándose a la realidad de cada lugar [13].

La afectación a fuentes hídricas causada por cargas contaminantes orgánicas y químicas del lactosuero, deben ser analizadas a razón del fuerte impacto ambiental que causa y la reducción de la calidad del recurso natural. En Colombia, de acuerdo con cifras del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, Colombia en el 2008 solo trataba el 9% de las aguas residuales debido a que más del 50% de las plantas construidas no funcionaban adecuadamente [25].

La cantidad de oxígeno disuelto es uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua; su fuente principal es el aire, el cual se difunde rápidamente en el agua por la turbulencia en los ríos y por el viento en los lagos, sin embargo, cuando hay un vertimiento con altas cargas de DBO y DQO, ocasiona que los niveles de oxígeno disuelto disminuyan, ocasionando desniveles ambientales.

V. DISCUSIÓN

Como se mencionó en la introducción, la caracterización de las materias primas que serán empleadas en la producción de biogás es fundamental, debido a que permite identificar la presencia de sustratos específicos que puedan generar reducciones significativas en la producción del biogás. Se ha identificado que la mayor producción de biogás en un sistema convencional se obtiene mediante el uso de lactosuero (suero ácido) y pan de desecho, lo anterior es producto de la comparación con sistemas que emplean como sustrato el estiércol bovino y desechos vegetales. Por tanto, podemos

inferir que el rendimiento específico de producción de metano depende en un alto porcentaje de la composición del sustrato y las condiciones térmicas del proceso, de esta forma acciones como la digestión termofílica y la eliminación de lípidos pueden ser fundamentales para la optimización de los sistemas de generación. Procesos adicionales para la eliminación de amoníaco como la extracción de gas mediante corriente secundaria, mezcla de gases, ultrasonidos, y radiación de microondas han tenido buenos resultados para la optimización del proceso de digestión a nivel industrial [26-28].

Otros de los aspectos fundamentales para el establecimiento de un sistema de digestión anaeróbico eficiente mencionados son [12]:

- La selección del inóculo que se emplea para la fermentación del sustrato sea obtenida de digestores en funcionamiento con co-digestión de desechos acordes a los que serán empleados en el sistema.
- Existencia de un monitoreo constante de la alcalinidad que puede estar alrededor de 5500 mg de CaCO_3 L⁻¹ en digestores que emplean como cosustrato de digestión estiércol bovino.
- La existencia de monitoreo de la producción de biogás, este parámetro es el más importante a monitorear en la digestión anaeróbica, puesto que ayuda a identificar cualquier problema de estabilidad que surja durante el

proceso, es importante mencionar que este parámetro suele expresarse en litros de metano por kilogramo de mezcla (L de CH₄ kg⁻¹).

De acuerdo con los artículos revisados referentes a la generación de energía eléctrica, es importante explorar la utilización de lactosuero bovino en diferentes estaciones del proceso de biodigestión, empezando con intercambios de temperatura tanto altas como bajas, se debería validar si dicha alternativa es eficiente y eficaz dentro del proceso.

Según la información sobre generación de energía eléctrica y térmica se debe validar en estudios posteriores, si a estos tipos de sistemas semiindustriales, se pueden incluir procesos de alternancia de generación de energía eléctrica por convección con la incineración de otros residuos como el plástico.

Conforme a la mezcla del lactosuero para la calidad de biogás, es importante en estudios posteriores revisar el balance dentro del sistema, al implementar mezclas diferentes de residuos especialmente los de panadería, que, a diferencia de la mezcla con estiércol animal, generan una menor producción de H₂S. lo anterior es un aspecto importante si se tiene en cuenta condiciones de manipulación entre los dos componentes generadores de bacterias anaerobias, la reducción de olores, las cantidades y recolección de cada uno de los residuos.

VI. CONCLUSIONES

Para Colombia, un país con gran potencial agrícola representado en su producción anual de leche cruda de bovinos, el aprovechar residuos orgánicos de sus industrias con un alto grado nutricional, en lugar de verterlos a fuentes hídricas, puede representar una gran ventaja medioambiental y competitiva, pues se reduce la contaminación de afluentes empleados por otras comunidades a lo largo del territorio y por industrias nacionales, se evita la pérdida de un lactosuero rico en lactosa y otros compuestos de la leche, y se cuenta con la posibilidad de aprovecharlos en la elaboración de productos lácteos innovadores y con valor nutricional. Por eso resulta oportuno el desarrollo de este tipo de trabajos, con los cuales se evalúe cómo un residuo de la industria agrícola puede generar valor al resto de su cadena productiva y encuentre las condiciones ideales de operación para un proceso de digestión anaeróbica eficiente capaz de generar energía utilizable y limpia, empleando una tecnología de bajo consumo energético.

La producción de lactosuero en Colombia puede convertirse en uno de los principales insumos para promover la industrialización sostenible del sector lácteo y toda la cadena productiva que lo involucra adicionalmente corresponde a una alternativa promisorio para la generación de energía a nivel rural. Su aprovechamiento impulsará estrategias de tecnologías alternativas, construcción de infraestructura resiliente, fomento de

la innovación que se encaminan a la producción de energía, de productos con potencial en agroindustria alimentaria y no alimentaria, respondiendo al gran llamado de aunar esfuerzos para disminuir la contaminación ambiental, fisicoquímica, microbiológica por la alta carga orgánica que altera la composición de suelos, del recurso hídrico, afectando a causa del agotamiento del oxígeno todo el ecosistema acuático y las especies asociadas a él.

La producción de biocombustibles a partir del proceso de cogeneración de residuos agroindustriales como el lactosuero, es posible como alternativa para la obtención de energía renovable. La revisión literaria, como fuente de partida, muestran el potencial para establecer mecanismos biológicos que, mediante proceso de fermentación enzimática, digestiones anaeróbicas se pueda obtener biogás para su aprovechamiento en la generación de calor o electricidad. La fuente de agua, lactosa, proteínas, ácidos lácticos, hidratos de carbono, lípidos entre otros contenidos en el lactosuero, permiten actuar y generar condiciones adecuadas para que billares de microorganismos presentes que se multiplican de manera exponencial y puedan actuar a partir de procesos acidogénicos y confluir en la obtención de biogás.

VII. AGRADECIMIENTOS

Para este documento se hace reconocimiento a la UNAD, quien a través de la convocatoria 009, ha contribuido de muchas maneras a la realización de

productos como este artículo en apoyo de la Alcaldía del municipio de Sopó en Cundinamarca en conjunto con el semillero de investigación MathPhysics. Así mismo, para todo el equipo investigador por el compromiso y apoyo en la construcción de los productos a presentar. Reconocer la labor de los pequeños productores y transformadores.

VIII. REFERENCIAS

- [1] FAO. (30 de abril de 2021). FAOSTAT. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- [2] OCDE & FAO. (2017). OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026. París. Retrieved from [http://www.fao.org/home/search/en/?q=resumen de productos basicos](http://www.fao.org/home/search/en/?q=resumen+de+productos+basicos).
- [3] Papademas, P., & Kotsaki, P. (2020). Technological Utilization of Whey towards Sustainable Exploitation. *Advances in Dairy Research*, 7(4), 1–10. <https://doi.org/10.35248/2329-888X.19.7.231>
- [4] Mazorra-Manzano (SNI I), M. Á., & Moreno-Hernández, J. M. (2019). Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal. *CienciaUAT*, 14(1), 133. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1134>
- [5] Gosalvitr, P., Cuellar-Franca, R., Smith, R., & Azapagic, A. (2019). Energy demand and carbon footprint of

- cheddar cheese with energy recovery from cheese whey. *Energy Procedia*, 161, 10–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.052>
- [6] Morero, B. D. V. (2014). Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias (Doctoral dissertation).
- [7] Flórez, J. A. Á. (2005). Motores alternativos de combustión interna. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- [8] Jagatheesan, K., Anand, B., Baskaran, K., Dey, N., Ashour, A. S., & Balas, V. E. (2018). Effect of nonlinearity and boiler dynamics in automatic generation control of multi-area thermal power system with proportional-integral-derivative and ant colony optimization technique. In *Recent advances in nonlinear dynamics and synchronization* (pp. 89-110). Springer, Cham.
- [9] Mendez Castro, C. M. Conceptualización del modelo colombiano de commodities de energía eléctrica teniendo como referencia los mercados norteamericano y español.
- [10] Andeg. (2021, 27 octubre). Asociación Nacional de Empresas Generadoras – ANDEG. Recuperado 13 de diciembre de 2021, de <https://www.andeg.org/>
- [11] Kuroki, T., Kabeya, K., Makino, K., Kajihara, T., Kaibe, H. H., Matsuno, H., & Fujibayashi, A. (2014). Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 1-6.
- [12] Hegde, S., & Trabold, T. A. (2019). Anaerobic digestion of food waste with unconventional co-substrates for stable biogas production at high organic loading rates. *Sustainability (Switzerland)*, 11(14) doi:10.3390/su11143875.
- [13] Ramos-Suárez, J. L., Ritter, A., González, J. M., & Pérez, A. C. (2019). Biogas from animal manure: A sustainable energy opportunity in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 137-150.
- [14] Neshat, S. A., Mohammadi, M., & Najafpour, G. D. (2018). Effect of illumination intensity on photosynthesis assisted anaerobic digestion of cattle manure leachate for enhanced biogas production. *Chemical Engineering Journal*, 338, 8-14. doi:10.1016/j.cej.2018.01.005
- [15] Postawa, K., Szczygieł, J., & Kułczyński, M. (2021). Innovations in anaerobic digestion: A model-based study. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1) doi:10.1186/s13068-020-01864-zSuñol, J. (2001). Rejuvenecimiento facial.

- Recuperado el 12 de junio de 2001, de: <http://drsunol.com>.
- [16] Rezaee, A., Farzadkia, M., Gholami, M., & Kermani, M. (2020). Effect of micro-aerobic process on improvement of anaerobic digestion sewage sludge treatment: flow cytometry and ATP assessment. *RSC Advances*, 10(59), 35718-35728.
- [17] Prabhudessai, V.; Ganguly, A.; Mutnuri, S. (2019). Effect of caffeine and saponin on anaerobic digestion of food waste. *Ann. Microbiol.* 2009, 59, 643-648.
- [18] Sosa, A., Galindo, J., & Bocourt, R. (2007). Metanogénesis ruminal: aspectos generales y manipulación para su control. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 41(2), 105-114.
- [19] Christian, S. J., Broeders, E., & Menkveld, H. W. H. (2016). Recovery of ammonia from digestate as fertilizer. Paper presented at the WEFTEC 2016 - 89th Water Environment Federation Annual Technical Exhibition and Conference, 9 932-937. doi:10.2175/193864716819715536.
- [20] Tomei, M. C., Angelucci, D. M., & Levantesi, C. (2016). Two-stage anaerobic and post-aerobic mesophilic digestion of sewage sludge: analysis of process performance and hygienization potential. *Science of the Total Environment*, 545, 453-464.
- [21] Climate ORG. (2021, Nov, 11). Clima Sopó (Colombia). [ONLINE]. Available: <https://es.climate-data.org/>
- [22] FAO. (2021. Dic, 12). Capítulo 4 - control del medio ambiente. [ONLINE]. Available: <https://www.fao.org/3/s8630s/s8630s06.htm>
- [23] Mañunga, T., Gutiérrez, H. M., Rodríguez, J. A., & Díaz, A. V. (2010). Tratamiento de residuos de DQO generados en laboratorios de análisis ambientales. *Ingeniería e investigación*, 30(2), 87-95.
- [24] Chamorro Guizado, G. N., & Tan Chamaya, J. (2019). Uso de un biorreactor para el tratamiento anaerobio con diferentes tipos de pH para reducir DQO y DBO del lactosuero residual.
- [25] Lara, J., Patiño, J. (2012). Costos de inversión, operación y mantenimiento (O & M) de tratamientos naturales de aguas residuales para pequeñas comunidades en Colombia. doi:10.13140/RG.2.1.3439.6642
- [26] Barrios, J. A., Cano, A., Rivera, F. F., Cisneros, M. E., & Durán, U. (2021). Efficiency of integrated electrooxidation and anaerobic digestion of waste activated sludge. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1) doi:10.1186/s13068-021-01929-7

- [27] Liu, H., Sun, Y., He, X., Zhang, H., Wei, J., & Zhu, L. (2021). Microbiological synthesis of denitrifying bacteria-iron nanoparticl composite material and its eminent performance in removal of nitrate-N. *Separation and Purification Technology*, 267 doi:10.1016/j.seppur.2021.118663
- [28] Liu, Z., Stromberg, D., Liu, X., Liao, W., & Liu, Y. (2015). A new multiple-stage electrocoagulation process on anaerobic digestion effluent to simultaneously reclaim water and clean up biogas. *Journal of Hazardous Materials*, 285, 483-490. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.10.009