

**Estudio técnico y económico para implementación de tecnología anaerobia para el
tratamiento de aguas residuales de la planta de beneficio bovino COLBEEF.**

Henry Orlando Anaya Doria, Luz Angela Jaramillo Ciprian

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Humberto Escalante Hernández

Ingeniero Químico, PhD

Codirector

Zamir Sánchez Castro

Ingeniero Químico, MSc

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mis abuelos Orlando Doria y Senovea Álvarez quienes a pesar de su partida ha sido mi guía, fortaleza y su fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy.

A mis padres Henry Anaya y Carmen Doria quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades.

A mi hermana Yuliana Anaya por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas mis amigas y amigos, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias.

Henry Orlando Anaya Doria

Dedicatoria

A mi madre Alexandra Ciprian, por su apoyo incondicional, comprensión y sacrificio. Ya que sin ella no lo habría logrado, por ser mi guía y mi ejemplo a seguir, agradezco eternamente por todo lo que ha hecho por mí.

A mi padre Miguel Jaramillo quien con su esfuerzo me ha sacado adelante, he sido testigo de su disciplina y esmero durante todos los días.

A mi hermana Juliana Jaramillo por siempre sacarme una sonrisa sin importar el día ni la hora.

A mi abuela Flor Rincón por cuidarme cuando era pequeña, por ser mi segunda mamá y por absolutamente todo lo que hizo por mí.

A mi compañero de vida Damon, por las largas noches que compartió a mi lado durante la realización de este trabajo, por ese amor incondicional y leal que me ha dado desde que llego a mi vida.

Finalmente quiero dedicar este trabajo a Daniela Nuñez, por siempre estar a mi lado. Por todas las enseñanzas que ha dejado en mí a lo largo de estos años y por ser ese lugar de paz ante cualquier adversidad.

Luz Angela Jaramillo Ciprian

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible este proceso y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes. Estas palabras son para ustedes. A mis padres, mi hermana y mi compañera por todo su amor, comprensión y apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, unas buenas, otras malas, otras locas. Gracias por darme la libertad de desenvolverme como ser humano.

Al la Universidad Industrial de Santander por ser esa trinchera del conocimiento pluricultural y de saberes. Al la Escuela de Ingeniería Química por el esfuerzo realizado por cada uno de sus miembros, en especial al Ingeniero Humberto Escalante, la Ingeniera Liliana Castro y al Ingeniero Zamir Sánchez por estar desde el día uno hasta el momento final de esta investigación. De igual forma, no quiero perder la oportunidad de agradecer a mi compañera de trabajo de trabajo Luz Jaramillo por ser ese apoyo y ese engranaje esencial que hizo que esto fuera posible.

Finalmente agradecer a la Federación de Estudiantes Universitarios (FEU) por ser ese escenario donde pude desarrollar mi formación política e integral dentro de la universidad, a todos los compañeros y todas las compañeras que estuvieron conmigo es todo este proceso formativo muchas gracias.

Henry Orlando Anaya Doria

Agradecimientos

Agradezco principalmente a todas las personas que han estado conmigo a lo largo de este camino, a mis padres, hermana y pareja por ser un apoyo incondicional durante este proyecto.

A Paula Ciprian por su apoyo y consejos durante la ejecución de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme formar como profesional y persona integra.

Al doctor en ingeniería química Humberto Escalante, a la doctora en ingeniería química Liliana Castro y al magister en ingeniería química Zamir Sanchez por los conocimientos entregados y la disposición para hacer posible este trabajo de grado.

Finalmente quiero agradecer a mi compañero de tesis, Henry Anaya por la disciplina y constancia que demostró al realizar este trabajo, y que más que un compañero al finalizar este proyecto termino convirtiéndose en un amigo.

Luz Angela Jaramillo Ciprian

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
2. Objetivos	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. Estado del Arte	18
4. Metodología	20
4.1 Etapa 1: Diagnostico de la Planta de Beneficio Bovino Colbeef.	20
4.2 Etapa 2: Diseño Básico de la Tecnología Anaerobia.....	21
4.3 Etapa 3: Evaluación económica de la Tecnología Anaerobia.	26
5. Resultados	30
5.1 Etapa 1: Diagnostico de la Planta de Beneficio Bovino ColBeef	30
5.2 Etapa 2: Diseño Básico de la Tecnología Anaerobia.....	38
5.3 Etapa 3: Evaluación Económica de la Tecnología Anaerobia	45
6. Conclusiones	57
Referencias Bibliográficas	60

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Mezclas sinérgicas de las aguas residual de la PBB Colbeef</i>	22
Tabla 2. <i>Caracterización de las mezclas sinérgicas de las aguas residuales de la PBB Colbeef</i>	22
Tabla 3. <i>Escenarios posibles a partir de las mezclas sinérgicas de las aguas residuales de la PBB Colbeef</i>	24
Tabla 4. <i>Parámetros del modelo económico aplicado</i>	28
Tabla 5. <i>Balance de masa en DQO para el tratamiento de aguas residuales en Colbeef</i>	33
Tabla 6. <i>Promedio de indicadores de referencia de consumo de la PBB Colbeef</i>	36
Tabla 7. <i>Indicadores de referencia de generación de agua residuales en Colombia y otros países</i>	36
Tabla 8. <i>Volumen total de tratamiento</i>	40
Tabla 9. <i>Resumen de diseño para el escenario 1</i>	41
Tabla 10. <i>Remoción de DQO y ahorro de químicos para el escenario 1</i>	42
Tabla 11. <i>Resumen de diseño básico para cada uno de los escenarios planteados</i>	43
Tabla 12. <i>Inversión inicial (CAPEX) para el aprovechamiento del biogás en la generación de energía eléctrica</i>	46
Tabla 13. <i>Inversión inicial (CAPEX) para el aprovechamiento del biogás en la generación de energía térmica</i>	46
Tabla 14. <i>Costo de operación (OPEX) a 15 años de proyección</i>	48
Tabla 15. <i>Resumen de análisis económico para el escenario 1 en el aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica</i>	49

Tabla 16. <i>Resumen de análisis económico para el escenario 1 en el aprovechamiento del biogás para la generación de energía térmica</i>	50
Tabla 19. <i>Especificaciones de los equipos requeridos para el aprovechamiento del biogás generado</i>	55

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Diagrama global del proceso de la PBB Colbeef</i>	21
Figura 2. <i>Diagrama global del proceso en la PBB Colbeef</i>	31
Figura 3. <i>Diagrama de generación de aguas residuales por áreas del proceso</i>	32
Figura 4. <i>Diagrama general del proceso de tratamiento de aguas residuales de Colbeef</i>	33
Figura 5. <i>Indicadores de consumo de la PBB Colbeef por tonelada de carne en canal (tCC)</i>	34
Figura 6. <i>Proceso de codigestión terciaria para el escenario 1</i>	38
Figura 7. <i>Proceso de codigestión binaria para el escenario 1</i>	39
Figura 8. <i>Proceso de monodigestión para el escenario 1</i>	39
Figura 9. <i>Diagrama global de la PBB Colbeef con la tecnología anaerobia</i>	45
Figura 10. <i>Resumen de indicadores económicos para cada uno de los escenarios planteados para la generación de energía eléctrica</i>	52
Figura 11. <i>Resumen de indicadores económicos para cada uno de los escenarios planteados para la generación de energía térmica</i>	53
Figura 12. <i>Relación entre la energía que consume y el potencial de energía generada para la PBB Colbeef</i>	55
Figura 13. <i>Diagrama global de la PBB Colbeef y el tratamiento de las aguas residuales</i>	56

Lista de Siglas

PBB: planta de beneficio bovino

DA: digestión anaerobia

AV: aguas viscerales

AS: aguas sacrificio

AE: aguas estomacales

AC: aguas de corral

DQO: demanda química de oxígeno

PIB: producto interno bruto

TNI: total de ingresos netos

TI: total de ingresos

TC: total de costos

DAF: sistema de flotación

SV: sólidos volátiles

ST: sólidos totales

TRH: tiempo de retención hidráulica

PBM: potencial de biometanización

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales

TIR: tasa interna de retorno

VNA: valor actual neto

PRI: periodo de retorno de la inversión

PE: potencial energético

Resumen

Título: Estudio técnico y económico para implementación de tecnología anaerobia para el tratamiento de aguas residuales de la planta de beneficio bovino COLBEEF*

Autor: Henry Orlando Anaya Doria, Luz Angela Jaramillo Ciprian†

Palabras Clave: Planta de beneficio bovino, tecnología anaerobia, tratamiento de aguas residuales, estudio técnico y económico, rentabilidad y viabilidad.

Descripción:

La planta de beneficio bovino ColBeef, ubicada en la Vía Corredor Río Frío en Floridablanca, Santander genera actualmente un gran volumen de aguas residuales dentro del proceso de sacrificio bovino, dicha empresa está en la obligación de realizar un tratamiento de estas aguas para poder cumplir con la normativa ambiental donde la DQO de las aguas tratadas debe ser menor o igual a 900 mg/L, el tratamiento fisicoquímico que realiza la empresa en la actualidad es costoso e insuficiente, por ello en este trabajo se realiza el análisis técnico y económico de 10 escenarios de mezclas sinérgicas tomadas de la bibliografía para poder generar un diseño de la planta con digestores para la implementación de la tecnología anaerobia, los cuales generan metano y biogás para producir energía eléctrica o térmica y de esta manera generar un ahorro en el consumo de dichos servicios industriales en ColBeef, finalmente se elige el escenario optimo donde se obtenga el mejor diseño de planta, teniendo en cuenta el número de digestores empleados, así como la cantidad de producción de metano y biogás y los mejores datos económicos para concluir con la rentabilidad y viabilidad planteando los análisis CAPEX y OPEX además de ingresos totales y costos de inversión para poder calcular datos como el tiempo de recuperación de inversión, la tasa interna de retorno y el valor actual neto de cada escenario.

* Trabajo de Grado

† Universidad Industrial de Santander. Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández. PhD. Codirector: Zamir Sánchez Castro. MSc

Abstract

Title: Technical and Economic Study for Implementation of Anaerobic Technology for Wastewater Treatment of the COLBEEF Cattle Benefit Plant*

Author(s): Henry Orlando Anaya Doria, Luz Angela Jaramillo Ciprian†

Key Words: Cattle Benefit plant, anaerobic technology, wastewater treatment, technical and economic study, profitability and viability.

Description: The ColBeef cattle benefit plant, located in the Via Corredor Río Frío in Floridablanca, Santander currently generates a large volume of waste water within the cattle slaughter process, that undertaking is obliged to carry out a treatment of these waters in order to comply with the environmental regulations where the COD of the treated waters must be less than or equal to 900 mg/L, the physico-chemical treatment currently carried out by the company is costly and insufficient, therefore in this work the technical and economic analysis of 10 scenarios of synergistic mixtures taken from the bibliography to be able to generate a plant design with digesters for the implementation of anaerobic technology is carried out, which generate methane and biogas to produce electrical and thermal energy or thus generate savings in the consumption of such industrial services in ColBeef, finally the optimal scenario is chosen where the best plant design is obtained, taking into account the number of digesters used, as well as the amount of methane and biogas production and the best economic data to conclude with profitability and viability by considering the CAPEX and OPEX analysis in addition to total revenue and investment costs to be able to calculate data such as recovery time of investment, the internal rate of return and the net present value of each scenario.

* Degree Work

† Industrial University of Santander. Chemical Engineering. Director: Humberto Escalante Hernández. PhD. Co-Director: Zamir Sánchez Castro. MSc

Introducción

La Industria cárnica es uno de los sectores más relevantes a nivel mundial. Según la OCDE-FAO el consumo actual de carne es de 60 millones de toneladas al año (Mt/año) y se proyecta un incremento del 16% para el 2028(OCDE/FAO, 2020). Con respecto a Colombia, el país produce 8,8 Mt de carne anualmente y se espera que se alcancen los 9,7 millones de toneladas para el 2028 (Fedegan, 2020b). Así mismo, el sector ganadero colombiano representa el 1,4% del producto interno bruto (PIB) nacional, el 21,8% del PIB agropecuario, el 48,7% del PIB pecuario (Fedegan, 2020a), convirtiéndolo en uno de los renglones más importantes de la economía del país.

Se estima que la producción de carne bovina presenta un consumo de agua potable de 14.500 m³/t de carne, convirtiéndola en una de las industrias con mayor impacto en el recurso hídrico (Hoekstra & Mekonnen, 2012). En términos generales, una planta de beneficio bovino (PBB) consta de una serie de etapas en la cuales se generan cuatro corrientes de aguas residuales: **i)** Aguas de lavado de corrales; contienen estiércol bovino (AC) **ii)** Aguas de la zona de sacrificio (AS); arrastran residuos de sangre **iii).** Aguas de lavado de vísceras (AV), poseen partículas de grasa y carne y **iv)** Aguas de lavado estomacal (AE); contienen el contenido ruminal. Estas corrientes de aguas residuales contienen cargas orgánicas entre 2.000 mg DQO/L (Caixeta et al., 2002) y 20.400 mg DQO/L (Saddoud et al., 2007). Por consiguiente, la regulación colombiana obliga a las PBB a tratar estas aguas residuales antes de su vertimiento como lo indica la resolución 631 de 2015.

En Colombia, las PBB se clasifican en tres clases. La clase I corresponde a PBB certificadas para abastecer el consumo nacional y exportaciones. La clase II hace referencia a las PBB certificadas para abastecer solo consumo nacional. Por último, la clase III son PBB destinadas al autoconsumo del municipio donde se ubican (Contextoganadero, 2015). En el área metropolitana

de Bucaramanga se encuentra ubicada la PBB ColBeef (Lat N 7° 3' 14.82'' Long W 73° 7' 55.282''), la cual es una de las plantas clase I del país. ColBeef presenta un sacrificio promedio anual cercano a los 175.000 bovinos y genera aproximadamente 204.000 m³/año de aguas residuales. Este volumen de aguas residuales es tratado mediante un tratamiento fisicoquímico que consta de un sistema de flotación (DAF), un tamizado y un proceso de floculación-coagulación, con un costo promedio cercano a los US\$ 216.000 año. Este tratamiento además de ser costoso es insuficiente, dado que por el gran volumen de aguas residuales a tratar en ocasiones la DQO de las aguas tratadas supera la norma ambiental (900 mg/L) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Es por esto por lo que ColBeef busca nuevas alternativas de tratamiento de sus aguas residuales, las cuales le permitan tener beneficios.

La digestión anaeróbica (DA) ha demostrado ser una tecnología eficiente para el tratamiento de residuos de matadero, dado que permite su degradación para generar un biogás (55-70% CH₄) y un lodo rico en nutrientes (nitrógeno y fosforo) (Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015). Jensen et al. (2014) presentan potenciales de CH₄ entre 0,250 y 1,000 m³/kg SV para aguas residuales provenientes de plantas de beneficio animal en Australia. Sánchez et al. (2021) determinaron potenciales de CH₄ de 0,154, 0,425 y 0,505 m³/kg SV para corrientes de AE, AV y AS, generadas en una planta de beneficio bovino colombiana. Así mismo los autores calculan potenciales de energía térmica y eléctrica de 42,69 y 13,34 kWh/m³, respectivamente. Lo anterior demuestra que la DA es una alternativa adecuada para el tratamiento de las aguas residuales de ColBeef. Sin embargo, la implementación de una tecnología en un proceso productivo requiere un análisis detallado que permita establecer la viabilidad técnica y económica del proyecto, con el objetivo de reducir los riesgos asociados (Gomez, 2014).

La información publicada sobre estudios técnico-económicos de la implementación del proceso de DA en plantas de beneficio animal es escasa. Ek et al. (2011) presentan una recopilación de experiencias en 15 años de una PBB donde después de este periodo de operación la planta logró un aumento continuo de la producción de biogás, superando las expectativas del diseño. (González-González et al., 2014) realizaron un estudio técnico-económico para la hibridación de celdas fotovoltaicas y biogás en una planta de beneficio de cerdos. Los resultados indican que la hibridación permitiría alcanzar la autosuficiencia energética dentro de la planta de beneficio. (Ortner et al., 2015) realizaron la optimización del proceso de DA y el uso de biogás en una planta de tratamiento de residuos de beneficio de cerdos. Los resultados demuestran que después de la optimización, el proceso de DA suplió el 50% de la energía térmica y 60% de la energía eléctrica de la planta de beneficio, con un ahorro económico del 63%.

Los estudios mencionados anteriormente, representan una línea base para el análisis del estudio técnico económico de la PBB ColBeef. Sin embargo, las condiciones del caso de estudio de este trabajo difieren de lo reportado en la literatura: *i)* tipo de sustrato; los estudios mencionados utilizan residuos sólidos del beneficio animal los cuales presentan potenciales de metano superiores a las aguas residuales; *ii)* condiciones de operación; los casos de estudio citados son sobre plantas Europeas las cuales presentan variabilidad debido a las estaciones y *iii)* costos, al tratarse de plantas ubicadas en Europa los costos de energía, tratamiento de residuos y equipos son muy diferentes.

Desde enero de 2020 hasta junio del 2021 se recopilaron datos de operación de la planta de beneficio bovino Colbeef, así como información de las mezclas sinérgicas de aguas residuales obtenida mediante investigaciones previas realizadas por el grupo de investigación INTERFASE. Adicionalmente, se realizó el respectivo balance de masa y energía actual de la PBB, con un cálculo

en el consumo de energía y generación de aguas residuales de Colbeef para poder tener un diagnóstico general de la PBB en la actualidad. Seguido a esto se elaboró un balance de masa con la aplicación de la tecnología en la planta de beneficio bovino, calculando de esta manera volumen de digestión, tanques de mezclado y almacenamiento, para poder determinar potenciales energéticos, además la determinación de generadores eléctricos necesarios para energía eléctrica y calentadores necesarios para energía térmica.

Por esto el presente trabajo de grado busca determinar la factibilidad de la implementación de la tecnología anaerobia para el tratamiento de aguas residuales del beneficio bovino mediante un estudio técnico-económico aplicado a la PBB ColBeef. Finalmente se realizó una evaluación del sistema de digestión anaerobia utilizando los análisis CAPEX y OPEX, para seleccionar la mejor opción para el aprovechamiento de biogás y tener una mejor visión para así diferenciar el diseño actual del diseño con la tecnología anaerobia. Dado que no existen estudios similares publicados en el país, este trabajo podría ser tomado como base para la futura aplicación del proceso de DA a escala real en plantas de beneficio animal en Colombia.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad de la aplicación de la tecnología anaerobia en la gestión y valorización de las aguas residuales de la planta de beneficio bovino ColBeef, mediante un estudio técnico-económico.

2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar un diagnóstico sobre las condiciones actuales del proceso de tratamiento de las aguas residuales y el consumo energético de la planta de beneficio bovino ColBeef.
2. Realizar el diseño básico de un sistema de digestión anaeróbica (generación y aprovechamiento de biogás) para el tratamiento de aguas residuales del beneficio bovino.
3. Evaluar la viabilidad económica de la implementación de la tecnología anaerobia en la planta de beneficio bovino ColBeef.

3. Estado del Arte

El potencial energético de residuos de beneficio animal mediante digestión anaeróbica ha sido demostrado en estudios anteriores. Un análisis realizado en Irán demuestra un potencial de generación de biogás total de $8.600 \text{ m}^3/\text{año}$ para las plantas de beneficio animal del país (Afazeli et al., 2014). Para plantas de beneficio animal en Uruguay se ha reportado un potencial de 4 millones de m^3 de biogás/año (Moreda, 2016). Para países Africanos en la provincia de Mauritania los potenciales de biogás ascienden a $2.452 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ (Ali et al., 2020). Así mismo, el estudio realizado por Ware & Power (2016) demuestra un potencial energético para el aprovechamiento de biogás en energía eléctrica de 188.027 MWh y térmica de 224.715 MWh, para residuos de beneficio animal en Irlanda. Por su parte, para Estados Unidos se han calculado potenciales energéticos de $22.7 \times 10^9 \text{ kWh}$ para la DA de residuos de beneficio animal (Wang et al., 2018).

A pesar del alto potencial energético de la DA de residuos de beneficio animal, los estudios publicados sobre la aplicación de esta tecnología en plantas de beneficio son limitados. Por ejemplo en la literatura se encuentra la planta de co-digestión de residuos de matadero operada por la empresa Svensk Biogás AB (SvB) ubicada en la ciudad de Linköping, sur de Suecia, en la cual se demuestra un mejoramiento en el desempeño de la DA con el tiempo. Ek et al. (2011) presentan una recopilación de experiencias en 15 años de operación de un digestor CSTR (4700 m^3) alimentado con mezcla de residuos de beneficio animal y estiércol. Las producciones de biogás ascendieron desde menos de 1 millón de $\text{m}^3/\text{año}$, al inicio de la planta, hasta 9 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ después de 15 años de operación. El sistema de DA optimizado logra tratar el 85% de los residuos generados en el proceso de beneficio con rendimientos térmicos y eléctricos de 2700 kWh y 3200 kWh, respectivamente. Por otra parte un estudio desarrollado en Cochabamba (Bolivia) para la DA de aguas residuales de beneficio animal en digestores tubulares, demuestra rendimientos de biogás

de 0.55 m³/kg SV para un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 9.7 d y una carga orgánica de 0.37 kg SV/m³ d (Martí-Herrero et al., 2018). Sin embargo, en este estudio no se evaluó la integración energética del biogás en el proceso de beneficio, por lo cual no reporta análisis técnico-económico relacionado con la implementación de la tecnología anaerobia.

Para la planta de beneficio Colbeef, el estudio llevado a cabo por (Sánchez et al., 2021) evaluó el potencial de biometanización (PBM) de las corrientes de aguas residuales. Así mismo, se evaluaron los efectos sinérgicos de la co-digestión de las diferentes corrientes de aguas residuales. Los resultados de las 21 mezclas evaluadas demuestran rendimientos de CH₄ entre 0.154 y 0.505 m³/kg SV. De las 21 mezclas evaluadas 7 presentaron sinergia tanto en el rendimiento de CH₄ como en la cinética. La co-digestión de las mezclas sinérgicas presentó potenciales energéticos de 42,69 y 13,34 kWh/m³ para energía térmica y eléctrica, respectivamente (Sánchez et al., 2021).

Unas de las metodologías más utilizadas para la evaluación de proyectos son los análisis CAPEX (*Operational expenditures*)-OPEX (*Operational expenditures*). El CAPEX consiste en el presupuesto de capital que es usado para comprar activos fijos, para la adquisición de equipamiento e ítems principales de una planta, en el cual se requiere un análisis de las necesidades del negocio y las opciones de inversión, por otro lado, el OPEX se conoce como presupuesto de mantenimiento y operación, en el cual se consideran los gastos operacionales. Por ejemplo, Heredia et al., (2020) utiliza los análisis CAPEX-OPEX para comparar los costos asociados a dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

La aplicación del análisis CAPEX-OPEX en proyectos de digestión anaeróbica permite obtener indicadores de evolución como: i) la tasa interna de retorno (TIR); la cual indica el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión, ii) el valor actual neto (VNA); permite evaluar proyectos de inversión a largo plazo y iii) el periodo de retorno de la inversión (PRI);

indicador que da a conocer el tiempo de recuperación de la inversión, siendo preciso en años (González-González et al., 2014).

4. Metodología

Para evaluar la implementación de la tecnología anaerobia en la PBB Colbeef se planteó una metodología en tres etapas. Inicialmente se realizó un diagnóstico del estado actual de la planta ColBeef. Posteriormente se evaluaron diferentes escenarios de co-digestión de las corrientes de aguas residuales para determinar la producción de biogás, el potencial de energía térmica y eléctrica, los equipos requeridos y el ahorro de floculante en el tratamiento de las aguas residuales. Luego se realizó un análisis económico basado en la metodología CAPEX – OPEX, mediante el cual se determinó el escenario más favorable donde se tuvo en cuenta la implementación del biogás producido para la generación de energía térmica o energía eléctrica debido a que el biogas debe ir a una de estas y no es posible usarlo para producir ambas al mismo tiempo. Finalmente se realizó el diseño básico para la implementación del proceso de DA en la PBB Colbeef.

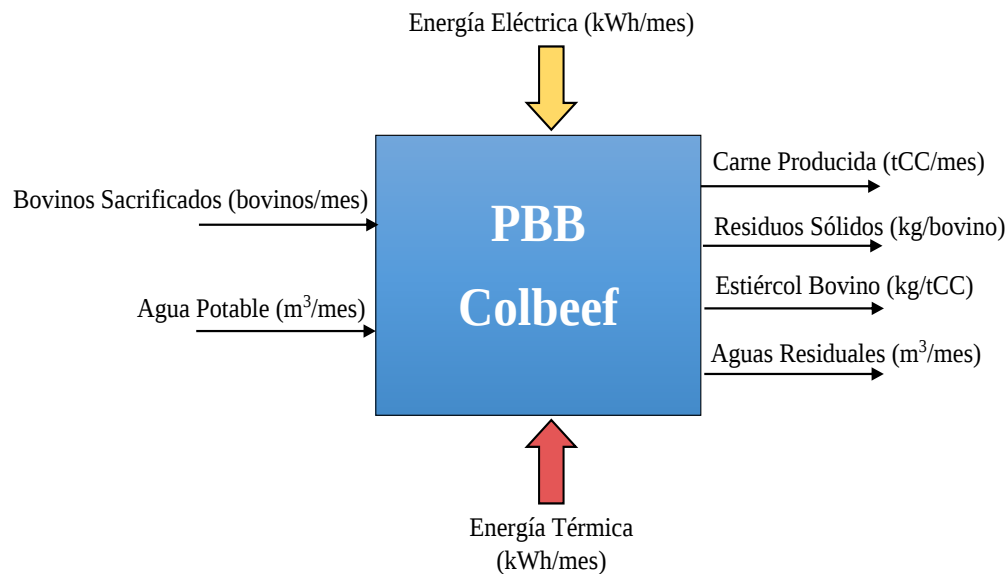
4.1 Etapa 1: Diagnostico de la Planta de Beneficio Bovino Colbeef.

- **Balance de Masa y Energía Actual en la PBB Colbeef.**

El balance de masa y energía de la planta de beneficio bovino (PBB) Colbeef se realizó teniendo en cuenta la cantidad de bovinos sacrificados, el consumo de agua potable, el consumo energético y la cantidad de producto y residuos generados. La información fue tomada de los registros facilitados por Colbeef, los cuales son compilados por la empresa de forma semestral. En este sentido para los balances de masa y energía se tomaron los registros comprendidos entre enero del 2020 y junio del 2021 y se sintetizaron en un diagrama global de la PBB (Figura 1).

Figura 1.

Diagrama global del proceso de la PBB Colbeef



- **Cálculo de Indicadores de Consumo de Energía y Generación de Aguas Residuales para la PBB Colbeef.**

A partir del balance de masa y energía desarrollado se establecieron indicadores de energía consumida (kWh/t carne en canal), aguas residuales generadas (m^3/t carne canal) costo de tratamiento de las aguas residuales (\$/t carne canal) y carga orgánica generada (kg DQO/t carne canal). El cálculo de las toneladas de carne en canal (tCC) producidas se realizó a partir del sacrificio mensual de Colbeef, considerando un peso promedio de res de 441,6 kg y un rendimiento de carne en canal del 51.4% (DANE, 2021), teniendo en cuenta como carne en canal a lo que resulta de la res sin piel, vísceras, cabeza y órganos genitales. Estos indicadores permitieron evaluar las condiciones iniciales de la PBB Colbeef.

4.2 Etapa 2: Evaluación Técnica de la Implementación de la Tecnología Anaeróbica.

- **Balance de Masa de la Tecnología Anaerobia Aplicada a la PBB Colbeef.**

Para la implementación de la tecnología anaerobia dentro de la PBB Colbeef se seleccionaron las 7 mezclas sinérgicas (Tabla 1) halladas por Sánchez et al. (2021) en su estudio de Co-digestión de aguas residuales y estiércol provenientes de una planta de beneficio bovino. Estas mezclas sinérgicas fueron previamente evaluadas en operaciones en semicontinuo en digestores tubulares por el Laboratorio de Digestión Anaeróbica (LDA) de la escuela de Ingeniería Química de la UIS. La información suministrada por el LDA correspondiente a: las condiciones de operación (Carga orgánica y tiempo de retención hidráulica), la producción específica de biogás (PSB), la composición de CH₄ y la remoción de DQO, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 1.

Mezclas sinérgicas de las aguas residual de la PBB Colbeef

NOMENCLATURA	%SV AS	%SV AV	%SV AE	%SV EB
AS67:AV33	67	33	0	0
AS33:AE67	33	0	67	0
AV33:AE67	0	33	67	0
AV33:EB67	0	33	0	67
AS33:AV33:AE34	33	33	34	0
AS33:AE33:EB34	33	0	33	34
AS25:AV25:AE25:EB25	25	25	25	25

Fuente: Suministrado por el Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la escuela de Ingeniería Química. SV: sólidos volátiles; AS: aguas de sacrificio; AV: aguas de lavado de vísceras; AE: aguas de lavado estomacal; EB: estiércol bovino.

Tabla 2.

Caracterización de las mezclas sinérgicas de las aguas residuales de la PBB Colbeef

MEZCLA	CO (kg SV/m ³ d)	TRH (d)	(PSB) (m ³ /kg SV)	% CH ₄	DQO entrada (mg/L)	DQO Salida (mg/L)	Remoción de DQO (%)
AS	0.42	18	NA	NA	NA	NA	NA
AV	0.57	18	0,175	68,69	9427	5791	38,56

AE	1.31	18	0,167	56,84	9975	3421	65,71
EB	1.29	18	0,088	52,93	11229	7918	29,49
AS67:AV33	0.42	18	0,48	67,68	9721	2369	75,63
AS33:AE67	0.49	18	0,339	58,83	10163	3320	67,33
AV33:AE67	0.53	18	0,167	63,44	10834	7213	33,42
AV33:EB67	1.29	18	0,14	56,39	10668	4977	53,35
AS33:AV33:AE34	0.54	18	0,226	66,75	10386	4209	59,47
AS33:AE33:EB34	0.50	18	0,227	62,28	8275	3038	63,29
AS25:AV25:AE25:EB25	0.52	18	0,420	60,50	6208	2583	58,39

Fuente: Suministrado por el Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la escuela de Ingeniería Química. CO: carga orgánica TRH: tiempo de retención hidráulica.

En la Tabla 2 no se reportan datos para las AS, dado que su monodigestión no fue posible debido a inhibición por NH_3 . A partir de las mezclas sinérgicas presentadas en la Tabla 1, se plantaron escenarios para la evaluación técnica y económica teniendo en cuenta los siguientes criterios:

1. Las aguas de sacrificio (AS) no pueden digerirse solas por su riesgo de inhibición por NH_3 , por lo cual deben ir en Co-digestión en mezclas binarias y multicomponentes. De esta manera, la primera corriente de aguas residuales en agotarse fueron las AS.
2. Las aguas de lavado de vísceras (AV) restantes fueron co-digestadas en mezclas binarias con aguas de lavado estomacal (AE) o estiércol bovino (EB). Por tanto, la segunda corriente de aguas residuales en agotarse son las AV.
3. Las AE restantes fueron sometidas a mono-digestión, para finalizar con las aguas residuales disponibles para digerir.

La aplicación de los criterios anteriores dio como resultado 10 escenarios a evaluar (Tabla 3).

Tabla 3.

Escenarios posibles a partir de las mezclas sinérgicas de las aguas residuales de la PBB Colbeef

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
AS33:AV33:AE34	AS33:AV33: AE34	AS33:AE33:EB34	AS33:AE33:EB34	AS25:AV25:AE25:EB25
AV33:EB67	AV33:AE67	AV33:EB67	AV33:AE67	AV33:EB67
AE	AE	AE	AE	AE
Escenario 6	Escenario 7	Escenario 8	Escenario 9	Escenario 10
AS25:AV25:AE25:EB25	AS67:AV33	AS67:AV33	AS33:AE67	AS33:AE67
V33:AE67	AV33:EB67	AV33:AE67	AV33:EB67	AV33:AE67
AE	AE	AE	AE	AE

- **Potencial Energético de la Tecnología Anaerobia Aplicada a la PBB Colbeef.**

Se determino el potencial energético (PE) de la DA de los 10 escenarios de co-digestión, considerando dos usos del biogás: generación de energía eléctrica o sustitución de gas natural (energía térmica). Para la generación de energía eléctrica se consideró la implementación de generadores eléctricos alimentados con biogás. Por su parte, para el aprovechamiento térmico del biogás, se planteó el uso para el calentamiento de agua potable a 60°C para el proceso de limpieza. Los PE [kWh/día] se calcularon mediante la ecuación (1).

$$PE = V_{CH_4} \cdot P_{CH_4} \cdot \eta \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde V_{CH_4} es el volumen de CH_4 producido ($m^3/día$), P_{CH_4} es el poder calorífico inferior del metano ($10kWh/m^3$) y η es la eficiencia energética, la cual se tomó como 20% para la energía eléctrica (generador eléctrico) y 80% para la energía térmica (calentadores de agua) (Ali et al., 2020). El volumen de CH_4 fue calculado a partir de la producción específica

de biogás (PSB) de cada escenario [$\text{m}^3/\text{kg SV}$], el caudal de aguas residuales a tratar (Q) [$\text{m}^3/\text{año}$], la concentración de SV de los respectivos escenarios [$\text{kg SV}/\text{m}^3$] y el porcentaje de CH_4 ($\%\text{CH}_4$), los cuales fueron tomados de la Tabla 2.

$$V_{CH_4} = PSB \cdot Q \cdot SV \cdot \%\text{CH}_4 \quad (\text{Ec. 2})$$

- **Remoción de carga orgánica y ahorro en el consumo de químicos**

Dado que el proceso de DA por sí solo no puede reducir la carga orgánica de las aguas residuales hasta los 900 mg/L requeridos por la normativa ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), todos los escenarios necesitaron un postratamiento, para lo cual se asumió el ingreso del digerido al tanque de floculación-coagulación. Bajo condiciones normales de operación de la PTAR de Colbeef la etapa de floculación-coagulación permite reducir la carga orgánica de las aguas residuales de 4720 a 1800 mg/L, con un consumo, principalmente, de 0.18 mg de FeCl_2 / mg DQO. Es decir que digeridos con DQO menor a 4720 mg/L condujeron a un ahorro en el consumo de FeCl_3 . Por el contrario, concentraciones superiores a 4720 mg/L conllevan a un incremento en el consumo de FeCl_3 . Por tanto, el ahorro en la cantidad de FeCl_3 se obtuvo a partir de la ecuación 3.

$$m_{FeCl_3} = (DQO_D - 4720) * 0.18 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde m_{FeCl_3} es la masa de FeCl_3 (mg/L) ahorrada con el proceso de DA y DQO_D es la DQO del digerido (mg/L). Valores negativos de m_{FeCl_3} indicaron aumentos en el consumo de FeCl_3 .

- **Diagrama de Flujo de Masa y Energía de la Tecnología Anaerobia**

La PBB Colbeef cuenta con un área disponible cercana a los 1.750 m² para el montaje del proceso de DA. Un cálculo preliminar realizado a partir de los PBM reportados por Sánchez et al. (2022) de las mezclas sinérgicas considerando digestores tubulares de 40 m³ con área de ocupación por digestor de 59 m² (el mayor tamaño encontrado en el mercado), indica un caudal máximo del 10% del total de las aguas residuales de Colbeef. A partir del caudal (Q) [m³/día] y el TRH [día] (Tabla 2) se determinó la cantidad de digestores necesarios (NoDig), asumiendo un llenado del 80% (Martí-Herrero et al., 2018).

$$NoDig = \frac{Q \cdot TRH}{0.8 \times 40} \quad (\text{Ec. 4})$$

A partir de PE se determinaron el número del calentador (NoCal) teniendo como referencia un calentador con un consumo de 34,6 m³/día. A partir del caudal de biogás (Qbiogas) [m³/día] y la capacidad del calentador (Ccal) [m³/día] (Osejo, 2017).

$$NoCal = \frac{Q_{biogas}}{C_{cal}} \quad (\text{Ec. 5})$$

y para el número de generadores eléctricos (NoGE) se tiene en cuenta el PE, donde se relacionó el PE generado a partir del biogás producido con el potencial del generador eléctrico (PG) disponible en cotizaciones realizadas en el estudio de Cruz & Caceres, 2021 de 10kW.

$$NoGE = \frac{PE}{PG} \quad (\text{Ec. 6})$$

Adicionalmente se determinaron el número de tanques de mezclado de las aguas residuales y los tanques de almacenamiento del digerido teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento de 10.000 L, donde se tiene en cuenta que solo se debe ocupar la 90% de la capacidad del tanque por seguridad de diseño (González Dorta, 2018). A partir del volumen de agua residuales (V_{AR}) que se alimentara al digestor y la capacidad del tanque (C_{tanq}).

$$NoT = \frac{V_{AR}}{C_{tanq} \times 0,9} \quad (\text{Ec. 7})$$

4.3 Etapa 3: Evaluación económica de la Tecnología Anaerobia.

La evaluación económica de la tecnología anaerobia se realizó mediante un análisis CAPEX-OPEX. Para el cálculo de CAPEX y OPEX se adaptó el modelo matemático presentado por Boldrin et al., (2016),

$$TNI = TI - TC \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde TNI [\$/año] es el total de ingresos netos, TI [\$/año] es el total de ingresos y el TC [\$/año] es el total de costos. Como ingresos se consideraron el ahorro en el consumo de gas natural o energía eléctrica ($I_{GN,EE}$) [\$/año] y tratamiento de las aguas residuales (I_{TAR}) [\$/año].

$$TI = I_{GN,EE} + I_{TAR} \quad (\text{Ec. 9})$$

El ahorro de gas natural corresponde al producto entre el precio pagado por Colbeef por el combustible (P^G) [\$/m³] y el volumen de CH₄ producido en el proceso de DA (V_{CH4}).

$$I_{GN} = P^{GN} \cdot V_{CH4}$$

Así mismo, el ahorro en la energía eléctrica se tomó a partir del precio pagado por Colbeef para este servicio (P^{EE}) [\$/kW] y el potencial eléctrico de los escenarios estudiados (PE) [kW/año].

$$I_{EE} = P^{EE} \cdot PE \quad (\text{Ec. 11})$$

El ahorro en el tratamiento de las aguas residuales se constituye por el ahorro en servicios y personal de la PTAR y el ahorro en el FeCl₃ (m_{FeCl3}) [g/m³] utilizado en la coagulación-floculación.

$$(\text{Ec. 12})$$

$$I_{TAR} = Q \left(P^{TAR} + \frac{P^{FeCl_3} \cdot m_{FeCl_3}}{1000} \right)$$

Donde P^{TAR} [\$/m³] es el precio de tratamiento de las aguas residuales en la PTAR de Colbeef excluyendo el costo del FeCl₃ y P^{FeCl_3} [\$/kg] corresponde al precio del FeCl₃

Por su parte el TC corresponde a los costos de capital (C_{capex}) [\$] y los costos de operación (C_{opex}) [\$]

$$C_{capex} = C_{capex,prod} + C_{capex,output} \quad (Ec. 13)$$

En la ecuación 13 $C_{capex,prod}$ hace referencia al costo de los tanques de almacenamiento, digestores, tuberías, accesorios y obra civil, mientras el $C_{capex,output}$ se relaciona con el costo de calentadores y generadores.

$$C_{opex,input} = \sum_{j \in J} p_j^{input} \cdot M_j \quad (Ec. 14)$$

Para el C_{opex} se consideran el costo de mantenimiento de los calentadores y generadores eléctricos y el costo relacionado con el pago de un operario para el sistema de DA, donde donde p_j y M_j son respectivamente el precio unitario, entendiendo que M_j es una función de cantidad.

En la Tabla 4 se resumen los parámetros asumidos en el modelo económico.

Tabla 4.

Parámetros del modelo económico aplicado

COMPONENTE ECONÓMICO	UNIDAD	VALOR
Total de Ingresos (TI)		
Precio del gas natural (P^{GN})	\$/m ³	\$ 1.562,27
Precio Energía Eléctrica (P^{EE})	\$/kWh	\$ 596,64
Precio Tratamiento Aguas Residuales (P^{TAR})	\$/m ³	\$ 2.085,94
Precio FeCl ₃ (P^{FeCl_3})	\$/kg	\$ 1.393,22

CAPEX		
Digestores	\$/Unidad	\$ 11.500.000,00
Calentadores	\$/Unidad	\$ 3.500.000,00
Generador eléctrico	\$/Unidad	\$ 33.395.251
Tanques de almacenamiento	\$/Unidad	\$ 11.302.900,00
Tubería y accesorios	\$/No.Dig	\$ 222.833,00
Obra civil	\$/No.Dig	\$ 340.000,00
OPEX		
Costo de Mantenimiento	\$/año	2% Costo de calentadores y generadores
Costo de Operario	\$/año	\$ 16.593.318,86

Los precios relacionados en el TI fueron suministrados directamente por Colbeef. El precio de los digestores de 40 m³ y el calentador de agua (consumo de 1,4 m³/h de biogás para calentamiento de 0,27 m³ de agua/h desde una temperatura 18°C a 40°C) y los costos de tuberías, accesorios y obra civil, fueron suministrados por la empresa SISTEMA.bio [<https://sistema.bio/co/>], la cual es proveedora de estos equipos en Colombia. Se consideran tanques de acero inoxidable de 10000 m³. El precio de los tanques fue suministrado por la empresa Home Center. Se asumió un generador de 10 kW y una capacidad de 0,6 m³/h de biogás, cuyo precio fue tomado de estudio realizado por Cruz & Caceres, 2021. Para el mantenimiento se asumió un costo anual correspondiente al 2% del valor de los equipos (González-González et al., 2014). Para el costo del operario se consideró un salario mínimo mensual vigente con sus respectiva seguridad y prestaciones sociales.

Para el análisis económico se tomó el más pequeño de los tiempos de vida útil de los equipos; 15 año. De esta manera se realizó una proyección a 15 años del precio del gas natural, energía eléctrica y FeCl₃ a partir del promedio del índice de precios al consumidor (IPC) de los últimos 4,27% años. Así mismo se proyectó el costo del operario del proceso de DA, mediante el promedio de los incrementos del salario mínimo de los últimos 6,32% años en

Colombia. A partir del anterior análisis se hallaron el tiempo de retorno de la inversión (TRI), el valor actual neto (VNA) y la tasa interna de retorno (TIR) como indicadores económicos para seleccionar el mejor escenario. Se tomó como tasa de descuento en el VPN el valor del DTF en Colombia en diciembre del 2021 (3.08%) (*Tasa de Interés DTF - Banco de La República (Banco Central de Colombia)*, n.d.)

Una vez seleccionado el mejor escenario se elaboró el diagrama de flujo de la implementación de la tecnología anaerobia en la PBB Colbeef donde se mostró cada etapa del proceso y las especificaciones técnicas de los equipos necesarios, teniendo en cuenta los diferentes escenarios.

5. Resultados

5.1 Etapa 1: Diagnostico de la Planta de Beneficio Bovino ColBeef

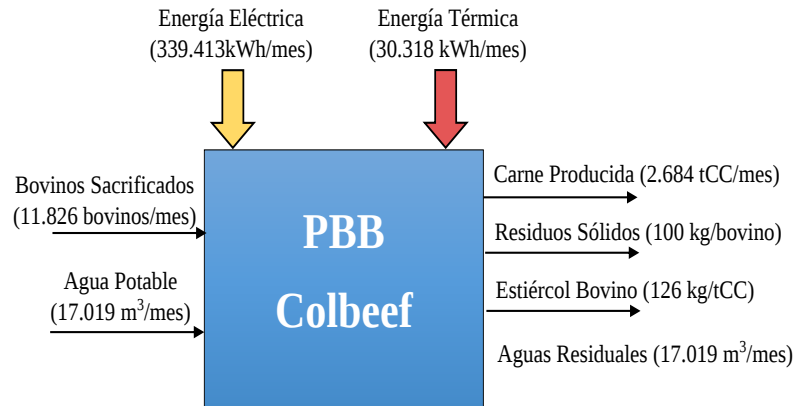
La Planta de Beneficio Bovino (PBB) ColBeef es una planta de clasificación tipo I, la cual está certificada para abastecer el consumo nacional y realizar exportaciones. Es así como la PBB Colbeef es una de las plantas más modernas y de mayor capacidad en Colombia. La PBB Colbeef se encuentra ubicada en Floridablanca, perteneciente al área metropolitana de Bucaramanga (Lat N 7° 3' 14.82'' Long W 73° 7' 55.282'').

Actualmente, La PBB ColBeef cuenta con una capacidad de sacrificio de 11.826 bovinos al mes en promedio (Figura 2). Para su operación Colbeef consume agua potable, gas natural y energía eléctrica de 17.019 m³/mes, 30.318 kWh/mes y 339.431 kWh/mes, respectivamente. Estos valores fueron tomados de los reportes de la empresa entre enero del 2020 y julio del 2021. El agua para el proceso de beneficio bovino es tomada de la quebrada Aranzoque y potabilizada en una PTAR propiedad de Colbeef. La energía eléctrica y el gas natural son suministrados por las empresas Electrificadora de Santander (ESSA) y Vanti,

respectivamente. La planta presenta una capacidad de producción de 2.684 tCC/mes en promedio cubriendo más del 55% del mercado local y participando activamente en el desarrollo de la cadena cárnica de Colombia (Triviño, 2021). De esta manera, la PBB ColBeef también presenta una generación de residuos sólidos (cabeza, patas, cuero y viseras) y una generación de estiércol bovino. Así mismo, las aguas residuales generadas son sometidas a un tratamiento fisicoquímico. Este tratamiento en ocasiones es insuficiente dado el gran volumen de aguas residuales a tratar, dando lugar a vertimientos con concentraciones de DQO superiores a las indicadas en el normativa ambiental (900 mg/L) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Figura 2.

Diagrama global del proceso en la PBB Colbeef



De los 17.019 m³/mes de aguas residuales que genera Colbeef, el 15% corresponde a las AC (2.552,906 m³/mes), 13% a las AS (2.212,518 m³/mes), el 32% a las AV (5.446,198 m³/mes) y 40% a las AE (6.807,748 m³/mes), como se evidencia en la Figura 4, las áreas de dependencia de cada una de estas corrientes de aguas residuales generadas.

En la Figura 3 se presenta un diagrama de flujo del actual proceso de tratamiento de aguas residuales de Colbeef. Inicialmente las corrientes de aguas residuales AS, AV, AE y AC

ingresan a un tanque de almacenamiento donde son mezcladas. Las aguas combinadas son enviadas a un tamiz donde se separan los sólidos gruesos. El agua tamizada pasa a un tanque clarificador, donde se realiza la floculación y coagulación con cloruro férrico y polímero aniónico. El lodo sedimentado del tanque clarificador es enviado a un filtro prensa. El lodo prensado junto con los sólidos retenidos en el tamiz es enviado a una zona de secado. La corriente de aguas residuales floculadas y coaguladas son enviadas a un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), donde se separan se terminan de remover las grasas y los sólidos en suspensión. Finalmente, las aguas que emergen del DAF son descargadas en la quebrada Aranzoque.

Figura 3.

Diagrama de generación de aguas residuales por áreas del proceso

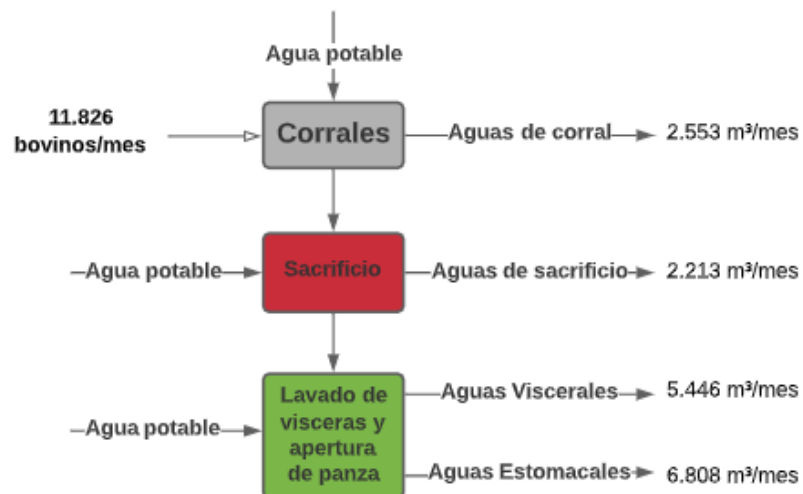
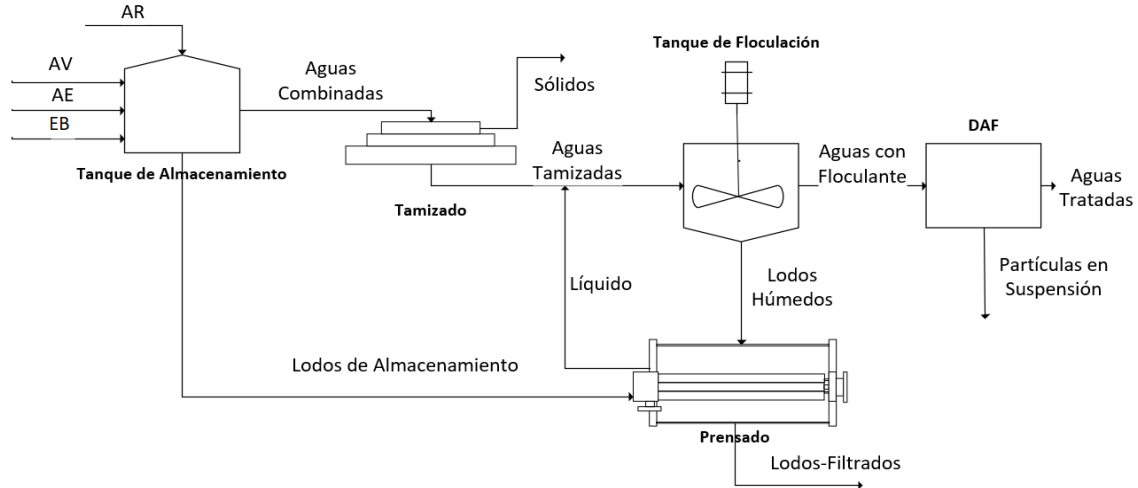


Figura 4.

Diagrama general del proceso de tratamiento de aguas residuales de Colbeef



Se realizó un balance general del proceso en función de la demanda química de oxígeno (DQO), obteniendo los flujos específicos que se tienen en cada una de las corrientes que se encuentran vinculadas directamente en el tratamiento de aguas residuales de la PBB Colbeef como se muestra en la Tabla 5, donde se pudo establecer la cantidad de flujo específico de DQO (13.615,50 kgDQO/mes) que sale en las aguas tratadas del procesos fisicoquímico empleado por la PBB, teniendo que del flujo específico de DQO de aguas combinadas que entran al proceso de tratamiento se reducen aproximadamente 90%. Además, se considera que la cantidad de lodos de almacenamiento que salen del proceso de almacenaje de aguas residuales es baja, por lo cual no son tenidos en cuenta dentro del balance en masa en DQO.

Tabla 5.

Balance de masa en DQO para el tratamiento de aguas residuales en Colbeef

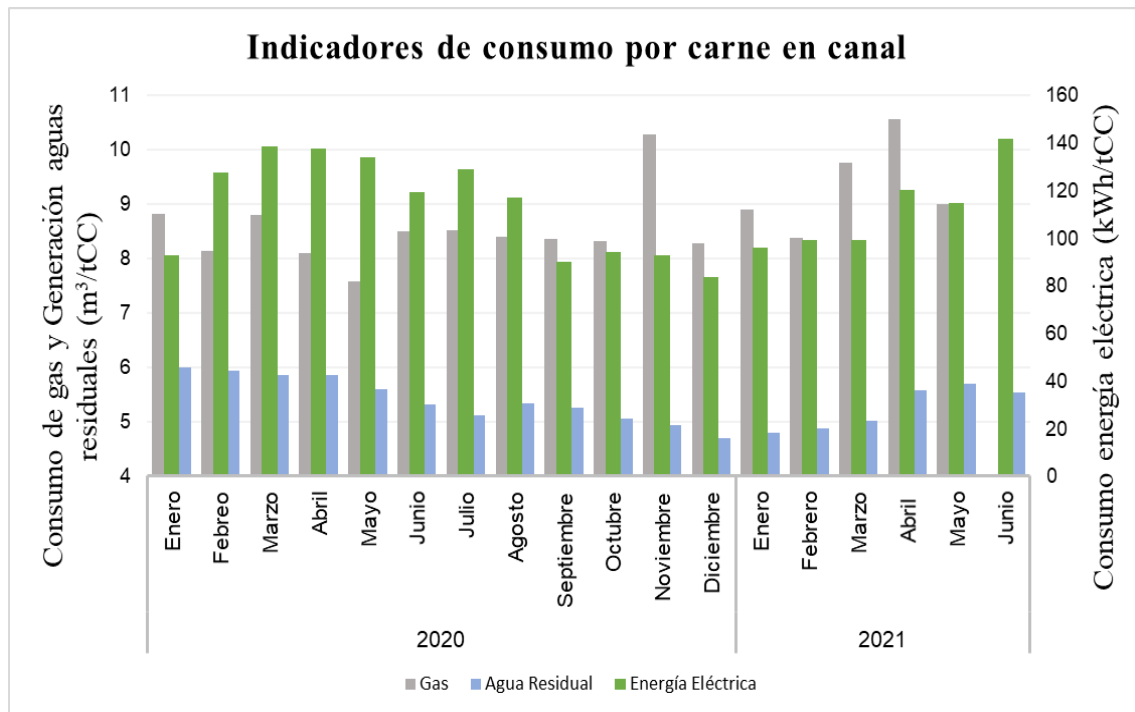
Corriente	Flujo (kg DQO/mes)
AS	20.775,54
AV	53.100,43
AC	2.860,53

AE	56.844,70
Aguas combinadas	133.581,21
Solido	53.249,78
Aguas tamizadas	80.331,43
Lodos húmedos	49.696,56
Aguas floculadas	30.634,87
Partículas en suspensión	17.019,37
Aguas tratadas	13.615,50

El caudal de aguas residuales generadas (m^3/mes), el consumo de energía eléctrica (kWh/mes) y el consumo de gas natural (m^3/mes) fueron normalizados dividiéndolos por las toneladas de carne en canal producidas (tCC/mes). De esta forma se establecieron los indicadores técnicos que se presentan en la Figura 5 en la ventana de tiempo utilizada para el análisis (Enero/2020 – Junio/2021).

Figura 5.

Indicadores de consumo de la PBB Colbeef por tonelada de carne en canal (tCC)



Inicialmente el área metropolitana de Bucaramanga contaba con dos PBB: Colbeef y Vijagual, las cuales prestaban el servicio de beneficio animal al público. Sin embargo, en el mes de agosto del 2020 la PBB Vijagual fue adquirida por la multinacional Athenas Food S.A (Vanguardia, 2020). Esta empresa es una líder de exportación de carne desde América del Sur. En este sentido, la PBB Vijagual dejó de prestar sus servicios al público y se destinó exclusivamente a la exportación de carne por parte de Athenas Food S.A. Por tanto, a partir del mes de septiembre del 2020, Colbeef debió suplir la demanda de sacrificios que inicialmente suplía Vijagual, pasando de un promedio de 8.302 bovinos/mes entre enero/2020 y agostos/2020 a un promedio de 14.645 bovinos/mes entre septiembre/2020 y junio/2021.

Lo anterior se ve reflejado en los indicadores de la Figura 5. Entre enero/2020 y agosto/2020 la generación de aguas residuales fue en promedio $5,62 \text{ m}^3/\text{tCC}$ y posteriormente se redujo un 8,54% a partir del mes de septiembre/2020. Antes de iniciar el proceso de beneficio bovino la planta es sometida a una limpieza. En esta etapa se consume una gran cantidad de agua potable y se generan efluentes que van a parar a la PTAR. Generalmente la etapa de limpieza se realiza durante las mañanas y es un tiempo fijo, independientemente de la cantidad de bovinos sacrificados. Es así como el caudal de aguas residuales durante la limpieza se mantuvo casi constante, reduciendo el indicador de aguas residuales. Así, se determinaron unos promedios de los indicadores de referencia consumo tanto para carne en canal como para los indicadores de referencia de consumo de reses sacrificadas como se muestran en la

Tabla 6.

Tabla 6.*Promedio de indicadores de referencia de consumo de la PBB Colbeef*

Indicadores	Carne en canal			Reses sacrificadas		
	Gas (m ³ /tCC)	Energía eléctrica (kWh/tCC)	Aguas residuales (m ³ /tCC)	Gas (m ³ /res)	Energía eléctrica (kWh/res)	Aguas residuales (m ³ /res)
Colbeef	8,25	112,46	5,36	1,87	25,53	1,22

De ese modo, se realizó una revisión bibliográfica para comparar estos indicadores de referencias con otras plantas en Colombia y otros países. Por ello, en la Tabla 7 se presenta un resumen de indicadores de generación de agua residuales del beneficio bovino en otros países y en un anterior estudio en Colombia.

Tabla 7.*Indicadores de referencia de generación de agua residuales en Colombia y otros países*

País	Generación de Agua Residual [m³/tCC]
Estados Unidos	0,749
Europa	0,538
Alemania	0,251
Colombia	0,258

Fuente: Tomada de (Corantioquia, 2016)

El indicador de generación de aguas residuales de la PBB Colbeef se encuentra fuera del rango reportado a nivel internacional. Igualmente, este indicador se encuentra lejos al reportado anteriormente en Colombia.

Con respecto al indicador de energía eléctrica el cual genera una línea base para el proceso de beneficio, la cual establece que se requieren en promedio 43,16 kWh/tCC (Clara et

., 2016) se puede decir que la PBB Colbeef se encuentra dentro del rango reportado. Por su parte, el indicador del consumo de gas indica el que estable una línea base de referencia de 112,46 kWh/tCC (Clara et al., 2016), se dice que PBB Colbeef está fuera del rango de referencia establecido en otras plantas de beneficio fuera del país.

De esta manera, el consumo de gas en la planta por carne en canal se puede relacionar directamente el aumento de reses sacrificadas, generando un aumento en el requerimiento de gas natural durante el proceso de sacrificio implementado por la planta, por ello a medida que el número de reses sacrificadas aumenta también lo hace el consumo del gas en ColBeef.

Con respecto al agua residual que se genera y comparando los indicadores anteriormente mostrados con los datos suministrados, se tiene el mismo comportamiento que para el gas, debido que a medida que aumenta el número de reses sacrificadas y por ello la carne en canal, también aumenta las aguas residuales obtenidas, esto debido al uso de agua que se necesita para cada etapa y para cada bovino, tanto para limpiarlo por fuera como por dentro así como la limpieza en los corrales, es así como entre mayor cantidad de reses se sacrifican mayor uso de agua se necesita por parte de ColBeef.

En los últimos años ColBeef ha aumentado su capacidad de sacrificio, debido al tipo de clasificación de planta que tiene, es por esto por lo que el actual tratamiento de aguas residuales, anteriormente mencionado y explicado, no ha sido el óptimo para manejar estas grandes cantidades, dado que es costoso (en promedio US\$ 216.000/año).

En ese sentido, se tiene que las plantas de sacrificio a nivel nacional e internacional utilizan un consumo excesivo de agua y cuentan con poco control sobre su uso. De igual forma, la falta de registros del consumo de este recurso no facilita la determinación de la magnitud de los excesos producidos en las plantas de sacrificio con respecto al consumo de agua.

5.2 Etapa 2: Diseño Básico de la Tecnología Anaerobia.

La PBB Colbeef cuenta con un área disponible para el sistema de DA de 1.750 m^2 . Por lo tanto, un cálculo preliminar para un TRH de 18 días indica que el caudal máximo de aguas residuales a tratar corresponde al 10% ($1.701,937 \text{ m}^3/\text{mes}$) del total de la PBB. Para caudales superiores al 10% la cantidad de digestores superaría el área disponible.

Se aplicó un balance de DQO considerando los 10 escenarios de DA presentados en la Tabla 3. La Figura 6 representa gráficamente el proceso de codigestión terciaria del escenario 1, el cual corresponde a una mezcla terciaria de AS:AV:AE en una proporción en %SV de 33:33:34, la Figura 7 corresponde a la digestión de la mezcla binaria de AV:EB en una proporción en %SV de 33:67 y la Figura 8 corresponde al proceso de monodigestión de AE.

Figura 6.

Proceso de codigestión terciaria para el escenario 1

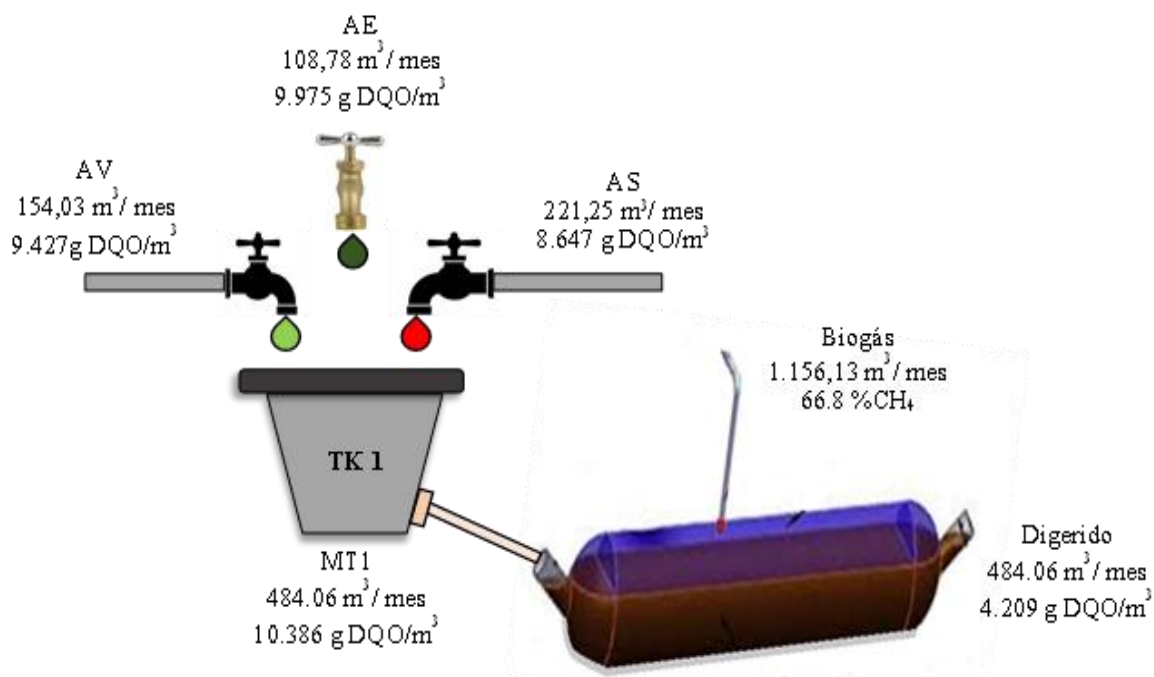
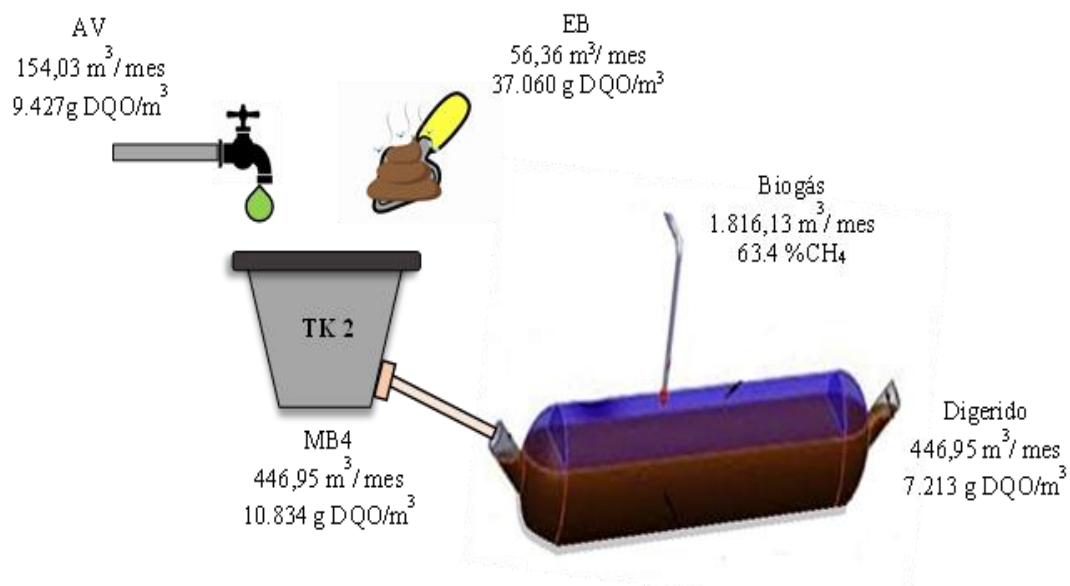
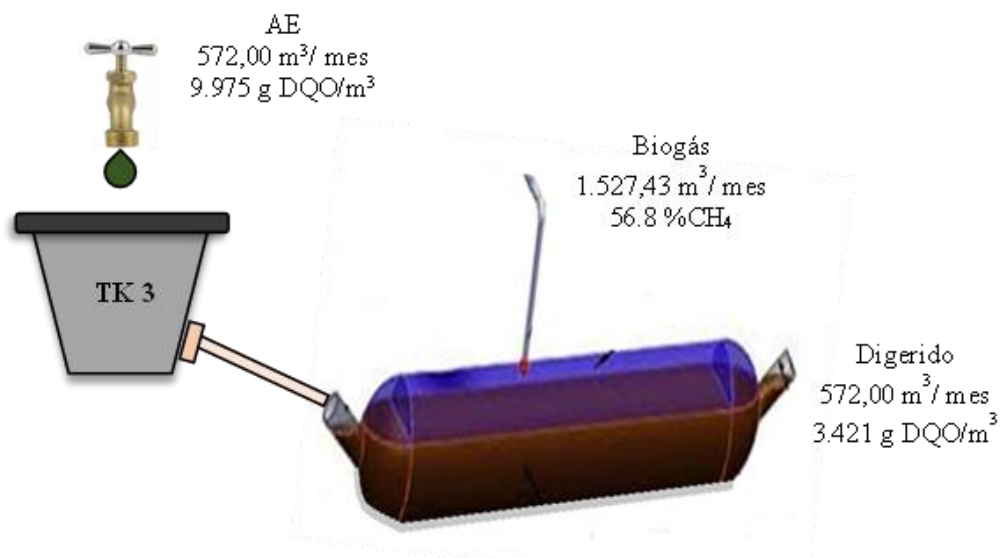


Figura 7.*Proceso de codigestión binaria para el escenario 1***Figura 8.***Proceso de monodigestión para el escenario 1*

Cada dato obtenido se realizó de manera secuencial, esto indica que con lo que ya se obtiene se puede hallar además el volumen de los digestores, para así poder obtener el número de digestores que se va a necesitar para implementar dicha tecnología en el escenario 1, debido que para cada escenario puede variar este número con respecto a el área ocupada de cada uno de estos escenarios, sin llegar a sobrepasar el área disponible que se tiene en la planta de beneficio bovino ColBeef.

En la Tabla 8 se presenta el volumen de digestores y los tanques de almacenamiento requeridos para los tres sistemas de digestión planteados en el escenario 1. El volumen de líquido necesario en cada sistema de digestión se calculó considerando una HRT de 18 días. Además, el volumen necesario en el sistema de digestión se determinó asumiendo un llenado del digestor del 80% (Martí-Herrero & Cipriano, 2012).

Tabla 8.

Volumen total de tratamiento

Proceso de digestión	Volumen de Liq (m ³)	Volumen de Gas (m ³)	Volumen Total (m ³)
Terciario	290,433	72,608	363,041
Binario	268,169	67,042	335,212
Mono	343,200	85,800	429,000
Total	901,803	225,451	1127,253

Al dividir el volumen total necesario para el proceso de DA en los 40 m³ de los digestores comercialmente disponibles, se determinó un requerimiento de 28 digestores, los cuales ocuparían un área de 1.716,8 m², la cual es inferior al área disponible por la PBB Colbeef (1.750 m²).

En la Tabla 9 se resume el volumen total de biogás y CH₄ producido, el potencial de energía térmica, el potencial de energía eléctrica, la capacidad del calentador, la cantidad de calentadores, el número de tanque de almacenamiento, el número de digestores y el número de generadores necesarios para el escenario 1.

Tabla 9.

Resumen de diseño para el escenario 1

Resumen de diseño escenario 1	
Volumen de CH ₄ producido (m ³ /mes)	2.664,023
Volumen de biogás producido (m ³ /mes)	4.499,689
Potencial térmico (kWh/mes)	21.312,182
Potencial eléctrico (kWh/mes)	5.328,045
Capacidad del calentador (m ³ /mes)	1.008
Capacidad del generador eléctrico (m ³ /mes)	3.600
Numero de calentadores	5
Numero de tanques	6
Numero de digestores	28
Numero de generadores	1

De igual forma, se determinó la reducción de DQO para el escenario 1 donde se pudo establecer teniendo en cuenta los datos suministrados por el Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la escuela de Ingeniería Química que se tuvo una reducción del 88% con relación al DQO de entrada, así mismo se pudo establecer el ahorro de cloruro férrico que presenta la PBB Colbeef el cual es de 162 kg/mes aproximadamente, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10.*Remoción de DQO y ahorro de químicos para el escenario 1*

Proceso de digestión	DQO de Entrada (mg/L)	DQO de Salida (mg/L)	Remoción de DQO (mg/L)	Remoción de DQO (kg/día)	Ahorro de cloruro férrico (kg/día)
Terciario	4209,323	4720	510,677	8,240	1,524
Binario	4977,194	4720	-257,194	-3,832	-0,709
Mono	3420,965	4720	1299,035	24,768	4,582
Total	12607,483	14160	1552,517	29,176	5,397

Es así, como en la Tabla 11 se relacionan cada uno de los resultados obtenidos durante el diseño básico realizado a cada uno de los escenarios planteados, teniendo en cuenta las mezclas sinérgicas suministradas por el Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la escuela de Ingeniería Química.

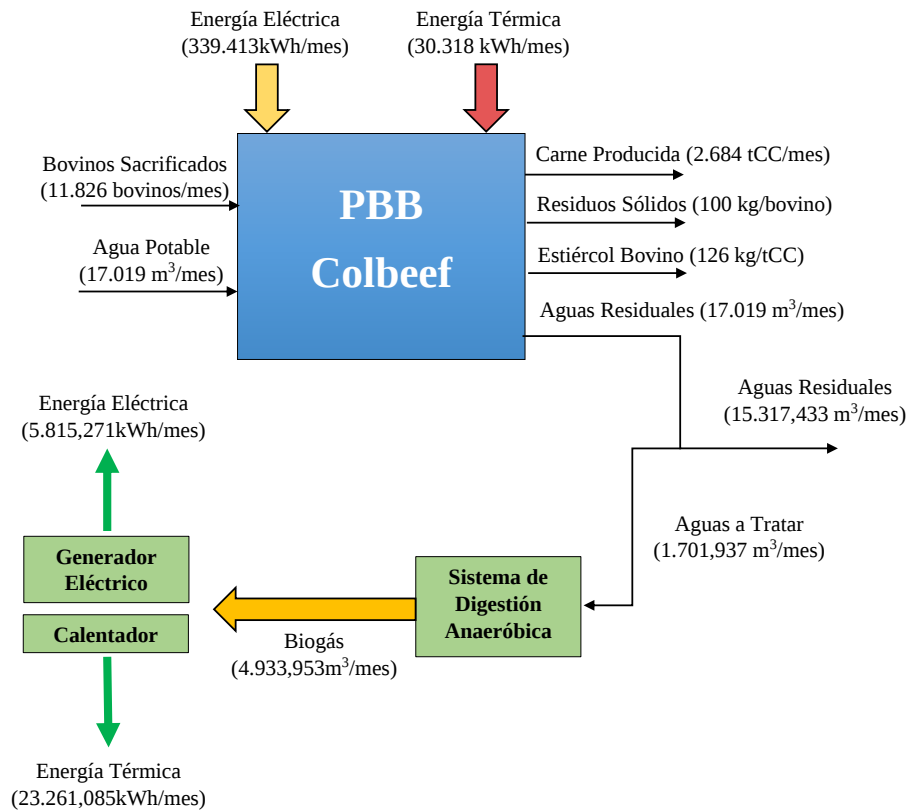
Tabla 11.*Resumen de diseño básico para cada uno de los escenarios planteados*

Variables de Diseño	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8	Esc 9	Esc 10
Volumen de digestor (m³)	1.127,253	1.492,653	1.492,653	1.253,409	1.500,863	1.135,463	1.135,712	1.574,234	1.143,921	1.653,416
Digestores	29	38	37	32	38	29	29	40	29	42
Área ocupada (m²)	1.716,8	2.249,6	2.190,4	1.894,4	2.249,6	1.716,8	1.716,8	2.368	1.716,8	2.486,4
Número de Tanques de almacenamiento	6	7	7	6	7	6	6	7	6	8
Porcentaje de caudal a tratar	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Aguas residuales procesadas (m³)	1.701,937	1.701,937	1.701,937	1.701,937	1.701,937	1.701,937	1.701,937	1.701,937	1.701,937	1.701,937
Flujo de CH₄ (m³/d)	88,801	88,801	88,801	74,870	97,194	97,194	88,082	88,082	96,921	96,921
Biogás producido (m³/d)	149,990	149,990	149,990	125,670	162,606	162,606	152,230	152,230	164,465	164,465
Producción de Energía térmica (kWh/d)	710,406	710,406	710,406	598,961	777,554	777,554	704,653	704,653	775,370	775,370
Producción de Energía eléctrica (kWh/d)	177,602	177,602	177,602	149,740	194,389	194,389	176,163	176,163	193,842	193,842
Calentadores	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5
Generadores	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Remoción de DQO (mg/L)	1.552,517	-683,372	2.723,819	487,931	3.178,507	942,618	3.393,049	1.157,160	2.441,785	205,896
Ahorro de cloruro férrico (kg/d)	5,397	-8,255	8,12	-16,272	9,606	4,216	8,910	-7,474	6,508	-12,527

Así, se relacionaron los resultados de cada una de las variables de diseño establecidas, donde se tiene que la producción de biogás es la variable de mayor importancia técnica dentro del diseño básico del sistema de digestión anaeróbica, ya que de la generación de biogás dependerá el aprovechamiento térmico dentro del proceso de sacrificio en la planta. Por ello, se tiene que los escenarios con mayor producción de biogás dado el diseño son el escenario 1, escenario 6 y escenario 9, con una producción de 149,990 m³/d, 162,606 m³/d y 164,465 m³/d respectivamente.

Así mismo, se estableció el aprovechamiento que generaría cada escenario al ser diseñado, donde se tiene la generación de energía térmica para los escenarios 1, 6, y 9, este sistema de digestión puede producir hasta 710,406 (kWh/d), 777,554 (kWh/d) y 775,370 (kWh/d) y una generación de energía eléctrica de 177,602 (kWh/d), 194,389 (kWh/d) y 193,842 (kWh/d) respectivamente, donde se tiene que el escenario 9 presenta un mayor aprovechamiento de energía térmica y energía eléctrica generada a través de la implementación de la tecnología anaeróbica, que se terminara convirtiendo en beneficio para la planta de beneficio bovino Colbeef, lo que demuestra la eficacia técnica del sistema propuesto para el aprovechamiento de las aguas residuales generadas en el proceso de sacrificio de la planta.

Teniendo en cuenta, el resultado de cada escenario se escogió el escenario número 9 debido a sus características que son las que mejor comportamiento presentan, así mismo, cuenta con la mayor disponibilidad de generación de energía térmica y eléctrica, siendo así se presenta en la Figura 9 el diagrama del balance global de la planta de beneficio bovino Colbeef con la implementación del sistema de digestión anaeróbica en la misma.

Figura 9. Diagrama global de la PBB Colbeef con la tecnología anaerobia

5.3 Etapa 3: Evaluación Económica de la Tecnología Anaerobia

Luego de realizar las comparaciones de las variables de diseño para cada escenario, se realiza un análisis económico de los 10 escenarios que se tomaron anteriormente, esto con el fin de seleccionar el escenario con mayor beneficio económico para la PBB Colbeef. Para ello se debe tener en cuenta la inversión inicial, donde se establecen los costos de equipos y los costos por la obra civil relacionada con el aprovechamiento que se le vaya a dar al biogás producido, ya sea en la generación de energía eléctrica o térmica como se muestran en la Tabla 12 y Tabla 13 respectivamente.

Tabla 12.

Inversión inicial (CAPEX) para el aprovechamiento del biogás en la generación de energía eléctrica

Esc	Digestores	Tanques de almacenamiento	Generador de energía eléctrica	Obra Civil	Tubería y Accesorios	Total
1	\$ 333.500.000	\$ 67.817.400	\$ 33.395.251	\$ 9.860.000	\$ 6.462.167	\$ 451.034.818
2	\$ 437.000.000	\$ 79.120.300	\$ 33.395.251	\$ 12.920.000	\$ 8.467.667	\$ 570.903.218
3	\$ 437.000.000	\$ 79.120.300	\$ 33.395.251	\$ 12.920.000	\$ 8.467.667	\$ 570.903.218
4	\$ 368.000.000	\$ 67.817.400	\$ 33.395.251	\$ 10.880.000	\$ 7.130.667	\$ 487.223.318
5	\$ 431.498.089	\$ 79.120.300	\$ 33.395.251	\$ 12.757.335	\$ 8.361.057	\$ 565.132.032
6	\$ 333.500.000	\$ 67.817.400	\$ 33.395.251	\$ 9.860.000	\$ 6.462.167	\$ 451.034.818
7	\$ 333.500.000	\$ 67.817.400	\$ 33.395.251	\$ 9.860.000	\$ 6.462.167	\$ 451.034.818
8	\$ 460.000.000	\$ 79.120.300	\$ 33.395.251	\$ 13.600.000	\$ 8.913.333	\$ 595.028.884
9	\$ 328.877.427	\$ 67.817.400	\$ 33.395.251	\$ 9.723.333	\$ 6.372.596	\$ 446.186.007
10	\$ 483.000.000	\$ 90.423.200	\$ 33.395.251	\$ 14.280.000	\$ 9.359.000	\$ 630.457.451

Tabla 13.

Inversión inicial (CAPEX) para el aprovechamiento del biogás en la generación de energía térmica

Esc	Digestores	Calentador	Tanques de almacenamiento	Obra Civil	Tubería y Accesorios	Total
1	\$ 333.500.000	\$ 17.500.000	\$ 67.817.400	\$ 9.860.000	\$ 6.462.167	\$ 435.139.567
2	\$ 437.000.000	\$ 17.500.000	\$ 79.120.300	\$ 12.920.000	\$ 8.467.667	\$ 555.007.967
3	\$ 437.000.000	\$ 17.500.000	\$ 79.120.300	\$ 12.920.000	\$ 8.467.667	\$ 555.007.967
4	\$ 368.000.000	\$ 14.000.000	\$ 67.817.400	\$ 10.880.000	\$ 7.130.667	\$ 467.828.067
5	\$ 431.498.089	\$ 17.500.000	\$ 79.120.300	\$ 12.757.335	\$ 8.361.057	\$ 549.236.781
6	\$ 333.500.000	\$ 17.500.000	\$ 67.817.400	\$ 9.860.000	\$ 6.462.167	\$ 435.139.567
7	\$ 333.500.000	\$ 17.500.000	\$ 67.817.400	\$ 9.860.000	\$ 6.462.167	\$ 435.139.567
8	\$ 460.000.000	\$ 17.500.000	\$ 79.120.300	\$ 13.600.000	\$ 8.913.333	\$ 579.133.633
9	\$ 328.877.427	\$ 17.500.000	\$ 67.817.400	\$ 9.723.333	\$ 6.372.596	\$ 430.290.756
10	\$ 483.000.000	\$ 17.500.000	\$ 90.423.200	\$ 14.280.000	\$ 9.359.000	\$ 614.562.200

En este análisis económico se tienen en cuenta dos definiciones muy importantes en cuanto a los gastos que se van a realizar, el CAPEX, el cual se define como el gasto de capital e incluye las inversiones necesarias para la construcción de la planta con implementación de dicha tecnología, por lo cual se tuvieron en cuenta los datos relacionados en la Tabla 12 y la Tabla 13, que muestran el valor de inversión inicial (CAPEX) para cada uno de los escenarios planteados, donde se puede observar que el escenario 9 presenta la menor inversión inicial en ambos casos de aprovechamiento de biogás planteados.

El OPEX, que se entienden como los gastos operacionales donde se incluyen todos los gastos relacionados al mantenimiento de la planta y el salario de operario (Infraestructura, 2011) y de esa manera se obtuvieron los gastos anuales del OPEX. De igual forma, el valor del mantenimiento de la planta variara dependiendo del aprovechamiento que se le dé al biogás producido, teniendo un costo de mantenimiento de COP\$ 667.905 para la generación de energía eléctrica y COP\$ 350.000 para la generación de energía térmica dentro de la PBB Colbeef como se muestra en la Tabla 14 con una proyección a 15 años.

Tabla 14.*Costo de operación (OPEX) a 15 años de proyección*

Año	Energía Eléctrica	Energía Térmica
1	\$ 17.261.224	\$ 16.943.319
2	\$ 18.309.771	\$ 17.991.866
3	\$ 19.424.576	\$ 19.106.671
4	\$ 20.609.827	\$ 20.291.922
5	\$ 21.869.976	\$ 21.552.071
6	\$ 23.209.754	\$ 22.891.849
7	\$ 24.634.194	\$ 24.316.289
8	\$ 26.148.645	\$ 25.830.740
9	\$ 27.758.796	\$ 27.440.891
10	\$ 29.470.694	\$ 29.152.789
11	\$ 31.290.769	\$ 30.972.864
12	\$ 33.225.855	\$ 32.907.950
13	\$ 35.283.222	\$ 34.965.317
14	\$ 37.470.595	\$ 37.152.690
15	\$ 39.796.191	\$ 39.478.286

Tabla 15.*Resumen de análisis económico para el escenario 1 en el aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica*

Año	Precio Cloruro Férrico	Ahorro Tratamiento de Aguas	Precio Energía Eléctrica	Ahorro Energía Eléctrica	Ingresos Totales	Salario Operario	OPEX	Costo	Beneficio	Acumulado
0										-\$ 451.034.817,67
1	\$ 1.393	\$40.329.148,53	\$ 597	\$50.588.091	\$ 90.917.240,00	\$16.593.319	\$17.261.224	\$17.261.224	\$73.656.016,12	-\$ 377.378.801,55
2	\$ 1.453	\$40.444.678,57	\$ 622	\$52.747.079	\$ 93.191.757,37	\$17.641.866	\$18.309.771	\$ 18.309.771	\$ 74.881.986,58	-\$ 302.496.814,97
3	\$ 1.515	\$40.565.139,17	\$ 649	\$54.998.207	\$ 95.563.346,07	\$18.756.671	\$19.424.576	\$ 19.424.576	\$ 76.138.769,75	-\$ 226.358.045,22
4	\$ 1.579	\$40.690.740,76	\$ 676	\$57.345.408	\$ 98.036.148,92	\$19.941.922	\$20.609.827	\$ 20.609.827	\$ 77.426.321,48	-\$ 148.931.723,73
5	\$ 1.647	\$40.821.702,75	\$ 705	\$59.792.783	\$100.614.485,49	\$21.202.071	\$21.869.976	\$ 21.869.976	\$ 78.744.509,85	-\$ 70.187.213,88
6	\$ 1.717	\$40.958.253,90	\$ 735	\$62.344.606	\$103.302.859,74	\$22.541.849	\$23.209.754	\$ 23.209.754	\$ 80.093.105,98	\$ 9.905.892,10
7	\$ 1.790	\$41.100.632,76	\$ 767	\$65.005.335	\$106.105.967,83	\$23.966.289	\$24.634.194	\$ 24.634.194	\$ 81.471.774,16	\$ 91.377.666,26
8	\$ 1.867	\$41.249.088,02	\$ 799	\$67.779.618	\$109.028.706,34	\$25.480.740	\$26.148.645	\$ 26.148.645	\$ 82.880.061,10	\$ 174.257.727,36
9	\$ 1.946	\$41.403.879,03	\$ 834	\$70.672.302	\$112.076.180,84	\$27.090.891	\$27.758.796	\$ 27.758.796	\$ 84.317.384,46	\$ 258.575.111,82
10	\$ 2.029	\$41.565.276,18	\$ 869	\$73.688.439	\$115.253.714,78	\$28.802.789	\$29.470.694	\$ 29.470.694	\$ 85.783.020,34	\$ 344.358.132,16
11	\$ 2.116	\$41.733.561,39	\$ 906	\$76.833.297	\$118.566.858,80	\$30.622.864	\$31.290.769	\$ 31.290.769	\$ 87.276.089,92	\$ 431.634.222,08
12	\$ 2.206	\$41.909.028,65	\$ 945	\$80.112.372	\$122.021.400,45	\$32.557.950	\$33.225.855	\$ 33.225.855	\$ 88.795.544,96	\$ 520.429.767,04
13	\$ 2.300	\$42.091.984,46	\$ 985	\$83.531.390	\$125.623.374,26	\$34.615.317	\$35.283.222	\$ 35.283.222	\$ 90.340.152,28	\$ 610.769.919,32
14	\$ 2.399	\$42.282.748,41	\$ 1.027	\$87.096.324	\$129.379.072,30	\$36.802.690	\$37.470.595	\$ 37.470.595	\$ 91.908.476,98	\$ 702.678.396,30
15	\$ 2.501	\$42.481.653,75	\$ 1.071	\$90.813.401	\$133.295.055,20	\$39.128.286	\$39.796.191	\$ 39.796.191	\$ 93.498.864,42	\$ 796.177.260,72

Tabla 16.*Resumen de análisis económico para el escenario 1 en el aprovechamiento del biogás para la generación de energía térmica*

Año	Precio Gas Natural	Ahorro de Gas	Precio Cloruro Férrico	Ahorro Tratamiento de Aguas	Ingresos Totales	Salario Operario	OPEX	Costo	Beneficio	Acumulado
0										-\$ 435.139.566,67
1	\$ 1.562	\$ 50.614.153	\$ 1.393	\$40.329.148,53	\$90.943.301,20	\$ 16.593.319	\$ 16.943.319	\$ 16.943.319	\$ 73.999.982,34	-\$ 361.139.584,33
2	\$ 1.629	\$ 52.774.252	\$ 1.453	\$40.444.678,57	\$93.218.930,80	\$ 17.641.866	\$ 17.991.866	\$ 17.991.866	\$ 75.227.065,03	-\$ 285.912.519,30
3	\$ 1.698	\$ 55.026.540	\$ 1.515	\$40.565.139,17	\$95.591.679,21	\$ 18.756.671	\$ 19.106.671	\$ 19.106.671	\$ 76.485.007,90	-\$ 209.427.511,40
4	\$ 1.771	\$ 57.374.950	\$ 1.579	\$40.690.740,76	\$98.065.691,24	\$ 19.941.922	\$ 20.291.922	\$ 20.291.922	\$ 77.773.768,83	-\$ 131.653.742,57
5	\$ 1.847	\$ 59.823.586	\$ 1.647	\$40.821.702,75	\$100.645.288,62	\$ 21.202.071	\$ 21.552.071	\$ 21.552.071	\$ 79.093.218,00	-\$ 52.560.524,57
6	\$ 1.925	\$ 62.376.724	\$ 1.717	\$40.958.253,90	\$103.334.977,48	\$ 22.541.849	\$ 22.891.849	\$ 22.891.849	\$ 80.443.128,74	\$ 27.882.604,16
7	\$ 2.008	\$ 65.038.824	\$ 1.790	\$41.100.632,76	\$106.139.456,28	\$ 23.966.289	\$ 24.316.289	\$ 24.316.289	\$ 81.823.167,63	\$ 109.705.771,79
8	\$ 2.093	\$ 67.814.536	\$ 1.867	\$41.249.088,02	\$109.063.624,00	\$ 25.480.740	\$ 25.830.740	\$ 25.830.740	\$ 83.232.883,78	\$ 192.938.655,57
9	\$ 2.183	\$ 70.708.710	\$ 1.946	\$41.403.879,03	\$112.112.588,71	\$ 27.090.891	\$ 27.440.891	\$ 27.440.891	\$ 84.671.697,35	\$ 277.610.352,92
10	\$ 2.276	\$ 73.726.400	\$ 2.029	\$41.565.276,18	\$115.291.676,45	\$ 28.802.789	\$ 29.152.789	\$ 29.152.789	\$ 86.138.887,04	\$ 363.749.239,96
11	\$ 2.373	\$ 76.872.879	\$ 2.116	\$41.733.561,39	\$118.606.440,60	\$ 30.622.864	\$ 30.972.864	\$ 30.972.864	\$ 87.633.576,74	\$ 451.382.816,70
12	\$ 2.474	\$ 80.153.643	\$ 2.206	\$41.909.028,65	\$122.062.671,51	\$ 32.557.950	\$ 32.907.950	\$ 32.907.950	\$ 89.154.721,04	\$ 540.537.537,74
13	\$ 2.580	\$ 83.574.422	\$ 2.300	\$42.091.984,46	\$125.666.406,67	\$ 34.615.317	\$ 34.965.317	\$ 34.965.317	\$ 90.701.089,72	\$ 631.238.627,46
14	\$ 2.690	\$ 87.141.193	\$ 2.399	\$42.282.748,41	\$129.423.941,25	\$ 36.802.690	\$ 37.152.690	\$ 37.152.690	\$ 92.271.250,95	\$ 723.509.878,41
15	\$ 2.805	\$ 90.860.185	\$ 2.501	\$42.481.653,75	\$133.341.839,05	\$ 39.128.286	\$ 39.478.286	\$ 39.478.286	\$ 93.863.553,29	\$ 817.373.431,70

Es así como de esta manera se realiza un análisis económico donde se obtienen datos para el uso de biogás dentro de los escenarios para la generación de energía eléctrica o gas natural, donde se encontró la que mejor viabilidad obtuvo con indicadores como los ingresos totales por año, los costos anuales desde la implementación de dicha tecnología, datos de ahorro de energía eléctrica o de gas natural según corresponda ya que dicha tecnología puede abastecer un porcentaje de energía eléctrica o de gas natural. Finalmente se obtienen los beneficios de la planta al utilizar biodigestores dependiendo de cada escenario y en una proyección de 15 años. En la Tabla 15 y Tabla 16 se evidencia la inversión inicial que se debe realizar para cada escenario, además de esto se muestra la TIR, que es la tasa interna de retorno en donde se obtiene la rentabilidad de una inversión. Además, se obtiene el PRI que es el periodo de recuperación de la inversión que se establece en años para este caso y finalmente se evidencia el VNA denominado como valor actual neto con el cual se puede conocer cuánto se va a ganar o se va a perder con la inversión. Todos estos indicadores de evaluación anteriormente mencionados son para un periodo de proyección de 15 años y son necesarios para realizar un análisis económico y poder conocer que tan beneficioso es o no el proyecto para cada escenario dentro de la generación de energía eléctrica o de gas natural.

Figura 10.

Resumen de indicadores económicos para cada uno de los escenarios planteados para la generación de energía eléctrica

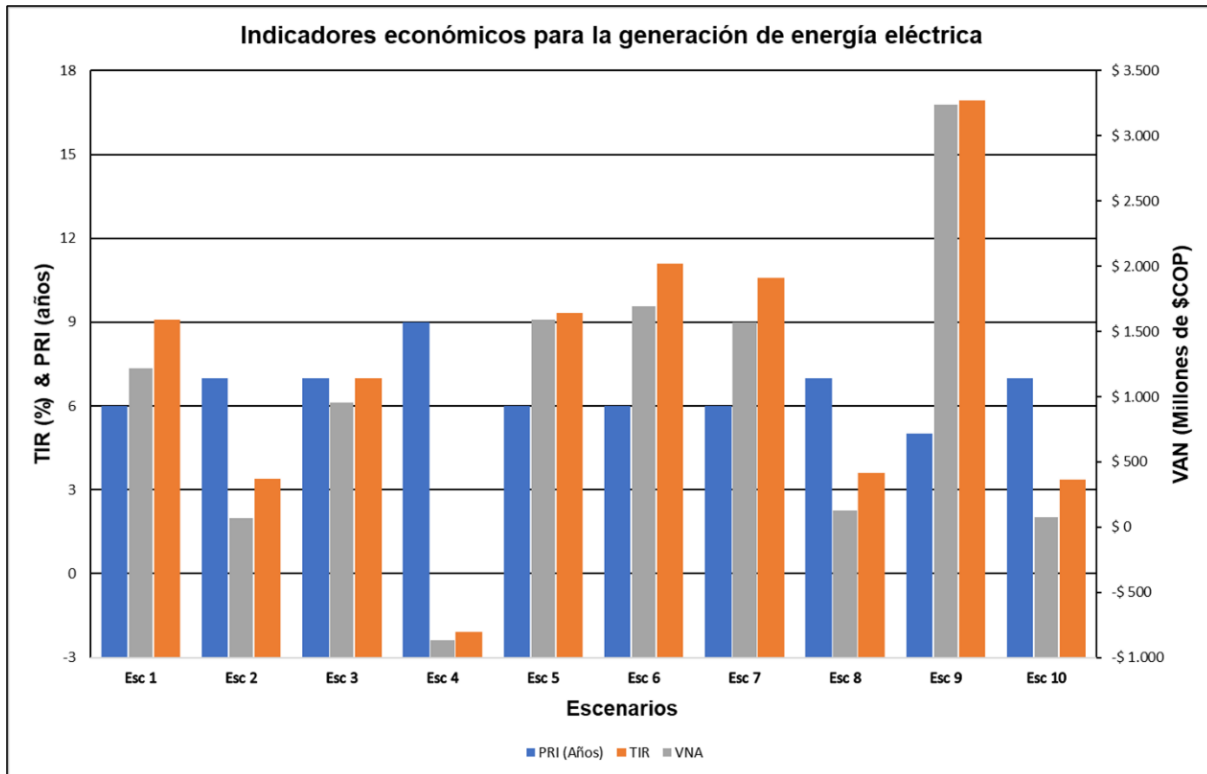
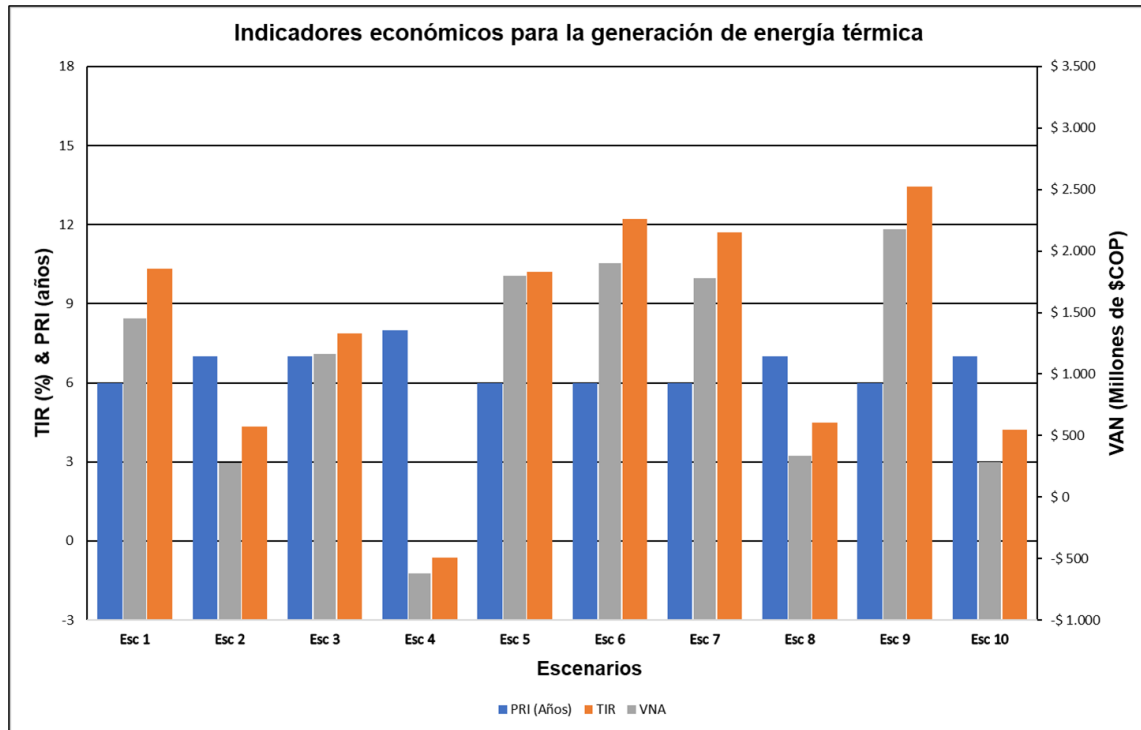


Figura 11.

Resumen de indicadores económicos para cada uno de los escenarios planteados para la generación de energía térmica



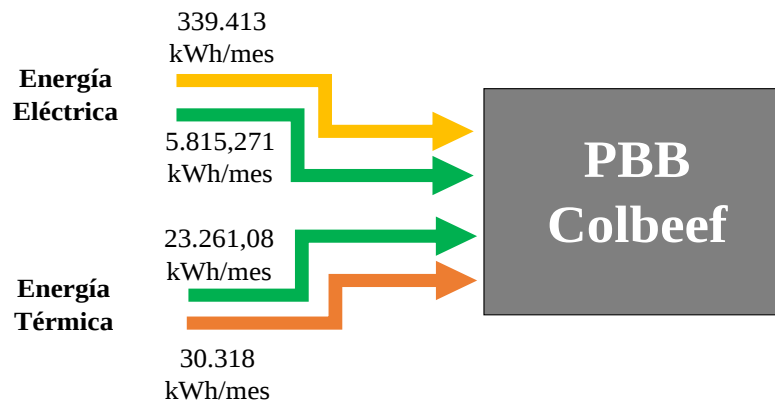
Según los datos obtenidos se puede notar que el escenario con mejores indicadores económicos es el número 9 para generación de energía eléctrica y para generación de energía térmica, este escenario tiene los mejores indicadores económicos, donde presenta una tasa interna de retorno que permitirá a la PBB Colbeef después de la implementación de la tecnología anaerobia recibir un retorno a la inversión inicial del 16,93% y 13,43% anual respectivamente, lo que permitirá a la PBB tener un retorno de inversión en 5 y 6 años respectivamente e iniciar a presentar beneficios económicos al proyecto desde el año 1 para ambos escenarios. Finalmente, el valor actual neto es mayor a la inversión inicial tanto para

energía eléctrica como para energía térmica con una proyección a 15 años, lo que demuestra la viabilidad del proyecto de inversión bajo las condiciones técnicas y económicas estipuladas.

Con la relación al Diagrama global de la PBB Colbeef con implementación de tecnología anaerobia presentado en la Figura 9, se plantea un diseño básico para la planta donde se relacionan las características de diseño de cada equipo implementado en el proceso de implementación de la tecnología anaerobia, donde para el mejor escenario planteado (escenario 9), se pudo obtener un beneficio a través del aprovechamiento de la energía producida por medio del retorno de la energía producida de 5.815,271 kWh/mes en consumo de energía eléctrica y de 23.261,085 kWh/mes en consumo de energía térmica, por lo que la empresa solo requeriría consumir de las empresas prestadoras del servicio de gas natural y energía eléctrica 333.597,729 kWh/mes y 7.056,915 kWh/mes respectivamente; para el caso del consumo de gas natural representa el consumo de 2.926,916 m³, teniendo en cuenta la relación de conversión de biogás a gas natural, la cual cuenta con una cantidad equivalente de 0,6 m³ por cada 1 m³ de biogás generado (Moncayo-Romero, 2017). Como se representa en la figura 8, donde las líneas verdes representan la energía producida mediante la implementación de la tecnología anaeróbica.

Figura 12.

Relación entre la energía que consume y el potencial de energía generada para la PBB Colbeef



De lo anterior antes definido, el diagrama general de la Planta de Beneficio Bovino Colbeef, se muestra en la Figura 12, donde se propone el diseño de los equipos involucrados en la implementación del sistema de digestión anaerobia relacionados en la Tabla 17.

Tabla 17.

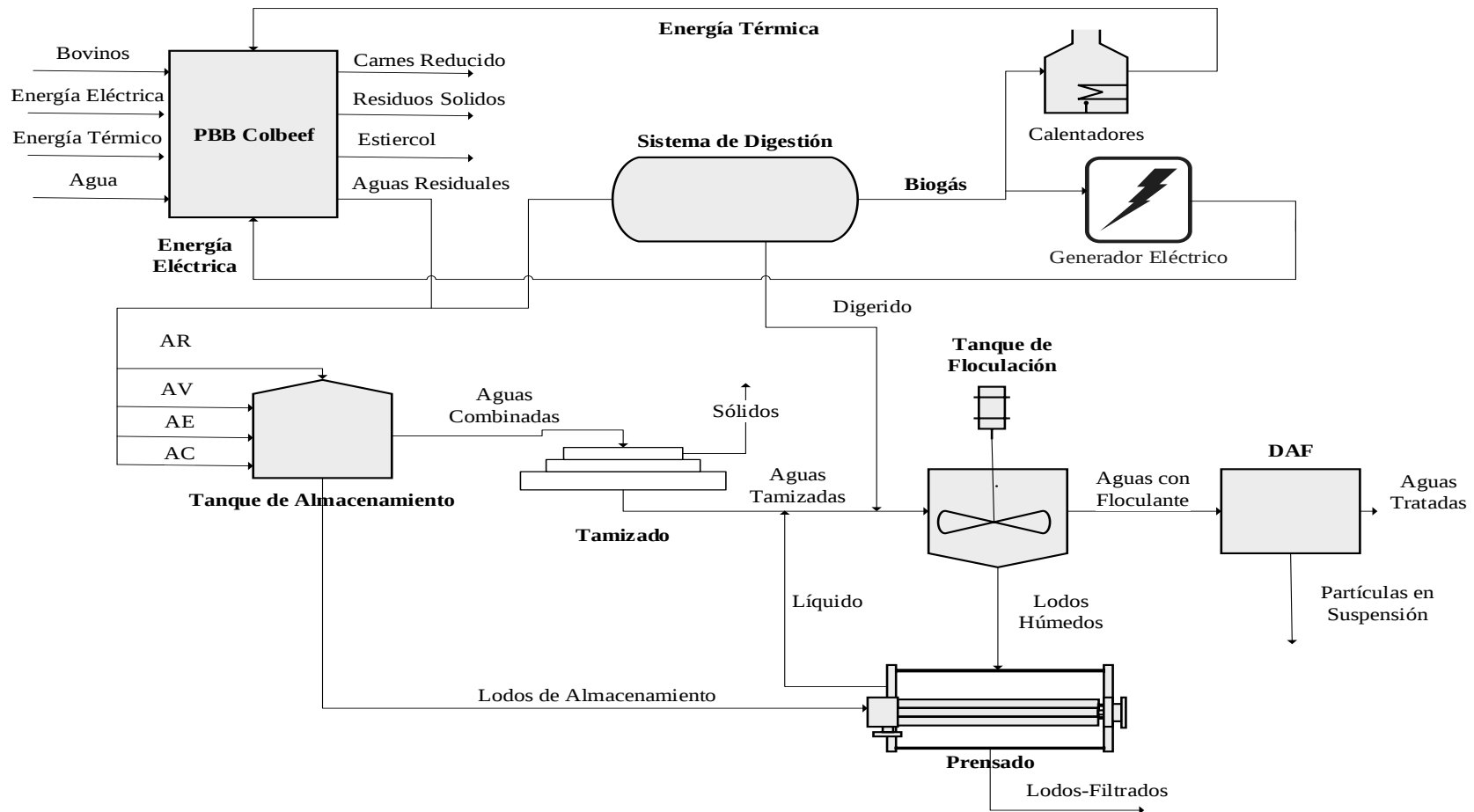
Especificaciones de los equipos requeridos para el aprovechamiento del biogás generado

	Digestores	Calentadores	Generadores de energía eléctrica	Tanque de Almacenamiento
Volumen (m ³)	40	-	-	10
Área (m ²)	35,2	-	-	-
Potencia (kW)	-	92	10	-

La determinación de estas variables de diseño, estuvieron sujetas a la disponibilidad de información que permitirá el desarrollo del análisis económico del proyecto, por el cual se realizaron cotizaciones de los equipos requeridos por medio de la PBB Colbeef.

Figura 13.

Diagrama global de la PBB Colbeef y el tratamiento de las aguas residuales



6. Conclusiones

La planta de beneficio bovino ColBeef actualmente tiene un proceso de tratamiento de aguas fisicoquímico para lograr alcanzar la normativa ambiental, donde la implementación de CoDA en la PBB permite una remoción de 17,40% superior a la remoción del proceso de tratamiento actual antes del tanque de floculación que tiene una remoción de 39,87%. En promedio el costo del tratamiento de dichas aguas es elevado de aproximadamente COP\$ 650.000.000 al año. Es por ello, que se compararon los indicadores de consumo de ColBeef con respecto a los indicadores de otras plantas de beneficio bovino tanto nacionales como internacionales, donde se concluyó que los indicadores de gas natural se encuentran por debajo, lo que significa que Colbeef se encuentra dentro de los parámetros globales, pero por otra parte dentro del consumo de energía eléctrica y consumo de aguas residuales. ColBeef se encuentran muy por encima del margen de comportamiento de indicadores de referencia de consumo servicios industriales dentro de las de plantas de beneficio bovino consultados en la bibliografía.

De igual forma, se establecieron 10 escenarios con las mezclas sinérgicas tomadas del estudio de Sánchez et al. (2021), realizando una comparación de cada uno de ellos dentro del diseño básico para la implementación de dicha tecnología dentro de la PBB ColBeef, teniendo en cuenta el número de digestores que se van a usar para cada escenario, así como número de tanques de almacenamiento, datos como el flujo de producción de metano, y biogás con los cuales se obtuvo la producción de energía térmica y eléctrica. Donde se eligió el escenario más optimo a nivel de diseño para la implementación de la tecnología anaerobia en ColBeef tanto para generación de energía eléctrica como para energía térmica, donde se obtuvo que la mezcla binaria compuesta por aguas de sacrificio en un 33% y aguas estomacales en un 67%,

junto con la mezcla binaria compuesta por aguas viscerales en un 33% y estiércol bovino en un 67% y la monodigestión de las aguas estomacales en un 100%, las cuales generan el escenario 9, siendo el escenario que mejor rendimiento técnico presenta, debido a que es el que requiere menor inversión y tomando en cuenta datos de producción tanto de energía eléctrica (5.815,271 kWh/mes) como de energía térmica (23.261,085 kWh/mes), y la producción de metano en el escenario 9 (96,921 m³/día), además de esto es el escenario que mayor VNA presenta, siendo el indicador más importante dentro de los análisis económicos de diferentes proyectos para elegir entre diferentes opciones de escenarios. Es así como se considera este el escenario óptimo dentro de todos los escenarios evaluados en el en el proyecto de evaluación técnica – económica de la implementación de la tecnología anaerobia en la PBB Colbeef.

Además, se realizó análisis económico a cada uno de los escenarios planteados durante la ejecución del proyecto mediante la anualización del CAPEX y del OPEX con los ingresos totales y los costos de cada año en una proyección de 15 años. Siguiendo la metodología aplicada se pudieron determinar los indicadores económicos (La tasa interna de retorno, el tiempo de recuperación de la inversión y el valor actual neto), donde se tuvo como resultado que el escenario óptimo condiciones económicas es el escenario 9 tanto para producción de energía eléctrica como para energía térmica, con una tasa interna de retorno del 16,93% y 13,43%, un periodo de recuperación de inversión de 5 y 6 años y un valor actual neto de COP\$3.238.960.098,33 y 2.179.561.029,20 respectivamente, lo cual va de la mano de la definición técnica obtenida para este escenario. Con respecto a la tasa interna de retorno del escenario 9 para producción de energía eléctrica y energía térmica es óptima, esto demuestra que el proyecto es rentable, además de esto, aunque el tiempo de recuperación de la inversión

es más alto de lo normal, es el indicado con referencia a lo que se espera de una inversión ideal que es un tiempo no mayor de los 21 meses. La implementación de la tecnología anaerobia para el tratamiento de un porcentaje de las aguas residuales en la PBB Colbeef es rentable debido a los diferentes datos y análisis económicos que se presentan anteriormente, la planta presenta beneficios desde el año 1 y genera un ahorro del consumo de energía térmica mediante el uso de la energía técnica producida a partir del biogás generado en el proceso, el cual se significa en una reducción de costos de producción y un aumento en la rentabilidad de la planta. Así mismo, se tiene que la implementación de la tecnología anaerobia solventa la problemática del incumplimiento a la normatividad planteada para el vertimiento de las aguas residuales en Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, L., Abreu, O., & Cristina, M. (2005). *Redalyc.La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I.*
- Afazeli, H., Jafari, A., Rafiee, S., & Nosrati, M. (2014). An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 7. [://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.016](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.016)
- Ali, M. M., Ndongo, M., Bilal, B., Yetilmezsoy, K., Youm, I., & Bahramian, M. (2020). Mapping of biogas production potential from livestock manures and slaughterhouse waste: A case study for African countries. *Journal of Cleaner Production*, 256. [://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120499](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120499)
- Boldrin, A., Baral, K. R., Fitamo, T., Vazifehkhoran, A. H., Jensen, I. G., Kjærgaard, I., Lyng, K. A., van Nguyen, Q., Nielsen, L. S., & Triolo, J. M. (2016). Optimised biogas production from the co-digestion of sugar beet with pig slurry: Integrating energy, GHG and economic accounting. *Energy*, 112(2016), 606–617. [://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.068](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.068)
- Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of Environmental Management*, 161, 16. [://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.008](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.008)
- Caixeta, C. E. ., Cammarota, M. C., & Alcina M.F, X. (2002). Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor. *Bioresource Technology*, 81, 9.
- Clara, V., Clara, S., & Clara, V. (2016). Analysis of the Beef Life Cycle of Chichí Padrón Slaughterhouse. *Centro Azúcar*, 43(3), 84–93.

- Contextoganadero. (2015). *Así clasifica el Invima los frigoríficos en Colombia*. Ganadero.
- Corantioquia. (2016). *Manual de Producción y Consumo Sostenible Gestión del Recurso Hidrico Plantas de Beneficio Animal*. 76.
- Cruz, L., & Caceres, A. (2021). SOPORTE A LA IMPLEMENTACIÓN DE UN GENERADOR ELÉCTRICO DE BIOGÁS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RSO DE LA PLAZA DE MERCADO DE FUSAGASUGÁ. *Nuevos Sistemas de Comunicación e Información*, 2013–2015.
- DANE. (2021). *Encuesta de Sacrificio de Ganado*.
- Fedegan. (2020a). Cifras de referencia del sector ganadero colombiano. *Fedegan*, 86.
- Fedegan. (2020b). *Producción*. Fedegan.
- Gomez, A. (2014). II. Estudio Técnico. *Facultad De Economía Unam*, 54(Capítulo III), 41. [://www.economia.unam.mx/secss/docs/tesisfe/cap2a.pdf](http://www.economia.unam.mx/secss/docs/tesisfe/cap2a.pdf)
- González-González, A., Collares-Pereira, M., Cuadros, F., & Fartaria, T. (2014). Energy self-sufficiency through hybridization of biogas and photovoltaic solar energy: An application for an Iberian pig slaughterhouse. *Journal of Cleaner Production*, 65, 6. [://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.021](http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.021)
- González Dorta, D. (2018). *Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de un fluido de alta temperatura*. 36–41. [://oa.upm.es/51986/1/TFG_DAVINIA_GONZALEZ_DORTA.pdf](http://oa.upm.es/51986/1/TFG_DAVINIA_GONZALEZ_DORTA.pdf)
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(9), 6. [://doi.org/10.1073/pnas.1109936109](http://doi.org/10.1073/pnas.1109936109)
- Infraestructura, A. N. . (2011). Página Web 1 de 17. *Agencia Nacional de Infraestructura*, 1, 1–17.

- Martí-Herrero, J., Alvarez, R., & Flores, T. (2018). Evaluation of the low technology tubular digesters in the production of biogas from slaughterhouse wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 199, 10. ://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.148
- Martí-Herrero, J., & Cipriano, J. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology*, 108, 7. ://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.117
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *D1-Res_631_Marz_2015.Pdf* (p. 62).
- Moncayo-Romero, G. (2017). Estudio del Biogas en biodigestores. *Aqualimpia Engineering E.K*, 11. .aqualimpia.de
- Moreda, I. L. (2016). The potential of biogas production in Uruguay. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 12. ://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.099
- No, C. (2021). *Código : A206PR08F03 AUTORIZACIÓN DE PAGO DE CONTRATOS DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS PROFESIONALES / APOYO A LA GESTIÓN Y DOCUMENTO EQUIVALENTE Versión : 01 Fecha : 2021-04-29 pagos y aportes al Sistema de Seguridad Social) y por lo tanto autorizo el trámit.* 768.
- OCDE/FAO. (2020). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2020-2029.* ://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2020-2029_a0848ac0-es
- Ortner, M., Wöss, D., Schumergruber, A., Pröll, T., & Fuchs, W. (2015). Energy self-supply of large abattoir by sustainable waste utilization based on anaerobic mono-digestion. *Applied Energy*, 143(2015), 12. ://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.039
- Osejo, D. (2017). *DISEÑO DE UNA CALDERA DE GENERACIÓN DE VAPOR PIRO TUBULAR DE 10 BHP EXPANDIBLE A 25 BHP MEDIANTE MÓDULOS.* 93(I), 259.
- Saddoud, A., Hassaïri, I., & Sayadi, S. (2007). Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey. *Bioresource Technology*, 98(11), 7.

[://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.013](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.013)

Sánchez, Z., Poggio, D., Castro, L., & Escalante, H. (2021). Simultaneous Synergy in CH₄ Yield and Kinetics: Criteria for Selecting the Best Mixtures during Co-Digestion of Wastewater and Manure from a Bovine Slaughterhouse. *Energies*, 14(2), 22.
[://doi.org/10.3390/en14020384](https://doi.org/10.3390/en14020384)

Tasa de interés DTF - Banco de la República (banco central de Colombia). (n.d.). Retrieved February 17, 2022, from <https://www.banrep.gov.co/es/tasa-interes-dtf>

Triviño, C. H. A. . (2021). *Informe Visita Planta Colbeef*. 9.

Vanguardia. (2020). *Athena Foods adquirió Frigorífico Vijagual* | *Vanguardia.com*.
[://www.vanguardia.com/economia/local/athena-foods-adquirio-el-frigorifico-vijagual-GL2728118](https://www.vanguardia.com/economia/local/athena-foods-adquirio-el-frigorifico-vijagual-GL2728118)

Wang, S., Jena, U., & Das, K. C. (2018). Biomethane production potential of slaughterhouse waste in the United States. *Energy Conversion and Management*, 173(May), 15.
[://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.059](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.059)