

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio Politécnico

**Obtención de energía eléctrica a partir de desechos sólidos de
ganado bovino de la Hacienda San Antonio.**

Louiza Abdo Eid Vázquez

Ingeniería química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Químico

Quito, 21 de diciembre de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio Politécnico

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Obtención de energía eléctrica a partir de desechos sólidos de
ganado bovino de la Hacienda San Antonio.**

Louiza Abdo Eid Vázquez

Nombre del profesor, Título académico

Juan Diego Fonseca, Ph.D.

Quito, 21 de diciembre de 2020

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Louiza Abdo Eid Vázquez

Código: 00136752

Cédula de identidad: 1720448172

Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre del 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

Actualmente, la implementación de energías renovables ha aumentado debido a la subida de precios de los combustibles fósiles, los mismos que han causado una crisis ambiental en el mundo. En el presente trabajo se estudió la factibilidad de una planta de biometano, instalada en una hacienda llamada San Antonio, cuya materia prima procesada son las deyecciones del ganado bovino. El proyecto generará energía suficiente para que la Hacienda sea autosustentable y suspender el uso de la energía estatal. El biosol que se obtiene como un subproducto del proceso anaeróbico, elimina los costos de fertilizantes químicos y los costos de tratamiento de desechos. Se espera que el proyecto sea de impacto positivo tanto ambiental como social, ya que es una solución a la problemática ambiental generada por el gas metano producido por la acumulación del excremento de vacas y del malestar causado a las comunidades cercanas por el intenso olor. Una vez finalizado el diseño del proceso, el dimensionamiento de los equipos y el análisis económico del proyecto, se concluye que el proyecto es rentable con un tiempo de recuperación en 2 años y continuará mejorando la situación económica de la Hacienda San Antonio.

Palabras claves: biometano, deyecciones, biosol, anaeróbico.

ABSTRACT

Renewable energy initiatives have started to become more widely implemented, due to the rise in fossil fuels, the same which have caused a global and environmental-crises in areas all over the world. Throughout this study, the feasibility of a biomethane plant installed next to a creamery whose raw material was cow manure was analyzed. The hypothesis is that the project would generate enough energy for the estate to become more self-sustainable by eliminating the use of state energy. Biosol, which is obtained as a by-product from the anaerobic process, would eventually eliminate the costs of chemical fertilizers and waste treatment costs. The project is expected to have a positive environmental and social impact. This experiment is one of the key solutions to solving one of the main environmental issues caused by methane gas. Methane gas is a major problem, which is directly related to the over accumulation of cow excrement and can create major negative impacts for nearby communities. Once the process design, the equipment sizing and economic analysis are complete for the project, is concluded that the project will be deemed profitable with a return of investment within a 2-year time period and will continue to help the current situation.

Key words: biomethane, excrement, biosol, anaerobic.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Antecedentes	11
1.2. Justificación.....	12
1.3. Objetivos	13
1.4. Resultados esperados	13
2. BASES DEL DISEÑO.....	15
2.1. Descripción de materias primas.....	15
2.2. Descripción de producto	16
2.3 Selección del proceso.....	17
2.3.1 Biometanización Húmeda	18
2.3.2 Biometanización Seca.....	19
2.3.3 Comparación de procesos	19
2.4. Limitaciones y normas.....	20
3. DEFINICIÓN DEL DISEÑO	21
3.1 INTRODUCCIÓN.....	21
3.2 Desarrollo.....	21
3.2.1 Mezclado	22
3.2.2 Biodigestión.....	23
3.2.3 Purificación	24
3.2.4 Generación eléctrica	25
3.2.5 Balance de masa y energía	26
3.3 Conclusiones	27
4. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS	28
4.1 Introducción	28
4.2 Desarrollo.....	28
4.3 Conclusiones	29
5. EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA	31
5.1 INTRODUCCIÓN.....	31
5.2 Desarrollo.....	31
5.2.1 Costos de maquinaria y equipos	31
5.2.2 Inversión capital fijo	32
5.2.3 Costos de producción.....	32
5.2.4 Capital de trabajo.....	33
5.2.5 Ahorros.....	33
5.2.6 Flujo de caja y análisis tecno-económico.....	34
5.3 Conclusiones	34
6. CONCLUSIONES.....	36
ANEXO A: MATRIZ COMPARATIVA DE PROCESOS	41

ANEXO B: LEYENDA DIAGRAMA DE FLUJO	41
ANEXO C: CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS CRUDO	42
ANEXO D: BALANCE DE MASA Y ENERGÍA.....	42
ANEXO E: DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS	44
ANEXO F: COSTOS DE MAQUINARIA Y EQUIPOS	45
ANEXO G: METODOLOGÍA	47
ANEXO H: FOTOS HACIENDA SAN ANTONIO	54

Índice de tabla del contenido

Tabla 1. Características del estiércol de vaca	15
Tabla 2. Guía de equipos	22

Índice de figuras del contenido

Figura 1. Diagrama de bloque de biometanización húmeda.....	18
Figura 2. Diagrama de bloque de biometanización seca	19
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de biometanización húmeda	22
Figura 4. Diseño del biodigestor	29

Índice de tabla de anexos

Tabla A. 1 Matriz comparativa	41
Tabla A. 2 Leyenda del diagrama de flujo.....	41
Tabla A. 3 Caracterización del biogás crudo	42
Tabla A. 4 Relaciones proporcionales	42
Tabla A. 5 Balance de masa para la Hacienda.....	42
Tabla A. 6 Datos energéticos de los equipos	43
Tabla A. 7 Balance de energía de la planta.....	43
Tabla A. 8 Balance de masa para la planta de biogás	43
Tabla A. 9 Balance de masa en columna de absorción	43
Tabla A. 10 Dimensiones del biorreactor	44
Tabla A. 11 Dimensiones de la columna de absorción.....	45
Tabla A. 12 Dimensiones del gasómetro	45
Tabla A. 13 Costos de los equipos	45
Tabla A. 14 Inversión de capital fijo	45
Tabla A. 15 Costos de producción variables	46
Tabla A. 16 Costos de producción fijos.....	46
Tabla A. 17 Capital de trabajo	46
Tabla A. 18 Ahorros e ingresos.....	46
Tabla A. 19 Flujo de caja.....	46

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La actividad ganadera produce entre el 15-20% del metano a nivel mundial. El exceso de esta actividad humana sin control y sin tratamiento de desechos perjudica la situación ambiental ya que el metano es un gas inflamable que contribuye al calentamiento global por su capacidad de absorber el calor. Ecuador es un país altamente productivo en el sector agropecuario, aportando el 7.7% al PIB nacional, por tanto, produce 2 millones de toneladas de desechos orgánicos al año [1]. Los rellenos sanitarios en el país son escasos y el aporte al efecto invernadero es elevado.

Actualmente, los combustibles fósiles son cada vez más escasos en el mundo y su precio está incrementando por tanto se busca nuevas fuentes de energías renovables. La biomasa, componentes principal de los desechos orgánicos, es una fuente de energía renovable amigable con el medio ambiente. La producción de biogás, gas energético a partir de biomasa, está siendo considerado en diferentes ciudades del Ecuador. La ciudad de Cuenca cuenta con una planta eléctrica de biogás con basura de los rellenos sanitarios, inaugurada en el año 2017 [2]. Quito cuenta con el proyecto de la construcción de la Planta de Generación de Energía Eléctrica a partir del Biogás en el relleno sanitario de la capital. El biogás es una gran opción para mejorar la situación ambiental en el Ecuador.

En Ecuador, según las estadísticas del Ministerio de Energía del Ecuador [2], el consumo de energía eléctrica en el 2019 fue de 25.310 GWh (4,5% mayor que el año anterior); es decir, el consumo energético a nivel nacional aumenta con los años. Sin embargo, el gobierno ecuatoriano otorga subsidios de consumo de energía eléctrica. Debido al incremento de la generación renovable en un 19%, Ecuador logra exportar electricidad a los países vecinos, Colombia y Perú, con una venta de 1.765 GWh y 60 GWh, respectivamente, generando un ingreso económico de USD 66,8 millones al

Estado. La generación de electricidad con biogás es rentable en el Ecuador por la gran cantidad de desechos orgánicos.

1.2. Justificación

Una planta de biogás permite aprovechar los desechos orgánicos para disminuir la presión en los rellenos sanitarios, proteger las aguas subterráneas de la contaminación, y reducir emisión de gases de invernadero. El uso de biomasa como materia prima valoriza los residuos orgánicos ya que representan un ingreso adicional al sector agrícola y ganadero. En el artículo de Biodiversidad y Ecología Animal de Rosales [3] se presenta que 1kg de estiércol de vaca produce 0,0353 m³ de biogás, y el valor energético de 1m³ de biogás equivale aproximadamente a 0,6-0,75 m³ de gas natural, es decir, que produce 2,1 kW/h de energía eléctrica. A partir de estas relaciones se puede estimar la cantidad de biogás a obtener en el proyecto.

El proyecto consiste en el análisis de factibilidad de una planta productora de biogás a partir de residuos orgánicos vacunos de la Hacienda San Antonio para el aprovechamiento energético y reducción del impacto ambiental. La planta será instalada junto a la Hacienda para generar su propia electricidad. El proyecto busca reducir el impacto que ocasionan los desechos orgánicos al ambiente, potenciando a los residuos como materia prima aprovechable. Lo que se puede garantizar es la reducción de mal olor, espacio útil para la ganadería y varios ahorros económicos.

En Ecuador, el servicio de corriente eléctrica se suspende constantemente por el clima o la negligencia del personal, su reparación puede tardar horas o hasta días. Santiago Villacres, dueño de la Hacienda San Antonio, nos informa en la entrevista realizada [4] su deseo de independizarse de la energía proveniente del estado ya que su servicio no es muy favorable para la Hacienda.

Como motivación económica, la planta otorgará a la Hacienda independencia energética, además de representar varios ahorros como en el pago de energía, en la compra de fertilizantes para el pasto y se eliminará el costo de tratamiento de residuos que realiza la Hacienda. La obtención de la materia prima para el proceso no genera ningún costo ya que no hay necesidad de alquiler de transporte. El proyecto tiene impacto efectivo ambiental y económicamente en la Hacienda.

1.3. Objetivos

Como se explicó en la justificación, el objetivo general del proyecto es analizar la factibilidad de una planta de biogás cuya materia prima son desechos vacunos con el fin de generar energía y reducir el impacto ambiental. Para lograr dicho análisis se definieron tres objetivos específicos que consisten en elegir el diseño del proceso anaeróbico para procesar deyecciones vacunas; seleccionar y dimensionar los equipos necesarios para la planta diseñada; y evaluar el área tecno-económica de la planta de biogás a largo plazo.

1.4. Resultados esperados

El proyecto consiste en la instalación de una planta de energía renovable por lo tanto el efecto ambiental y social será positivo. La expectativa de este proyecto es que sea auto-sustentable eléctricamente, junto a la Hacienda a la que proveerá de energía. Los desperdicios orgánicos serán la materia prima de la planta de biogás, la cual producirá la energía necesaria para eliminar los costos de calefacción y de electricidad de la Hacienda.

El impacto tanto económico como ambiental de la planta de biogás será representativo ya que elimina costos de energía en la empresa, evita costos de eliminación o de tratamiento de residuos orgánicos, no requiere de mucho personal y podrán trabajar los empleados de la Hacienda en la planta ya que no necesitan de mucho conocimiento para poder operarla. Se espera que el proyecto sea beneficioso incluso con las comunidades

cercanas ya que eliminará el malestar respiratorio por el mal olor de los desperdicios, evitará la contaminación de los ríos y en un futuro puede ser fuente energética para las casas del sector.

2. BASES DEL DISEÑO

2.1. Descripción de materias primas

La materia prima principal del proyecto son las deyecciones de las 115 vacas de la Hacienda. Es necesario conocer las características de la biomasa a procesar porque a partir de dicha información se determinarán el proceso y la calidad del biogás a ser producido. La composición de las heces vacunas depende de la alimentación de los animales. Mediante la entrevista con el dueño de la Hacienda, Santiago Villacrés, se confirmó que la dieta que conllevan las vacas lecheras es de hierba de pradera compuesta de *L. perenne*, *T. Pratense*, y de ensilados. Las características de la materia orgánica es esencial para que la actividad microbiana en el proceso anaeróbico se lleve a cabo.

A partir de la información adquirida de la investigación de estudios laboratoristas, se presenta una tabla resumen de los parámetro principales del estiércol de vacas lecheras:

Tabla 1. Características del estiércol de vaca

Parámetros	Cantidad
Sólidos totales	48,76 %
Humedad	51,24 %
Densidad	986,49 kg/m ³
DQO	9.638 mg/L
Carbono	52,24 %
Nitrógeno	2,59 %

La naturaleza de la materia prima permite un buen rendimiento en la producción de biogás. La relación carbono-nitrógeno es un parámetro que condiciona dicha producción y mediante experimentos [5] se afirma que la relación óptima C-N está entre 20:1 a 25:1. Esta relación se debe cumplir porque en caso de que exista un exceso de

carbono el nitrógeno se consumirá rápidamente por las bacterias metanogénicas, en cambio, si el nitrógeno se encuentra en exceso formará amonio aumentando el pH de la mezcla en el biodigestor. En ambos casos el rendimiento de la producción del biogás se ven afectados. Esta relación se puede obtener mezclando diferentes tipos de biomasa hasta ajustarla a la relación ideal; sin embargo, en este caso el estiércol de vaca lechera ya cuenta con una relación óptima por tanto no es necesario añadir otro tipo de biomasa.

La estimación de la cantidad de materia prima a procesar será realizada considerando los siguientes datos generales: el bovino adulto defeca de 10 a 15 veces por día, lo que representa el 8% de su peso; el peso medio de las vacas lecheras es de 600kg; la recolección de materia se hace desde el corral, recuperando aproximadamente el 40% de la defecación total [3]. La recolección se realizará de manera mecánica y será transportada al tanque de almacenamiento con una frecuencia diaria.

2.2. Descripción de producto

El biogás es empleado a nivel mundial como combustible para cocción o vehicular, calefacción, electricidad, o para producir metanol [6], dependiendo de su destino debe cumplir con ciertas características. Si su uso final es para calentadores o motores de combustión no es necesario la remoción de CO₂ mientras que si su aplicación es como combustible vehicular o fuente energética debe ser enriquecido en metano, es decir, purificado.

El proyecto es diseñado para la obtención de biogás con el fin de generar electricidad suficiente para el consumo de la Hacienda y de la planta. En base a las heces bovinas se tiene que la composición del biogás será 65% metano (CH₄), 30% dióxido de carbono (CO₂) y 5% de gases como nitrógeno, hidrógeno, vapor de agua y sulfuro de

hidrógeno [7]. El producto será fuente de energía eléctrica para la auto sustentabilidad e independencia de la Hacienda.

El sulfuro de hidrógeno es considerado un gas nocivo para la salud y corrosivo para los equipos de la planta. Una pequeña cantidad de este gas en el ambiente, entre 20-50 ppmv, causa sofocación en la persona porque los pulmones lo absorben rápidamente [8]. Según McKinsey [8], la presencia de H_2S en la combustión de biogás genera dióxido de azufre, el cual es un incumplimiento con los requisitos de emisiones ya que es dañino para el ambiente. A pesar de que el biogás producido está compuesto por 2% de ácido sulfhídrico (sulfuro de hidrógeno en estado acuoso) este es perjudicial al procesarlo.

Villacres informa que la Hacienda consume 750 kWh al mes: esto representa \$400 de gastos en electricidad. Brevemente, se calcula que la cantidad mínima de producción de biogás necesario para la Hacienda es de 358 m³ mensuales. A este valor se debe incluir la cantidad de producto necesario para generar la energía que requiere el funcionamiento de la planta, el cual será calculado en el capítulo 3 en el balance de masa y energía.

El uso de estiércol como materia prima en el proceso de biometanización genera un lodo residual que se puede considerar como un subproducto ya que es un excelente fertilizante orgánico, conocido como biosol. Este biofertilizante será esparcido en las hectáreas de pastoreo de las vacas mediante un sistema de regadío. La ventaja de su producción es la eliminación de fertilizantes químicos sintéticos contaminantes que actualmente utiliza la Hacienda, además representa una cantidad significativa de ahorro en la compra de otros fertilizantes y transporte.

2.3 Selección del proceso

En la obtención de biogás se requiere de un biodigestor donde se procesan los residuos orgánicos y sucede la digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica es la

descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno produciendo en mayor cantidad metano y dióxido de carbono [9], y se da por la presencia de bacterias anaerobias y metanogénicas, cuyo crecimiento será eficiente bajo el control de las condiciones de operación.

A nivel industrial existen distintas tecnologías y variaciones entre procesos para la obtención del biogás, también conocido como biometano. Para la elección del proceso a diseñar, se compararon la biometanización húmeda y seca. La principal diferencia entre ambos procesos es la composición de la materia prima que ingresa al biodigestor. A partir de esta simple variación existe numerosos parámetros a evaluar para decidir el proceso más conveniente a la situación.

2.3.1 Biometanización Húmeda

Este proceso consiste en la mezcla de biomasa con agua. El proceso trabaja con fluidos o lodos, por lo tanto se necesita de bombas de lodos para su transporte. Al ser fluidos, el tipo de reactor CSTR es beneficioso para un buen control de las condiciones de operación para que estén dentro del rango óptimo para mejor conversión en biogás; por esta razón, el tiempo de retención dentro del reactor puede ser menor. Las condiciones de operación como pH y temperatura están automatizadas. Su instalación requiere de mayor tiempo y cuidado ya que el reactor es más complejo y costoso. A continuación, el diagrama de bloque del proceso de biometanización húmeda:

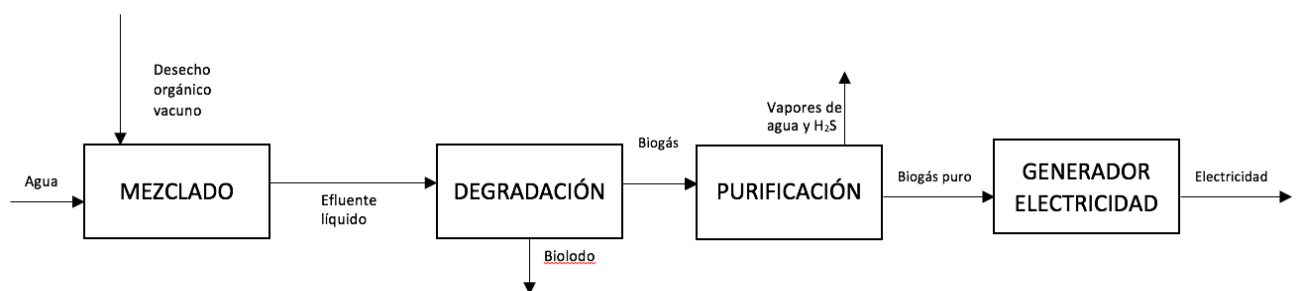


Figura 1. Diagrama de bloque de biometanización húmeda

2.3.2 Biometanización Seca

Este proceso consiste en el ingreso de la biomasa pura directo al biodigestor, sin requerir de tratamiento o mezclado previo. Al trabajar con sólidos, se utiliza un reactor tipo batch, el cual requiere de menor tecnología ya que su operación es más sencilla y económica. La temperatura es un parámetro fundamental para el crecimiento de las bacterias, y en este tipo de reactor su control es más eficiente. Sin embargo, el tiempo de retención es mayor.

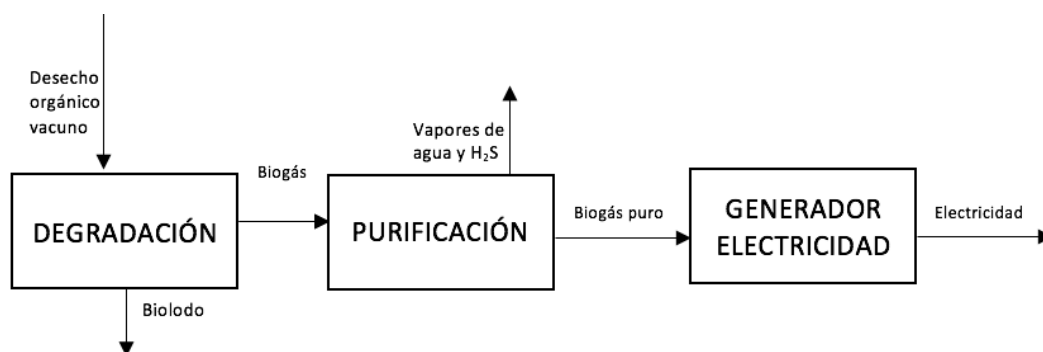


Figura 2. Diagrama de bloque de biometanización seca

2.3.3 Comparación de procesos

Una vez descritos ambos procesos, se realiza una matriz comparativa (véase Anexo A) considerando los parámetros importantes para llevar a cabo el proyecto. Mediante la matriz se tiene como resultado 6 contra 3 a favor de la biometanización húmeda; por lo tanto, se selecciona el proceso de biometanización húmeda como el proceso a diseñar por las siguientes razones: al ser un planta industrializada se opera con caudales muy grandes por lo que el reactor debe ser continuo; además, porque se trabaja con bacterias muy sensibles a los cambios en las condiciones de operación por tanto se necesita de un reactor CSTR que esté automatizado y mantenga los parámetros de operación en los rangos óptimos; finalmente, el transporte de la materia prima es más

fácil y económico por tuberías que por bandas mecánicas. Con respecto a los costos, la biometanización seca es costosa ya que se necesitaría de dos biodigestores para operar de manera paralela, además de que requiere de mayor potencia del motor para la agitación de la mezcla por su consistencia dura y hay alta probabilidad de que el aspa del reactor se dañe. Por lo tanto, se seleccionó el proceso de biometanización húmeda por ser el método más adecuado para la situación y condiciones estudiadas.

2.4. Limitaciones y normas

La Hacienda San Antonio esta ubicada en la Provincia de Cotopaxi, en la ciudad de Latacunga. Este sector es conocido por su clima frío que varía entre 8 a 18 °C durante el día. Según los datos climáticos reportados por SELT [10] los primeros 6 meses del año hay un 49% de probabilidad de precipitación y en los 6 meses restantes hay una 26%. Se puede considerar al clima como una limitación ya que se requiere mayor energía calorífica en el proceso e infraestructura para evitar daños.

La Hacienda cuenta con 25 hectáreas verdes donde la principal actividad es el pastoreo de vacas. Para el desarrollo del proyecto hay que considerar el tipo de vaca, ya sea lechera o vaca en secas; es este caso se estudió las 115 vacas lecheras mientras que se descartaron las 25 vacas en secas. Se considera una limitación el estado de salud del ganado o una muerte repentina.

La biometanización es un proceso amigable con el medio ambiente. El proyecto está diseñado para la reducción de emisiones de metano a la atmósfera. Sin embargo, existe la posibilidad de que el sulfuro de hidrógeno sea tóxico, por esta razón será tratado. Además, un exceso de producción de biogás puede tener efectos ambientales, en tal caso será combustionado.

3. DEFINICIÓN DEL DISEÑO

3.1 Introducción

La transformación de los desechos vacunos en biogás consiste en la biodigestión por medio de bacterias metanogénicas, las cuales rompen los ácidos y alcoholes para la producción de metano, principalmente, mediante una reacción exotérmica [11]. El crecimiento bacteriano es dependiente de los factores de temperatura, pH, agitación, tiempo de retención hidráulico, y relación C-N, entre otros. Al ser un proceso biológico, es más sensible a los pequeños cambios en las condiciones del entorno por tanto se requiere de mayor control y precisión.

Como se explicó anteriormente, el biogás destinado al uso eléctrico necesita ser procesado y al contener ácido sulfhídrico se incluye la operación de purificación en el diseño del proceso. La desulfuración consiste en la eliminación del ácido por medio de absorción antes de ingresar a los generadores de electricidad para evitar los daños que puede causar a los motores debido a la corrosión.

3.2 Desarrollo

La biometanización húmeda consiste en cuatro operaciones unitarias principales: mezclado, biodigestión, purificación y generación eléctrica. A continuación el diagrama de flujo del proceso:

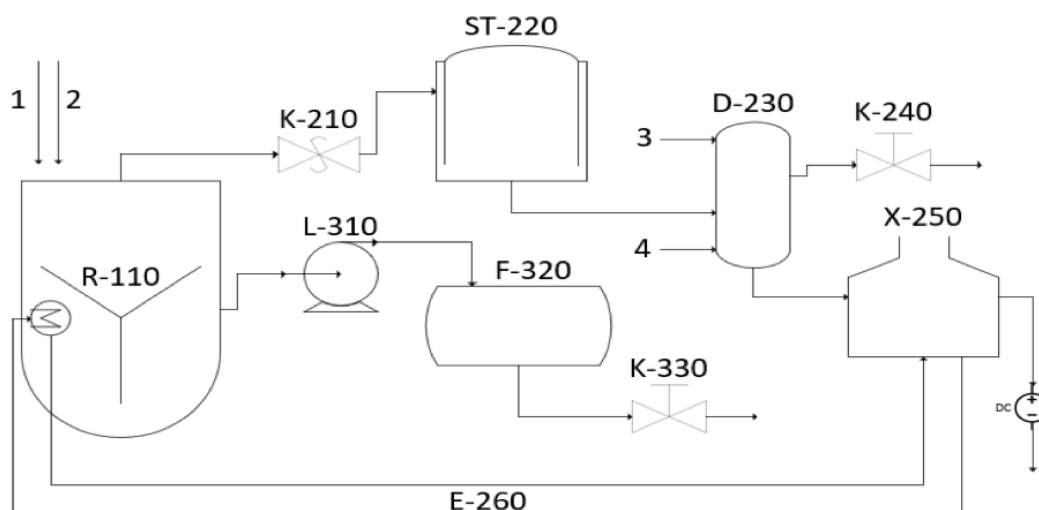


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de biometanización húmeda

El proceso consiste en la entrada de dos corrientes al biodigestor; la corriente del biogás producido asciende y se almacena en el gasómetro para ser purificado, posteriormente, por la columna de absorción. Finalmente, el biogás ingresa al generador eléctrico, el cual produce energía eléctrica a la Hacienda y a la misma planta. La corriente del biosol pasa por una bomba de lodo y se almacena en un silo. A continuación la tabla de guía de equipos principales, la leyenda completa del diagrama de flujo se encuentra en el Anexo B:

R-110	<i>Bioreactor</i>
ST-220	<i>Almacenamiento de biogás</i>
D-230	<i>Columna de absorción</i>
X-250	<i>Cogenerador</i>
L-310	<i>Bomba extractora de biol</i>
F-320	<i>Silo de biol</i>

Tabla 2. Guía de equipos

3.2.1 Mezclado

La operación de mezclado es conveniente cuando se tiene diferentes tipos de biomasa, por la variedad de tamaños, densidades y contexturas. Generalmente, esta operación es para que la mezcla sea homogénea al ingresar al biodigestor para una mayor

eficiencia en la descomposición de la biomasa. Sin embargo, el proceso de este proyecto está diseñado de tal manera que los costos sean lo mínimo posible para que sea adecuado e implementable para la Hacienda; por lo tanto, la operación de mezclado se elimina. La alimentación y mezclado de la biomasa será directamente en el biodigestor; en este caso es preferible no construir un tanque de mezcla.

3.2.2 Biodigestión

El régimen del proceso será continuo ya que la producción de la materia prima es diaria, por lo tanto se alimentará diariamente al biorreactor. Al ser un biodigestor de tipo continuo se necesita cargarlo por primera vez, y posteriormente será alimentado de manera regular para mantenerse en su capacidad. La mezcla consiste en la adición del estiércol y agua con una relación de 1:0,25 [5]; la razón por la que se diluye al excremento es para evitar atascamientos en el biodigestor o secado del sustrato e interrumpa la continuidad del proceso. La biodigestión es la operación más importante ya que aquí se lleva a cabo las reacciones químicas especificadas en la introducción.

La mezcla de entrada se encuentra a condiciones ambientales, así evitando la descomposición de la materia orgánica previa a esta operación. Las condiciones del proceso biodigestor fueron escogidas de acuerdo a los experimentos de digestión anaeróbica realizados por Reyes para el aprovechamiento de sustratos orgánicos [12]. El proceso será mesófilo, es decir, se operará a una temperatura de 35 °C, ya que Reyes afirma que las bacterias presentes en el estiércol vacuno son de rápida reproducción a dicha temperatura por su alta actividad en degradar materia orgánica. No se escoge un valor de temperatura diferente por que las bacterias son muy sensibles y se necesita de un mayor control; tampoco se escoge una temperatura mayor por que Latacunga es de clima frío y se necesitaría de mayor energía térmica para calentar el biodigestor, por tanto a la temperatura escogida significará ahorros en costos energéticos.

Con respecto al pH es preferible mantenerlo en un rango neutro con ligera tendencia básica, 7,2, ya que es favorable para la actividad metanogénica, según los experimentos, porque hay una producción de ácidos. El biodigestor contará con agitación mecánica continua por cuestión económica a 120 rpm para que no maltrate ni mate a las bacterias. El tiempo de retención hidráulica (TRH) es sumamente importante porque es el tiempo que tarda la biomasa en producir metano. Este dato puede variar entre horas, días y meses dependiendo del volumen del digestor, el caudal de entrada y la temperatura del proceso. En este caso se escogió que el tiempo de retención será de 15 días. De acuerdo a los experimentos de aprovechamiento residual [12] se conoce el comportamiento de la actividad de las bacterias, en condiciones ambientales, donde los primeros cinco días es una etapa de adaptación por tanto la producción de metano es baja. Posteriormente, se tiene una actividad exponencial hasta que se estabiliza cuando llega a la fase estacionaria y a partir del día 20 inicia la etapa de muerte bacteriana. Al operar a temperaturas mesófilas el TRH disminuye; además, se aplica un rango de seguridad para evitar la muerte bacteriana y por esta razón se eligió 15 días como tiempo suficiente para concluir con la digestión anaerobia. Las condiciones escogidas son en base a las necesidades y condiciones de la Hacienda, sus valores son óptimos para la producción bacteriana.

3.2.3 Purificación

Como se indicó anteriormente, dependiendo del destino del biogás se añade una operación de purificación. En este caso, se realiza un tratamiento secundario que está diseñado específicamente para la limpieza del gas crudo que sale del biodigestor (véase Anexo C para su caracterización). Se escogió el proceso seco de oxidación ya que se tiene poca cantidad de azufre y se necesita una mayor pureza [13]. Este proceso consiste en la

adsorción química donde H_2S reacciona con el absorbente que es óxido de hierro y forma sulfuro de hierro. Este sistema se conoce como esponjas de hierro, y se utiliza por su simpleza y sencillez. En este caso, se desea eliminar el 100% de la composición del H_2S en el gas. La corriente de biogás con impurezas ingresa por el inferior de una columna de absorción, el flujo ascendente transfiere el H_2S al hierro que se encuentra a temperaturas entre 15 y 20 °C y baja presión. Se obtiene el biogás apto para usarlo como fuente de energía y se garantiza un buen estado de los equipos.

3.2.4 Generación eléctrica

El proyecto como objetivo final es generar energía eléctrica con biogás, por lo que se requiere de un generador eléctrico para su transformación. La elección de la máquina se hizo de acuerdo a los estudios realizados por ingenieros eléctricos [8] que presentan varios diseños y modelos de generadores eléctricos para trabajar exclusivamente con biogás. Las consideraciones para su instalación fueron las siguientes:

- La distancia del generador será cercana a la salida de la torre de absorción ya que a menor distancia existe menor pérdidas de energía.
- Instalación de un soplador antes del generador para cumplir con el requerimiento de la presión de entrada del gas.
- Concentración del ácido sulfhídrico ya que sus características, mencionadas anteriormente, afectan a la máquina.

El biogás es inyectado directamente en el generador eléctrico que provee energía tanto a la Hacienda como a la planta de biogás. Además, se instala una resistencia para emitir calor al biorreactor. La resistencia consiste en el contra flujo para calentar el proceso como indica la corriente E-260 en el diagrama de flujo. Con esta operación finaliza el proceso principal.

3.2.5 Balance de masa y energía

Una vez diseñado el proceso y sus respectivas condiciones de operación se realiza el balance de masa (véase Anexo B) en todos los equipos. Cabe recalcar que para el gasómetro y silo, tanto los caudales como las composiciones de entrada y de salida son iguales. Se explicará el balance de masa más importante que es el del biodigestor y la columna de absorción. La metodología para el balance del biorreactor fue calcular por separado; la materia prima necesaria para la Hacienda y para la planta, los cálculos se basan en las equivalencias de la Tabla A.4. Se inició con el balance para los 750 kW de la Hacienda. Posteriormente, se realiza el balance de energía en el que se consideró la bomba de extracción y el agitador de hélice, obteniendo una energía total de equipos de la planta de 83,76 kW/mes, teniendo en cuenta que la planta trabaja 8 horas al día. Con este último dato se realiza el balance para la energía retroalimentada en la planta en la Tabla A.8.

El balance está en base a la demanda mensual de energía de la Hacienda más el de la planta de biogás, siendo un total de 833,76 kW de consumo al mes. Se calcula que se requiere producir 397,03 m³ de biogás por tanto la cantidad de masa diaria a procesar es de 374,91 kg de deyecciones vacunas más 93,72 kg de agua para satisfacer el consumo energético.

El balance de masa de la columna de absorción, con esponjas de hierro, consiste básicamente en la combinación de una corriente de dos moles de óxido férrico y un mol de agua por cada seis moles de sulfuro de hidrógeno como entrada, para que genere ocho moles de agua como residuo por cada dos moles de sulfuro de hierro (véase Tabla A. 6). En dicha tabla se observa la desaparición del ácido sulfhídrico, purificando el biogás hasta eliminar completamente el compuesto ácido. Como producto, se tiene biogás con las

condiciones indicadas en [5] para ser utilizado como fuente energética; rico en metano y ausencia de H_2S para la optimización de generación de energía.

3.3 Conclusiones

El proceso de biometanización húmeda produce biogás por digestión anaeróbica en el biorreactor. La biodigestión es la operación más importante del proceso por tanto las condiciones deben ser óptimas, los parámetros operacionales en el biodigestor es a 35 °C, con un pH de 7,2, con un agitador a 120 rpm, sin presencia de oxígeno. El biogás producido es purificado por absorción de gases para ser utilizado como fuente de energía.

El proceso, al ser de operación continua, se alimenta diariamente la mezcla de estiércol y agua, para una producción constante de biogás; de esta manera se eliminan los cortes de electricidad y se asegura su generación persistente. El diseño del proceso se realizó de tal forma que sea conveniente para las condiciones de la Hacienda, y además busca generar el menor costo posible. Se obtuvieron los valores necesarios de alimentación y la producción total para satisfacer el consumo energético mensual de la Hacienda y de la planta de biogás. Con esto, se tiene la información necesaria para el dimensionamiento de los equipos.

4. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

4.1 Introducción

Una vez realizado el balance de masa y de energía se puede calcular las dimensiones de cada uno de los equipos del proceso. Los equipos son diseñados de acuerdo a la necesidad de la Hacienda y capacidad de la planta. Los equipos y maquinaria que se escoge son los especificados en el diagrama de flujo, y se dimensionan de acuerdo a la materia prima procesada .

4.2 Desarrollo

Los equipos a instalar en el proceso para la biometanización son pocos, básicamente son cuatro equipos principales a dimensionar. El equipo más importante es el bioreactor donde ocurre la digestión. Se calculó la capacidad del equipo teniendo en cuenta el caudal volumétrico diario de la mezcla y el tiempo de retención. Se tiene que entra $0,4720 \text{ m}^3$ de mezcla y reposa durante 15 días; por lo tanto, el volumen total del biodigestor es de 7 m^3 . Debido a la complejidad e irregularidad del biodigestor de polipropileno, como se ve en la Figura 4, se buscó las tablas tabuladas [14] para dicha capacidad. Por lo tanto, se tiene un equipo de 2,6m de alto y 2,4 m de ancho y el reso de dimensiones están en la Tabla A. 10. No es necesario aumentar la capacidad por seguridad ya que no se trabaja con sustancias peligrosas ni hay riesgo de desbordamientos. En el caso de un exceso de producción de biogás, existe una válvula de alivio.

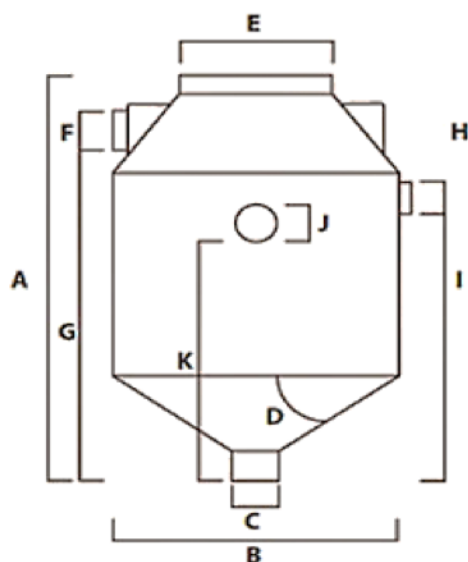


Figura 4. Diseño del biodigestor

La columna de absorción se dimensionó como un cilindro (Tabla A. 11). La capacidad del equipo se calcula con el balance volumétrico; es la suma de los volúmenes de la Tabla A. 9. La altura total de la columna es de casi 4 metros, incluye la sección de relleno, la zona de distribución del líquido y la zona de salida, y con un diámetro de 2 metros. La zona empacada de esponjas de hierro es de casi 2 metros, con este valor se calcula la cantidad necesaria de este material. Los equipos trabajan a baja presión ya que su producción es diaria, por lo tanto la presión de operación es igual a la de diseño.

Las dimensiones del gasómetro, también diseñado como un cilindro, están en la Tabla A. 12 siendo este un equipo de 14 m³ de capacidad para almacenamiento de biogás con un diámetro de 3 metros y una altura de 2 metros. Para este equipo se consideró un factor de seguridad de 0,1 por trabajar con gases.

4.3 Conclusiones

El dimensionamiento de equipos permite conocer la magnitud aproximada de la planta y el espacio requerido para su instalación en la Hacienda. Se puede considerar que

los equipos son grandes, con altas capacidades, ya que se trabaja con un caudal diario alto. Sin embargo, son datos realistas y comunes a nivel industrial, ya que existe la materia prima en gran cantidad y se requiere de mucha masa de deyecciones para producir biogás de manera rentable. Una vez calculado las dimensiones de los equipos se puede continuar con el siguiente objetivo de cotizar sus costos.

5. EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA

5.1 Introducción

La evaluación económica del proyecto consiste en el estudio de los costos de inversión, los ingresos de la venta de biosol y los ahorros generados a la Hacienda. Se realiza el análisis entre gasto y ahorro que genera la instalación de la planta de biogás. De acuerdo a estos datos se logra calcular el tiempo de recuperación de la inversión y la factibilidad del proyecto.

5.2 Desarrollo

5.2.1 Costos de maquinaria y equipos

Se calcula los costos de todos los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de generación eléctrica. Los valores obtenidos de la mayoría de los equipos se calculó con la referencia [11], teniendo costos reales de acuerdo a las características de los equipos (véase Tabla A. 13). En el caso del biodigestor y del generador eléctrico se cotizaron directamente con vendedores de los equipos, siendo estos los más costosos superando los \$10.000 cada uno. El material de los equipos influye en su costo, así que se diseñó un biodigestor de polipropileno ya que no se trata con sustancias corrosivas, y además, su costo es mucho menor. Por otra parte, el gasómetro es hecho de acero inoxidable por la presencia del ácido sulfhídrico y para evitar fugas. El silo, de igual manera, es diseñado de acero inoxidable para el almacenamiento del biosol. El valor del ISBL (Inside Battery Limits) constituye los costos para la inversión e instalación directa de la planta. Además, incluye permisos o tarifas para llevar a cabo su operación, en este caso resulta la suma de los costos de la maquinaria, siendo este un monto de \$39.092.

5.2.2 Inversión capital fijo

En este cálculo se comprende los costos de la planta en sí, los costos de infraestructura e ingeniería para su construcción y los gastos de contingencia. Se considera a este un proyecto de pequeña escala por tanto los porcentajes para los cálculos del OSBL es del 20% y para el costo de contingencia y de ingeniería es del 10% (véase Tabla A. 14). El OSBL (Outside Battery Limits) considera aquellos valores que no estén asociados directamente al proceso de la planta química pero si a su construcción, por ejemplo, equipos de emergencia, cercado, servicios públicos, entre otros. Una vez calculado esto, se tiene que la inversión de capital fijo de una planta de biogás para generación eléctrica a partir de deyecciones vacunas es de \$56.292,48. No se considera un valor muy elevado ya que el proceso no es complicado ni requiere de mayor cantidad de equipos.

5.2.3 Costos de producción

Con respecto a los costos de producción se tiene los costos variables (VCOP) y fijos (FCOP). Lo que incluye en los VCOP como materia prima es solamente las esponjas de hierro para la absorción ya que la obtención de materia prima para la mezcla principal no genera ningún costo porque la Hacienda la produce, además de que el agua es abundante en dicho sector. Naturalmente, se descartan los costos de electricidad porque serán suministrados por la misma planta de biogás. En la Tabla A. 15 se tiene que el costo anual es de \$4.800, considerando que las esponjas deben ser cambiadas cada 15 días [15].

Por lo contrario, los costos fijos (Tabla A. 16) es de \$17.891, donde se decidió que solo se necesita de un operario y alguien que tenga conocimiento para la supervisión del proceso. Los trabajadores de la Hacienda serán los encargados de la limpieza y carga del biodigestor. El biodigestor requiere de mantenimiento cada 2 años, representando el 10%

del ISBL, ya que al ser CSTR no se puede hacer seguido como en un reactor batch. Es necesario ser cautelosos con este parámetro ya que al ser continuo una falla o impureza puede perjudicar la carga completa.

5.2.4 Capital de trabajo

Con respecto al capital de trabajo es aquel costo que incluye los activos para que la planta funcione correctamente a corto plazo (Tabla A. 17). En este caso se requiere de \$74.008 anuales, siendo el costo más alto debido al inventario y crédito de materia prima, y los repuestos de la maquinaria.

5.2.5 Ahorros

Esta sección es la más importante porque el proyecto busca generar un ahorro representativo a la Hacienda. El ahorro es dinero no gastado útil para otros beneficios, por lo tanto, se lo considera como ingresos. En la Tabla A. 18 se especifican los ahorros anuales, lo cuales fueron calculados en base a los datos indicados por el dueño de la Hacienda:

- La electricidad estatal es reemplazada por energía a partir de biogás, representando \$7.200 anuales.
- La Hacienda acostumbra comprar fertilizante químico, a \$0,6 el kilogramo, para aplicar 200 kg del mismo a cada una de las 25 hectáreas destinadas al pastoreo dos veces al mes. Este fertilizante químico es reemplazado por el biosol producido, representando \$72.000 anuales.
- La Hacienda trata los sólidos con piscinas que le generan un costo de \$2.000 mensuales. Este proceso será eliminado gracias al aprovechamiento de los residuos vacunos.

- Existe un ahorro en el transporte del fertilizante químico y de la materia prima y del alquiler de terreno para la instalación de la planta.

Cabe recalcar que se produce 12.787 kg de biosol al mes y se utiliza el 78% en la Hacienda, por lo tanto, el biosol restante se lo comercializa a las haciendas, granjas, y casas vecinas a un costo de \$0,6 el kilogramo, de esta manera se obtiene un ingreso de 20.067\$/año. Con estos valores se obtiene que la planta de biogás le genera un ahorro/ingreso a la Hacienda igual a \$135.268 anuales.

5.2.6 Flujo de caja y análisis tecno-económico

El flujo de caja realizado en la Tabla A. 19 inicia con la inversión fija de \$56.292. En los años siguientes, los valores en contra son los egresos, que constan de los costos de producción, y los costos fijos de trabajo. El valor del beneficio bruto, es decir, los ahorros e ingresos menos los costos de producción, es de \$112.576, el cual es un valor alto que garantiza una generación de ganancia. El tiempo de recuperación resulta en 1,8 años, teniendo un flujo neto anual de \$38.568 logrando así recuperar la inversión y obteniendo una ganancia de \$20.845 apenas en el segundo año. Se consideró una tasa de interés bancaria igual al 9,50%. Con respecto al VAN se tiene un valor de \$670.950 y un TIR igual a 116%. Ambos indicadores son altos permitiéndonos afirmar que el proyecto es totalmente rentable.

5.3 Conclusiones

El análisis económico sirve para identificar y clasificar al proyecto como rentable o no rentable. Por esto, en los cálculos se considera todos los aspectos posibles. En este caso, como se indicó anteriormente, la planta está diseñada para generar la menor cantidad de costos a la Hacienda, aunque los costos fijos de trabajo son los más altos. Se puede

decir que la inversión inicial no es muy elevada por la eficiencia del proceso con pocos equipos.

El proyecto está diseñado de tal manera que no requiere de costos de alquiler de terreno, de transporte de materia prima, de electricidad, de un mayor número de personal, entre otros; es decir, el proyecto crea una codependencia con la Hacienda, la misma que ya no requeriría de electricidad estatal, fertilizantes químicos, ni el tratamiento de gran cantidad de residuos sólidos por la planta de biogás. Este es un proyecto de ayuda a la Hacienda y no solamente le genera gran cantidad de ahorros sino que ingresos también.

6. CONCLUSIONES

Este proyecto consistió en el diseño de un proceso para la obtención de biogás para el consumo eléctrico de una Hacienda de ganado. La metodología empezó con una investigación profunda sobre el proceso de biodigestión de desechos sólidos del ganado bovino y continuó con la comparación de las diferentes opciones del proceso para llevarlo a escala industrial. El proyecto se diseñó pensando en la forma más efectiva para la disminución de costos. La mezcla óptima de alimentación fue que por cada kilogramo de estiércol se añade un cuarto de kilogramo de agua; esto se decidió por la relación de C-N de las deyecciones de las vacas lecheras de la Hacienda. El proceso es continuo y trabaja con un biodigestor tipo CSTR para controlar de mejor manera las condiciones, además, cuenta con la operación de desulfuración para purificar el biogás y hacer que este sea eficiente como fuente de energía. La operación de limpieza del biogás genera un ahorro en un futuro ya que garantiza mayor tiempo de buen estado del generador eléctrico, uno de los equipos más costosos.

Para llevar a cabo el proyecto, se estudió el potencial energético de la Hacienda objetivo para poder conocer si se podría ahorrar mediante el uso de biogás como fuente energética. El balance de masa indica que para satisfacer las necesidades energéticas tanto de la Hacienda como de la planta de biogás, que son de 8.334 kW mensuales, se necesita producir a diario 13,23 m³ de biogás al mes. Para dicha producción el requerimiento de biomasa, deyecciones vacunas, es de 375 kg. Existe la materia prima necesaria en la Hacienda por tanto su obtención no genera costo alguno; solo demandaría el costo de la adquisición de las esponjas de hierro para el proceso de purificación de biogás crudo.

El dimensionamiento del biodigestor, debido a su estructura irregular, se obtuvo por medio de tabulaciones. Este un equipo grande hecho de polipropileno e instalado bajo tierra, tanto por la estética de la Hacienda y su comodidad de ubicación, para mantener la

temperatura de la mezcla, evitar la instalación de más bombas y daños en el equipo en un futuro.

Los equipos más importantes y por tanto los más costosos, son el biodigestor y el generador de electricidad, sus precios se obtuvieron a partir de referencias y cotizaciones. El análisis parte del valor de ISBL que se estimó en \$39.092. Económicamente, el proyecto es rentable pues se tiene un ganancia anual de \$38.568 y los costos son reducidos lo más posible. Los indicadores, tales como el TIR y el VAN se relacionan directamente con el flujo de caja y muestran que el proyecto es viable en el aspecto financiero. El VAN al ser positivo indica que al poner en marcha el proyecto se recuperará la inversión de \$56.292 en apenas dos años y ya se empezará a generar ganancias directamente. Y el TIR, al ser mucho mayor que la tasa de interés bancaria, afirma que el proyecto es rentable porque genera gran cantidad de ahorros e ingresos a la Hacienda.

La contaminación por combustibles fósiles es un problema grave porque afecta directamente a nuestro ecosistema y a nuestra salud. Al ritmo que la humanidad crece y aumenta el consumo de recursos naturales estos son cada vez más escasos. Además, el ganado bovino, por ser animales grandes, son los que más defecan y más contaminan [3]. Por esta razón, el proyecto se presenta como una solución amigable con el medio ambiente donde aprovecha aquello que se consideraba desperdicio y lo utiliza como combustible. Logrando reducir gran cantidad de costos de insumos y de gases nocivos.

Otra ventaja de la instalación de una planta de biogás para la Hacienda, a parte de que la facturación eléctrica disminuye totalmente y genera \$135.267 de ahorro, es que la Hacienda puede operar normalmente ya que el funcionamiento de los generadores es uniforme. Para que la inversión sea rentable la cantidad de consumo energético debe ser considerable, de otra manera el costo de los equipos no representarían un ahorro en la electricidad.

Las recomendaciones para un buen funcionamiento del generador y prolongación de su vida útil son que se debe eliminar el ácido sulfhídrico. Además, en caso de que exista mayor dinero de inversión se podría aumentar un tanque de mezcla previo al biodigestor; esto permitirá una mezcla homogénea lo cual será más eficiente para la producción. En caso de que se requiera mayor producción de biogás, es conveniente un biodigestor bolsa hecho de geomembrana, ya que es más barato.

Se logró que el proyecto sea autosustentable junto a la Hacienda y sea una fuente de energía alternativa. Se anticipa que el efecto ambiental y económico del proyecto sea positivo. Finalmente, se prevé que el proyecto aporte a la mejoría del ambiente; aunque es un aporte pequeño, será significativo en un futuro. A pesar de que se produzca a pequeña escala será una ayuda para mejorar la situación actual de nuestro único hogar: la Tierra.

7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] M. Riera, «Residuos Agrindustriales generados en Ecuador,» 2018. [En línea].
Available: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/3924>.
- [2] Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, «En Ecuador, el consumo de energía eléctrica se incrementó en un 4,5% en 2019.,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/en-ecuador-el-consumo-de-energia-electrica-se-incremento-en-un-45-en-2019/#:~:text=En%20base%20a%20datos%20recopilados,el%C3%A9ctrico%20fue de%2024.213%20GWh..>
- [3] M. C. Rosales, «El estiércol, material de desecho o de provecho,» *Biodiversidad y Ecología Animal*, 2017.
- [4] S. Villacres, Interviewee, *Información y datos de la Hacienda San Andrés*. [Entrevista] 2020.
- [5] M. V. Manual de biogas, Chile: Proyecto CHI, 2011.
- [6] E. Reyes, «Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos,» *FAREM-Esteli*, nº 24, pp. 63-67, 2017.
- [7] Y. S. S. K. S. y R. V. , «Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review,» *Science direct*, pp. 3-5, 2004.
- [8] M. Cruz, «Selección de un generador eléctrico de biogás para la estación experimental agrícola Fabio Baudrit Moreno,» Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2016.
- [9] A. W. J. M. y D. B. , *The biogas handbook, science, production and applications*, 2016, pp. 192-204.

- [10 El Tiempo, «Clima Latacunga 1984-2019,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.tutempo.net/clima/ws-841230.html>.
- [11 O. Novillo, «Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas,» USFQ, Quito, 2010.
- [12 O. Garcia , A. Pedroza , J. Chavez y R. Trejo , «Evaluación de fuentes de materia orgánica fecal como inóculo en la producción de metano,» Mexico, Marzo 2015. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n2/v6n2a3.pdf>.
- [13 B. M. E. G. y E. C. , «Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás,» Santa Fe, Argentina, 2018.
- [14 Rotoplas Biodigestor, «Medidas y Capacidades del Biodigestor,» 2019. [En línea]. Available: <http://blog.distribuidornacional.com/2015/04/medidas-y-capacidades-del-biodigestor.html>.
- [15 P. . K. J. C. C. B. y W. W. , «Simultaneous removal of CO₂ and H₂S using MEA solution in a packed column absorber for biogas upgrading,» Songklanakarin Journal of Science and Technology, Thailand, 2013.
- [16 R. S. Chemical Engineering, vol. 2, Gran Bretaña: Elsevier Science, 1999.
- [17 A. Pazmiño, «Diseño, construcción e implementación de un digestor anaerobio de flujo continuo para el tratamiento de estiércol bovino en la finca "Rancho Santa Esther", provincia del Carchi Ecuador,» ESPE, Sangolquí, 2012.

ANEXO A: MATRIZ COMPARATIVA DE PROCESOS

Tabla A. 1 Matriz comparativa

Parámetros	Biodigestión Húmeda	Biodigestión Seca
Reactor	1	0
Pretratamiento	0	1
Conversión	1	0
Temperatura	1	0
Tiempo de proceso	1	0
Complejidad de proceso	0	1
Materia prima	1	0
Costos	1	0
Puesta en marcha	0	1
Total	5	3

ANEXO B: LEYENDA DIAGRAMA DE FLUJO

Tabla A. 2 Leyenda del diagrama de flujo

Nombre	Descripción
1	<i>Alimentación (Agua)</i>
2	<i>Alimentación (Excretas)</i>
3	<i>Alimentación (Agua)</i>
4	<i>Alimentación (Óxido Férrico)</i>
R-110	<i>Bioreactor</i>
K-210	<i>Válvula de seguridad</i>
ST-220	<i>Almacenamiento de biogás</i>
D-230	<i>Columna de absorción</i>
K-240	<i>Válvula de salida de biogás</i>
X-250	<i>Cogenerador</i>
E-260	<i>Intercambiador de calor</i>
L-310	<i>Bomba extractora de biol</i>
F-320	<i>Silo de biol</i>
K-330	<i>Válvula de salida de biol</i>

ANEXO C: CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS CRUDO

Tabla A. 3 Caracterización del biogás crudo

Caracterización del biogás producido		
Parámetro	Cantidad	Unidades
Metano	65,0000	%
Oxido carbónico	30,0000	%
Nitrógeno	5,0000	%
Hidrógeno		
Vapor de agua		
Sulfuro de hidrógeno	2,0000	%

ANEXO D: BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

Tabla A. 4 Relaciones proporcionales

Densidad biogás	1,2 kg/m ³
1kg popo	0,0353 m ³ biogás
1kg popo	0,04236 kg biogás
1 m ³ biogás	2,1 kWh
1kg popo	0,07413 kWh

Tabla A. 5 Balance de masa para la Hacienda

Balance de caudales máscicos (750 kW por mes)			
Simbolo	Dato	Magnitud	Unidades
m_1	Caudal de agua	89,2857	Kg/día
Y	Fracción de sólidos	0,0000	
X	Fracción de agua	1,0000	
m_2	Caudal de materia prima	337,2454	Kg/día
Y	Fracción de solidos	0,4876	
X	Fracción de agua	0,5124	
m_t	Caudal de la mezcla	426,5311	Kg/día
Y	Fracción de sólidos	0,3855	
X	Fracción de agua	0,6145	
V_1	Volúmen de agua	0,2629	m ³
V_2	Volúmen de estiercol	0,1667	m ³
V_t	Volúmen total de mezcla	0,4296	m ³

Tabla A. 6 Datos energéticos de los equipos

Datos de proporción de energía			
Equipo	Tipo	Magnitud	Unidades
<i>Bomba de extracción</i>	<i>Serie 40</i>	1,1000	kW/h
		0,0080	kW/ m ³
		26,0000	m ³ /h
<i>Agitador Hélice</i>	<i>Mecánico</i>	0,0050	kW/ m ³

Tabla A. 7 Balance de energía de la planta

Energía de retroalimentación		
Equipo	Magnitud	Unidades
<i>Bomba de extracción</i>	0,2080	kW/h
<i>Agitador Hélice</i>	0,002148	Kw/h
<i>Energía total de equipos</i>	0,3490	kW/h
	2,7920	kW/día
	83,7600	kW/mes

Tabla A. 8 Balance de masa para la planta de biogás

Balance de caudales máscos para retroalimentación del sistema (83,7600 kW por mes)			
Simbolo	Dato	Magnitud	Dimensión
m_1	<i>Caudal de agua</i>	9,4159	Kg/día
Y	<i>Fracción de sólidos</i>	0,0000	
X	<i>Fracción de agua</i>	1,0000	
m_2	<i>Caudal de materia prima</i>	37,6636	Kg/día
Y	<i>Fracción de solidos</i>	0,4876	
X	<i>Fracción de agua</i>	0,5124	
m_t	<i>Caudal de la mezcla</i>	47,0795	Kg/día
Y	<i>Fracción de sólidos</i>	0,3901	
X	<i>Fracción de agua</i>	0,6099	
V_1	<i>Volúmen de agua</i>	0,0288	m ³
V_2	<i>Volúmen de estiércol</i>	0,018616	m ³
V_t	<i>Volúmen total de mezcla</i>	0,047417	m ³

Tabla A. 9 Balance de masa en columna de absorción

Proporciones molares (Reacción de absorción) - Esponja de hierro			Masas molares	
Compuesto	Magnitud	Unidades	Magnitud	Unidades
<i>Oxido férrico</i>	2,0000	mol	159,6900	g/mol
<i>Agua</i>	1,0000	mol	18,0153	g/mol
<i>Sulfuro de hidrógeno</i>	6,0000	mol	34,1000	g/mol

<i>Sulfuro de hierro</i>	2,0000	mol	87,9100	g/mol
<i>Agua</i>	8,0000	mol	18,0153	g/mol
Cantidad de ácido sulfhídrico en biogás				
Parámetro	Magnitud	Unidades		
<i>Estiercol total</i>	374,9089	Kg		
<i>Biogás crudo</i>	13,2343	m ³		
Sulfuro de hidrógeno	0,2647	m ³		
Ácido sulfhídrico	359,9726	g		
Balance molar				
Símbolo	Dato	Magnitud	Unidades	
m_1	<i>Oxido férrico</i>	3,5188	mol	Entrada
m_2	<i>Agua</i>	1,7594	mol	
m_3	<i>Sulfuro de hidrógeno</i>	10,5564	mol	
m_4	<i>Sulfuro de hierro</i>	3,5188	mol	Salida
m_5	<i>Agua</i>	14,0752	mol	
Balance de materia				
Símbolo	Dato	Magnitud	Unidades	
m_1	<i>Oxido férrico</i>	0,5619	Kg	Entrada
m_2	<i>Agua</i>	0,03170	Kg	
m_3	<i>Sulfuro de hidrógeno</i>	0,3600	Kg	
m_4	<i>Sulfuro de hierro</i>	0,3093	Kg	Salida
m_5	<i>Agua</i>	0,2536	Kg	

ANEXO E: DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Tabla A. 10 Dimensiones del biorreactor

Dimensiones de bioreactor		
Literal	Magnitud	Dimensión
<i>A</i>	2,6000	m
<i>B</i>	2,4000	m
<i>C</i>	0,2500	m
<i>D</i>	45,0000	°
<i>E</i>	18,0000	"
<i>F</i>	4,0000	"
<i>G</i>	2,3800	l
<i>H</i>	2,0000	"
<i>I</i>	2,2700	m
<i>J</i>	2,0000	"
<i>K</i>	1,8700	m

Tabla A. 11 Dimensiones de la columna de absorción

Dimensiones de columna de absorción		
Literal	Magnitud	Dimensión
<i>D (Diámetro de cilindro)</i>	65,1504	m
<i>h₁</i>	0,8000	m
<i>Z</i>	1,9700	m
<i>h₂</i>	1,2000	m
<i>Area de base</i>	3333,6904	m ²
<i>Altura total</i>	3,9700	m
<i>Capacidad</i>	13234,7510	m ³

Tabla A. 12 Dimensiones del gasómetro

Dimensiones de gasómetro (Cilindrico)		
Literal	Magnitud	Dimensión
<i>Volumen de producción de gas</i>	13,2348	m ³
<i>Factor de seguridad</i>	0,1000	
<i>Volumen de almacenamiento</i>	14,5582	m ³
<i>Altura</i>	2,0596	m
<i>Área de base</i>	7,0686	m ³
<i>Diámetro</i>	3,0000	m

ANEXO F: COSTOS DE MAQUINARIA Y EQUIPOS

Tabla A. 13 Costos de los equipos

Equipos	Cantidad	Precio (\$)
Gasómetro	1	6.452
Bomba lodo	1	1.000
Biodigestor	1	10.751
Torre absorcion	1	3.850
Generador electricidad	1	10.000
Silo	1	7.039
	TOTAL	39.092
	ISBL	39.092

Tabla A. 14 Inversión de capital fijo

OBSL	\$7.818,40	20%	Proyecto pequeño
Costo de contingencia	\$4.691,04	10%	
Costo de ingeniería	\$4.691,04	10%	

Inversión capital fijo	\$56.292,48
------------------------	-------------

Tabla A. 15 Costos de producción variables

VCOP		
Materia prima	\$400,00	\$/año
Total	\$400,00	\$/mes
	\$4.800,00	\$/mes

Tabla A. 16 Costos de producción fijos

FCOP		
Labora de operación	\$300,00	\$/mes
Supervisor	\$800,00	\$/mes
Mantenimiento	\$390,92	\$/mes
Total	\$1.490,92	\$/mes
	\$17.891,04	\$/año

Tabla A. 17 Capital de trabajo

Capital trabajo		
Inventario de materia	\$200,00	\$/semana
Efectivo	472,73	\$/semana
Crédito	\$400,00	\$/semana
Respuestos	\$469,10	\$/semana
Total	\$1.541,83	\$/semana
	\$74.008,03	\$/año

Tabla A. 18 Ahorros e ingresos

Ahorros		
Electricidad	\$7.200,00	\$/año
Fertilizantes	\$72.000,00	\$/año
Tratamiento sólidos	\$24.000,00	\$/año
Transporte	\$12.000,00	\$/año
Ingresos		
Ingreso fertilizante	\$20.067,84	\$/año
Total	\$135.267,84	\$/año

Tabla A. 19 Flujo de caja

Flujo de caja						
Años	0	1	2	3	4	5
Ingresos	0	\$135.267,84	\$135.267,84	\$135.267,84	\$135.267,84	\$135.267,84
Egresos	0	\$-22.691,04	\$-22.691,04	\$-22.691,04	\$-22.691,04	\$-22.691,04
Inversion	-\$56.292,48		\$-	\$-	\$-	\$-
Gastos Fijo	0	\$-74.008,03	\$-74.008,03	\$-74.008,03	\$-74.008,03	\$-74.008,03
Flujo neto	-\$56.292,48	\$38.568,77	\$38.568,77	\$38.568,77	\$38.568,77	\$38.568,77
Saldo	-\$56.292,48	-\$17.723,71	\$20.845,06	\$59.413,82	\$97.982,59	\$136.551,36

ANEXO G: METODOLOGÍA

Definición del diseño del proceso

Diseñar un proceso anaeróbico para la producción de biogás

1. Investigación de los diferentes tipos de procesos anaeróbicos con biomasa
2. Lectura sobre los procesos anaeróbicos a nivel industrial y del tipo de materia prima procesada.
3. Estudio de las propiedades, composición, disposición y transporte de la materia prima que es el excremento de vaca lechera. Se necesita saber el porcentaje de sólidos o materia seca en la. Con esta información se obtiene la equivalencia de la producción de biogás.
4. Cálculo de la cantidad de materia prima a procesar. Investigación de la cantidad de deyecciones diaras de una vaca lechera.

$$Materia\ recoletada\ diario\ (M) = (P * 0,08) * N * 0,4$$

Donde P es el peso de las vacas, 0,8 indica que las vacas defecan el 8% de su peso, N es el número de vacas en la Hacienda, 0,4 es el porcentaje de materia prima que se recoleta en el establo.

5. Comparación de procesos anaeróbicos mediante matriz comparativa y diagramas de bloques.
6. Elección del proceso conveniente para el estudio a realizar.
7. Desarrollo del diagrama de flujo.

Dimensionamiento de equipos

Dimensionar los equipos de acuerdo a la materia prima procesada y al producto final deseado

1. Investigar la cantidad de energía que consume la Hacienda y estimar la energía que requeriría la producción de biogás.
2. Estimación de cantidad de producto final para satisfacer las necesidades de energía de la Hacienda y de la planta.
3. Encontrar equivalencias: deyecciones vacunas en biogás (a) y biogás en electricidad (b)

$$\text{Electricidad necesaria} = \text{Electricidad Hacienda} + \text{electricidad planta}$$

$$\text{Producción de biogas (P)} = \text{Materia recolectada} * a$$

$$\text{Electricidad generada} = P * b$$

4. Comparación si la estimación de la electricidad generada será similar a la electricidad necesaria.
5. Elección del caudal de alimentación para la producción de biogás. Valor escogido de acuerdo a la materia recolectada.
6. Planteamiento de los balances de materia. Calcular el caudal total, el caudal de la composición y la fracción másica de cada corriente.
7. Plantamiento del balance de energía
8. Elección de material y capacidad del biodigestor y demás equipos.
9. Estimación de la producción de biogás y de la generación de energía

Gasómetro

1. La forma del gasómetro es un cilindro
2. Volumen de producción de biogás = 13,234 m³
3. Volumen de almacenamiento

$$V = 13,234 + (13,234 * 0,1)$$

El valor de 0,1 es un factor de seguridad por trabajar con gases

4. Diámetro es igual a 3 según las especificaciones.

5. Área de la base:

$$\text{Área de base} = \pi * (3/2)^2$$

6. Altura gasómetro:

$$\text{Altura} = \text{Área base} / \text{diámetro}$$

Biodigestor

1. Una vez que se conozca el tipo de materia prima a procesar se puede elegir el tipo de biodigestor.
2. Elección del tipo de material a usar. El material debe ser impermeable al biogás, resistente a los ácidos orgánicos y a rayos UV.
3. Conocer las condiciones del proceso, principalmente la temperatura. Elección del proceso psicrófilicos (10-25°C), mesófilicos (25 a 40 °C), termófilicos (40 a 55 °C).
4. Para dimensionar se debe conocer la carga diaria al biodigestor y el tiempo de retención hidráulica

$$\text{Carga biomasa diaria} = \text{estiercol diario} + \text{cant. agua}$$

$$TRH = 15 \text{ días}$$

$$\text{Volumen biodigestor} = \text{cant. carga diaria} * THR$$

$$V[m^3] = Q[m^3/día] * THR[días]$$

Con el volumen del biodigestor se busca las dimensiones restantes tabuladas.

Torre de absorción

1. La capacidad de la torre se calcula a partir del balance de masa de la absorción.
Se suma los volúmenes de cada componente de la corriente de salida y de entrada: óxido férrico, agua, biogás crudo y sulfuro de hierro.
2. La altura total de la torre es la suma de la altura para el sistema para esparcir el absorbente, la altura de empaquey la altura para la salida de componentes.
3. Área de base:

$$\text{Área de base} = \frac{\text{Capacidad}}{\text{Altura total}}$$

4. El diámetro del cilindro:

$$D = \left(\frac{\text{Área base}}{\pi} \right)^2 * 2$$

Estudio económico de la planta

1. Definición del tipo de planta a diseñar, ya sea de escala grande o pequeña, ya que los porcentajes de costos varían dependiendo el tamaño del proyecto.
2. **Cálculo de la inversión de capital fijo**, es la sumatoria de ISBL, OSBL, costos de ingeniería y de contingencia:

Costos ISBL. Buscar en referencias un costo aproximado de un equipo similar al diseñado. La sumatoria de los costos de quipos es el valor del ISBL

Costos OSBL

$$OSBL = 0,2 * ISBL$$

Costos ingeniería y construcción

$$\text{Costos ing.} = 0,1 * (ISBL + OSBL)$$

Costos de contingencia

$$\text{Costos contingencia.} = 0,1 * (ISBL + OSBL)$$

3. **Cálculo de costos de producción:**

Costo variable (VCOP):

1. Materia prima adquirida mensualmente

$$\text{Materia prima} = \text{Costo materia} * \text{cant. materia mensual}$$

2. Servicio de electricidad

$$\text{Electricidad} = \Sigma \text{Potencia equipos} * \text{horas trabajo} * \text{costo electricidad}$$

3. Otros aspectos a considerar es embalaje y transporte del producto, eliminación de efluentes.

Costos fijos (FCOP):

1. Laboral de operación. Número de personal por salario mensual.
2. Salario supervisión. Salario mínimo más honorarios
3. Mantenimiento de material y de equipos.

$$\text{Mantenimiento} = 0,03 * \text{ISBL}$$

4. Sumatoria de todos los puntos anteriores se tiene un total de costos fijos por mes y se calcula el valor anual.

4. Cálculo costos capital de trabajo:

1. Inventario de materia prima para dos semanas de producción

$$\text{Inventario materia} = 2 * (\text{Costo materia semanal} * \text{cant. materia prima})$$

2. Efectivo en caja por una semana de producción

$$\text{Efectivo} = (\text{VCOP} + \text{FCOP})/4$$

De igual manera se divide para 4 porque los COP están calculados por mes.

3. Crédito de cuentas pendientes se estima como el costo de la materia prima mensual.

$$\text{Crédito} = \text{Costo materia prima} * \text{cant. materia}$$

4. La sumatoria de todos los puntos anterior da el total de capital de trabajo semanal.

5. Ahorros e ingresos

1. Ahorros:

$$\text{Electricidad} = 600 * 12$$

$$\text{Fertilizantes} = (200 * 25 * 2) * 0,6 * 12$$

$$\text{Tratamiento sólidos} = 2000 * 12$$

$$\text{Transporte} = 12000$$

Los gastos mensuales en electricidad, fertilizantes, tratamiento de sólidos y transporte son otorgados por el dueño de la Hacienda. Cabe recalcar que por cada hectárea se coloca 200 kg de fertilizante 2 veces al mes.

2. Ingreso:

$$\text{Crédito} = 10000 * 0,6 * 12$$

La cantidad de fertilizante destinado a la venta se calcula en el balance de masa.

Se suma ambos valores de ahorros e ingresos, que será el considerado como los ingresos netos anuales.

6. Cálculo flujo de caja

$$\text{Beneficio Bruto} = \text{ventas} - \text{COP}(\text{variable} + \text{fijos})$$

Costo total de producción (TCOP)

$$\text{TCOP} = \text{CCOP} + \text{ACC}$$

Donde CCOP son los costos variables y fijos y ACC es el cargo capital anual

Tiempo de recuperación se estima con la ecuación

$$\text{Tr} = \frac{\text{FCOP} + \text{capital trabajo}}{\text{Beneficio neto}}$$

En el flujo de caja se considera los siguientes datos:

- Ingresos (Ahorros + Ingresos)
- Egresos (VCOP + FCOP)

- Inversión (solamente en el año 0)
- Gastos fijos (Capital de trabajo)
- Flujo neto (Ingresos – Egresos – Gastos Fijos)
- Saldo (Flujo neto + Saldo anterior)

Determinar el año de recuperación y el año desde que se empieza a tener ganancias.

VAN, se considera la tasa de interés dado por el banco o financista y selecciona los datos del flujo de caja.

$$VAN = \text{función VAN} - \text{capital fijo}$$

Si este valor es mayor a cero se puede decir que el proyecto es rentable

TIR, hace referencia a la tasa de interés; seleccionar los datos del flujo de caja

$$TIR = \text{función TIR}$$

ANEXO H: FOTOS HACIENDA SAN ANTONIO



