



Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Tucumán
Escuela de Posgrado

RECUPERACION DEL CO₂ DE UNA DESTILERÍA DE ETANOL DE MAÍZ

Trabajo Final Integrador para Optar al Grado Académico Superior de
Especialista en Ingeniería Bioenergética

Licenciado en Química Agustín Javier del Valle Paz

Tutor: Dr. Antonio Mario Fortuna

SAN MIGUEL DE TUCUMAN

AÑO 2020

RESUMEN

Este trabajo propone la recuperación de dióxido de carbono (CO₂) generado durante el proceso productivo de obtención de etanol de maíz, en la destilería de la empresa Trigotuc ubicada en Santiago del Estero, utilizando tecnología económicamente viable y ambientalmente amigable. Con la recuperación y almacenamiento de este gas, se evitaría que aproximadamente 3.518,173 toneladas (t) anuales del mismo sean expulsadas a la atmósfera, contribuyendo así a la reducción del fenómeno de efecto invernadero y al calentamiento global. Además del beneficioso aporte al cuidado del ambiente, la comercialización de este coproducto derivado de la fermentación alcohólica, aportará beneficios a la empresa y a la región, lo que hace que este proyecto integre beneficios sociales y económicos.

Para llevar a cabo esta propuesta, se hicieron estudios por etapas, siguiendo de forma ordenada la metodología de estudio.

En primer lugar se investigó sobre las características del proceso productivo y los antecedentes de la planta industrial que se propone.

A continuación, se caracterizaron los equipos tecnológicos que capturarán y recuperarán al CO₂ y las necesidades técnicas para la instalación de los mismos.

En tercer lugar, y teniendo las bases de lo que se necesita, se investigó a las empresas internacionales capaces de proveer esta tecnología, con los costos de adquisición, instalación y asesoramiento técnico.

Por último, se realizó un estudio económico del mercado local y regional para la comercialización del CO₂ recuperado.

Palabras Claves: Dióxido de Carbono, fermentación, etanol.

INDICE

1.INTRODUCCION	3
2.OBJETIVO GENERAL.....	5
3. OBJETIVO ESPECIFICO.....	5
4.MARCO TEORICO.....	6
5.PROUESTA PARA EL MEDIO LOCAL.....	8
6. OBTENCION DE ETANOL A PARTIR DE MAIZ.....	9
7. LA FERMENTACION ALCOHOLICA.....	13
8. BALANCE ENERGETICO DE LA REACCION DE FERMENTACION ALCOHOLICA.....	14
9.PLANTA DE RECUPERACIÓN DE CO ₂	16
10.MEDIDAS DE SEGURIDAD AL TRABAJAR EN PLANTAS PRODUCTORAS DE CO ₂	25
11.USOS DEL CO ₂	26
12.FACTIBILIDAD Y EVALUACION DE PROYECTO.....	28
13.OFERTA COMERCIAL DE LA EMPRESA MOS.....	29
14.CONCLUSIONES.....	31

1. INTRODUCCION

La Tierra, como todo cuerpo caliente superior al cero absoluto, emite radiación térmica, pero al ser su temperatura mucho menor que la solar, emite radiación infrarroja por ser un cuerpo negro (Benavides Ballesteros, 2007). La energía infrarroja emitida por la Tierra es atrapada en su mayor parte en la atmósfera y reenviada de nuevo a la Tierra. Este fenómeno se llama Efecto Invernadero y es un fenómeno atmosférico natural que permite que nuestro sea un lugar adecuado para que la vida exista en él. De esta forma se mantiene una temperatura agradable en el planeta, al retener parte de la energía que proviene del sol (Caballero, 2007).

A través de las actividades humanas, se liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera, a un ritmo mayor al que se puede absorber. Éstas actividades han perturbado la cantidad global del carbono, aumentando, en forma lenta pero continua el CO₂ en la atmósfera, como así también otros gases de efecto invernadero (GEI).

Las moléculas de los GEI tienen la capacidad de absorber y re emitir las radiaciones de onda larga (radiación infrarroja, eminentemente térmica) que provienen del sol y la que refleja la superficie de la Tierra hacia el espacio, controlando el flujo de energía natural a través del sistema climático. El clima debe de algún modo ajustarse a los incrementos en las concentraciones de los GEI, que genera un aumento de la radiación infrarroja que es absorbida por éstos en la capa inferior de la atmósfera (la tropósfera), en orden a mantener el balance energético de la misma. Este ajuste generará un cambio climático que se manifestará en un aumento de la temperatura global y generará un aumento en el nivel del mar, cambios en los regímenes de precipitación y en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (tales como tormentas y huracanes), ascenso en el nivel del mar; desaparición de bosques; extinción de organismos y presentará una variedad de impactos sobre diferentes componentes, tales como la agricultura, los recursos hídricos, los ecosistemas, la salud humana, entre otros.

El CO₂ se libera y se absorbe continuamente en diferentes procesos en el ciclo atmosférico continuo, como la fotosíntesis, la fermentación y la putrefacción, manteniendo el efecto invernadero en un nivel constante (Benavides Ballesteros, 2007). El aumento en la cantidad de dióxido de carbono debido a la combustión de

combustibles fósiles perturba este ciclo atmosférico, produciendo que haya menos energía de onda larga saliendo al espacio en las longitudes de onda en las que absorbe el dióxido de carbono.

La captura, utilización y almacenamiento de CO₂ a través de un conjunto de tecnologías acorde, buscan evitar la emisión a la atmósfera del CO₂ que se genera en los procesos industriales. El sistema a emplear consta de tres etapas: en primer lugar es necesaria la separación del CO₂ de otros productos, a continuación se requiere el proceso de recuperación y tratamiento, para luego realizar la compresión para su transporte a destino final.

2. OBJETIVO GENERAL

- Recuperar y reutilizar el CO₂ que se elimina en los procesos de fermentación para disminuir la concentración de los GEI en la atmósfera.

3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar un estudio bibliográfico sobre los aspectos teóricos que caracterizan el sistema objeto de estudio.
- Proponer una planta de recuperación de CO₂ para una destilería que procesa aproximadamente 40 toneladas de maíz por día, llegando a obtenerse unas 30 toneladas de almidón por maceración.
- Caracterizar los equipos necesarios para instalar una nueva planta conociendo las características del proceso productivo y los antecedentes de la planta instalada anteriormente.
- Analizar los costos de instalación de una planta acorde al tamaño de la producción de la destilería.
- Evaluar la posibilidad de comercialización del CO₂ recuperado, haciendo un estudio de mercado local y regional.
- Evaluar desde el punto de vista técnico-económico la tecnología seleccionada y la posibilidad de licitar posibles tecnologías en el mercado internacional.

4. MARCO TEORICO

4.1 Impactos medioambientales del CO₂

El fenómeno denominado efecto invernadero, debe su nombre al mismo principio científico que permite el cultivo de plantas todo el año en invernaderos. Se basa en que el calor emitido por el sol es retenido dentro de la atmósfera. Este efecto, en condiciones normales, es imprescindible ya que de no producirse, las temperaturas del planeta serían muy bajas haciendo muy difícil nuestra supervivencia. Algunos gases, como el CO₂, incrementan demasiado la retención de calor en la atmósfera y como consecuencia dan lugar a un sobrecalentamiento global, con consecuencias negativas en el clima mundial y la vida en todo el planeta.

Aunque el clima de la Tierra es dinámico, en el último siglo el ritmo de estas variaciones se aceleró, dando lugar a cambios muy marcados. Una de las causas se debe a la excesiva concentración de GEI. Por ejemplo, la temperatura media global ha aumentado en 0,6 °C durante el siglo XX y se cree que el aumento será de entre 1 y 5 °C en el siglo XXI, aumentando la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos más extremos.

A nivel del medio marino este sobrecalentamiento global influye en el deshielo del permafrost y los grandes casquetes glaciares. Se calcula que durante el siglo XXI, el nivel del mar aumentará entre 9 y 88 cm, dependiendo de la localización. Además, aumentarán los fenómenos de erosión y salinización en áreas costeras. Muchos arrecifes de coral, pierden su coloración y mueren, afectando especies que los usan en su alimentación (Sánchez, 2019)

4.2 El impacto del CO₂ sobre la biodiversidad

Muchas especies se desplazarán hacia latitudes más frías, buscando aquellos climas para los que están mejor adaptados, o cambiarán sus rutas migratorias en la búsqueda de alimento. Todas aquellas especies que no puedan desplazarse, y no sean capaces de adaptarse, corren el riesgo de extinguirse. Recientemente, se ha visto que las plantas incrementan su crecimiento conforme aumenta la concentración de CO₂. Sin embargo, a niveles muy elevados de CO₂, la saturación del aparato

fotosintético es mayor, por lo que el crecimiento no se producirá, o incluso disminuirá. Aunque no es un fenómeno totalmente comprobado (Sánchez, 2019)

4.3 Investigaciones realizadas

Las propiedades de efecto invernadero del CO₂ se conocen desde hace más de un siglo desde que John Tyndal en 1861 publicó resultados experimentales en los que identificaba al CO₂ como un gas que absorbía radiación térmica (radiación de onda larga). Desde entonces, las propiedades absorbentes del CO₂ han sido determinadas de forma mucho más precisa a lo largo de décadas de mediciones en laboratorios (Herzberg 1953, Burch 1962, etc).

En la actualidad una importante mayoría de la comunidad científica está de acuerdo en que el calentamiento global es debido a un aumento de la concentración de GEI en la atmósfera, generando más calor y aumento de la temperatura del planeta lo que significa un mayor efecto invernadero.

El fenómeno del calentamiento global es más complejo de lo que parece, existiendo una relación directa entre el aumento progresivo de la cantidad de CO₂ con el aumento progresivo de las temperaturas promedio en el planeta (Instituto Scripps de Oceanografía, 2014). En 1970, la NASA envió al espacio el satélite IRIS, que medía el espectro infrarrojo entre 400 cm⁻¹ y 1600 cm⁻¹. En 1996, la Agencia Espacial Japonesa lanzó el satélite IMG, que registró observaciones similares. Ambos conjuntos de datos fueron comparados para identificar los cambios en la radiación saliente durante un periodo de 26 años (Harries, 2001).

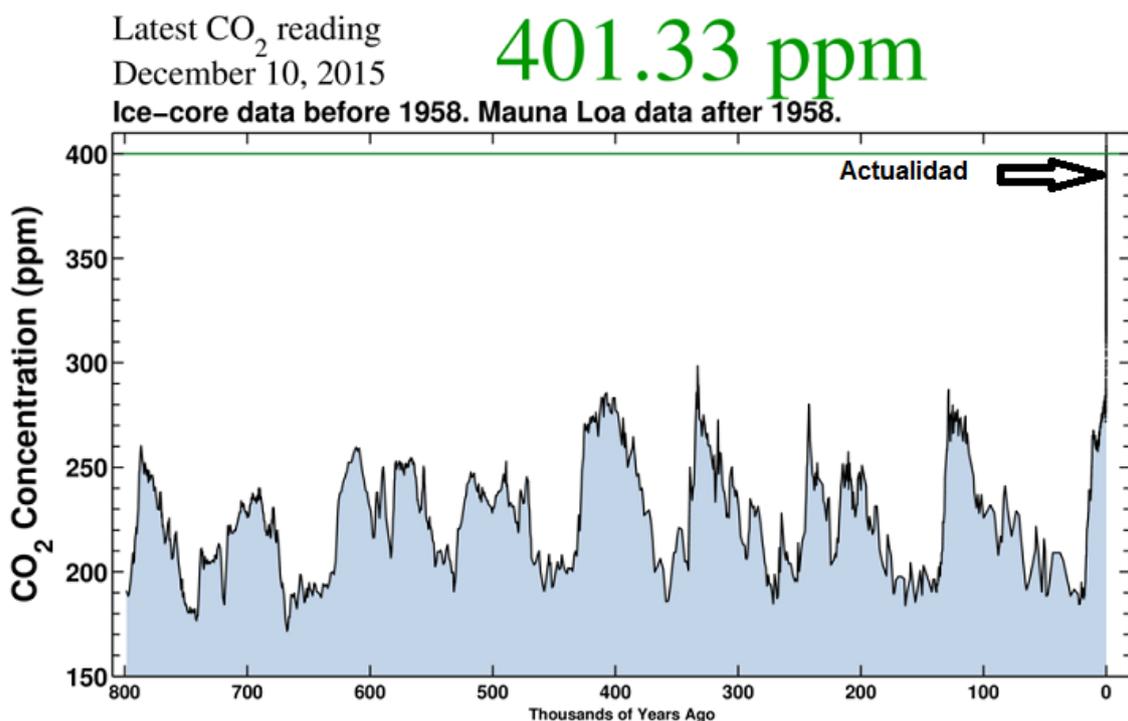
Lo que encontraron fue un descenso en la radiación saliente en las longitudes de onda en las que los gases de efecto invernadero como CO₂ y metano (CH₄) absorben energía. El cambio en radiación saliente es consistente con las predicciones teóricas. Por tanto, el artículo identificó "evidencia experimental directa de un aumento significativo en el efecto invernadero terrestre".

Este resultado ha sido confirmado por artículos posteriores utilizando datos de satélite más recientes. Los espectros de 1970 y 1997 fueron comparados con datos adicionales del satélite NASA AIRS lanzado en 2003 (Griggs, 2004). Este análisis fue extendido hasta 2006 utilizando datos del satélite AURA lanzado en 2004 (Chylek, 2007). Ambos artículos encontraron las diferencias observadas en bandas de CO₂

que corresponden a lo esperado debido al aumento de la concentración de CO₂. Por tanto, existe evidencia empírica de que el aumento en CO₂ produce un incremento en el efecto invernadero.

En Abril de 2014 el Instituto Scripps de Oceanografía, que se encarga de medir regularmente los niveles de CO₂ en la atmósfera, reveló que por primera vez en toda la historia de la humanidad la concentración promedio de CO₂ superaba las 400 partes por millón (ppm). Esta es la mayor concentración de este gas en la Tierra desde al menos hace 800.000 años.

En términos de porcentaje, representa un 0,04 % de la concentración de la atmósfera. No parece mucho en términos absolutos, pero si se considera que durante un siglo se aumentó la concentración de CO₂ hasta niveles de 30 mil millones de toneladas y que eso representa 100 veces más que todas las erupciones volcánicas ocurridas hasta la fecha, entonces 400 partes por millón parece una cifra relevante (Palomas, 2015).



**Cambio de la cantidad de CO₂ en 800.000 años
(Imagen tomada del Instituto Scripps de Oceanografía en San Diego)**

Figura 1: Concentración de CO₂ en la atmosfera. Fuente: Instituto Scripps de Oceanografía de San Diego

5. Propuesta para el medio local

En el norte argentino se cuenta con numerosas empresas que utilizan el proceso de fermentación para obtener principalmente alcohol de caña de azúcar y alcohol de maíz. Esto conlleva a que grandes cantidades de CO₂ sean expulsadas a la atmósfera contribuyendo al sobrecalentamiento global y a la reducción de la calidad de vida de los habitantes locales debido a la contaminación.

Ante este contexto, esta propuesta espera capturar con las tecnologías necesarias, el CO₂ producido de la fermentación y reutilizarlo comercialmente en la región, incentivando el uso de las energías limpias y generando conciencia ambiental. Se espera que, al estudiar los costos de montaje de la planta, producción y comercialización, se obtenga una considerable ganancia económica con las ventas del coproducto.

A continuación se describe el proceso de obtención de etanol de maíz realizado por la destilería de la empresa Trigotuc ubicada en Santiago del Estero.

6. Obtención de etanol a partir de maíz

La producción de etanol es un ejemplo de cómo la ciencia, la tecnología, la agricultura y la industria deben trabajar en armonía para transformar un producto agropecuario en combustible.

El proceso de producción de etanol ha sido inmensamente refinado y actualizado en años recientes ganando en eficacia. El proceso de producción varía ligeramente para cada uno de los tres usos principales del etanol –bebidas, industria y combustible-, aunque los pasos principales son los mismos.

Para la producción de etanol a partir de maíz hay dos métodos primarios: la molienda seca y la molienda húmeda. La mayoría del etanol producido en los EE.UU. proviene del proceso de molienda seca.

Ambos procesos incluyen esencialmente los mismos pasos: el preparado del feedstock; la fermentación de los azúcares simples, recupero del alcohol y de los subproductos que van generándose en el proceso. La diferencia se encuentra en la preparación del grano para la molienda y la posterior fermentación.

La elección de uno u otro sistema de producción implica la obtención de un determinado conjunto de derivados o subproductos. Del proceso de molienda seca

además del etanol, se obtienen los granos destilados secos con solubles (DDGS) que son un alimento de alta calidad para el ganado.

Del proceso de molienda húmeda junto con el etanol se obtiene: aceite de maíz, gluten feed y gluten meal. Estos últimos también se utilizan como alimento para animales.

Molienda seca

La molienda seca es un proceso de producción para extraer el almidón contenido en el maíz, ampliamente aceptado en la industria del etanol puesto que comparativamente con el proceso de molienda húmeda, tiene menores requerimientos de capital tanto al momento de construir como de operar la planta.

Los avances de la tecnología aplicada al proceso de molienda seca han hecho que en la actualidad la conversión del maíz en etanol sea mucho más eficaz y productiva que en la primera generación de plantas de molienda seca que operaban en la década del '80. Se han reducido en forma considerable los requerimientos de energía; se incorporaron sofisticados procesos de automatización; las enzimas disminuyeron su costo a su vez que vieron incrementado su poder de conversión, logrando con ello menores tiempos de procesamiento y el desarrollo de cedazos moleculares, todos factores que han contribuido a disminuir los costos y aumentar el volumen de etanol obtenido.

El costo de construir una planta de etanol de molienda seca se redujo en un 25-30%, mientras el costo de producción casi un 50% en los últimos 20 años. Muchas plantas se han integrado verticalmente, anexando explotaciones de feedlots, tambos, o en algunos casos la explotación comercial de peces aprovechando el sistema de reciclaje de las aguas usadas en la planta.

Los 8 pasos principales en la producción de etanol bajo este proceso son los siguientes:



Diagrama 1: Etapas de la producción de etanol a partir de maíz

- I) **Molienda:** El proceso de molienda seca comienza con la limpieza del grano de maíz (puede ser cebada, trigo o sorgo), que una vez limpio pasa a través de los molinos que lo muelen en un polvo fino –harina de maíz-.
- II) **Licuefacción:** La harina de maíz se sopla en grandes tanques donde se la mezcla con agua y las enzimas –amilasa alfa- y pasa a través de las cocinas donde se licueface el almidón. A la mezcla se le agregan componentes químicos para mantenerla con un pH de 7. En esta etapa se aplica calor para permitir la licuefacción, en una primera etapa a alta temperatura (120-150°C) y luego a temperatura más baja (95°C). Estas altas temperaturas reducen los niveles de bacterias presentes en el mosto.
- III) **Sacarificación:** El mosto de las cocinas luego es refrescado –a una temperatura levemente debajo del punto de ebullición del agua- y se le agrega una enzima secundaria –glucoamilasa- para convertir las moléculas del almidón licuado en azúcares fermentables –dextrosa- mediante el proceso de sacarificación. Las enzimas funcionan como catalizadores para acelerar los cambios químicos.
- IV) **Fermentación:** El etanol es producto de la fermentación. Al mosto se le agrega levadura para fermentar los azúcares –cada molécula de glucosa produce dos

moléculas de etanol y dos de dióxido de carbono- y con ello obtener el etanol y el dióxido de carbono. Usando un proceso continuo, el mosto fluirá a través de varios fermentadores hasta que fermente completamente. En este proceso el mosto permanece cerca de 48 horas antes que comience el proceso de destilación. En la fermentación, el etanol conserva mucha de la energía que estaba originalmente en el azúcar, lo cual explica que el etanol sea un excelente combustible.

- V) **Destilación:** El mosto fermentado, ahora llamado cerveza, contendrá alcohol en un porcentaje cercano al 15%, agua en un 85%, y todos los sólidos no fermentables del maíz y de la levadura. El mosto entonces será bombeado a un flujo continuo, en el sistema de la columna de destilación, donde la cerveza se hierve, separándose el alcohol etílico de los sólidos y del agua. El alcohol dejará la columna de destilación con una pureza del 90 al 96%, y el mosto de residuo, llamado stillage, será transferido de la base de la columna para su procesamiento como subproducto.
- VI) **Deshidratación:** El alcohol pasa a través de un sistema que le quita el agua restante. La mayoría de las plantas utilizan un tamiz molecular para capturar las partículas de agua que contiene el etanol al momento de salir del sistema de destilación. El alcohol puro, sin el agua, se lo denomina alcohol anhidro.
- VII) **Desnaturalizado:** El etanol que será usado como combustible se debe desnaturalizar con una pequeña cantidad de algún producto, como nafta (2-5%) para hacerlo no apto para el consumo humano.
- VIII) **Obtención de los subproductos subproductos:** Hay dos subproductos principales del proceso: el CO₂ y los granos destilados. El CO₂ se obtiene en grandes cantidades durante la fermentación. Muchas plantas lo recogen, lo limpian de cualquier alcohol residual, lo comprimen y lo venden para ser usado como gasificante de las bebidas o para congelar carne. Los granos destilados, húmedos y secos, se obtienen del stillage, el cual se centrifuga para separar los sólidos suspendidos y disueltos. Un evaporador se utiliza para concentrar los sólidos suspendidos y disueltos y después se envían a un sistema de secado para reducir el contenido de agua a aproximadamente un 10/12%. Los DDGS contienen el núcleo del maíz menos el almidón. Algunas plantas también elaboran un jarabe que contiene algunos de los sólidos que pueden ser comercializados juntos o en forma independiente de los granos destilados.

7. La fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso que permite degradar azúcares en alcohol y dióxido de carbono. La conversión se representa mediante el mecanismo de conversión de Gay Lussac:



Ecuación 1: Fermentación de un mol de glucosa

El CO₂ se produce en los primeros cuatro días de fermentación cuando la misma es más vigorosa, y los microorganismos (levaduras) están consumiendo los azúcares disponibles en las etapas de cocimiento para producción de alcohol, energía, CO₂ y crecimiento de biomasa.

Las principales responsables de esta transformación son las levaduras. La *Saccharomyce scerevisiae*, es la especie de levadura usada con más frecuencia. Por supuesto que existen estudios para producir alcohol con otros hongos y bacterias, como la *Zymomonas mobilis*, pero la explotación a nivel industrial es mínimo.

A pesar de parecer a nivel estequiométrico, una transformación simple, la secuencia de transformaciones para degradar la glucosa hasta dos moléculas de alcohol y dos moléculas de CO₂ es un proceso muy complejo, pues al mismo tiempo la levadura utiliza la glucosa y nutrientes adicionales para reproducirse. Para evaluar esta transformación, se usa el rendimiento biomasa/producto y el rendimiento producto/substrato.

- Rendimiento biomasa/substrato (Y_{x/s}): es la cantidad de levadura producida por cantidad de substrato consumido.
- Rendimiento producto/substrato (Y_{p/s}): es la cantidad de producto sintetizado por cantidad de substrato consumido.

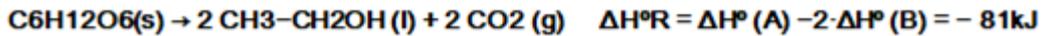
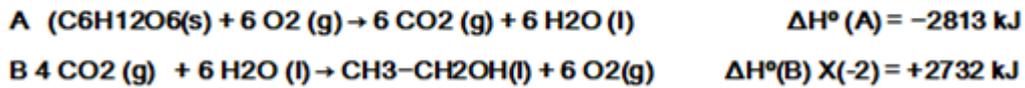
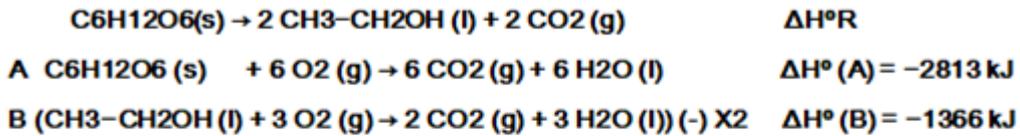
El rendimiento teórico estequiométrico para la transformación de glucosa en etanol es de 0,511 g de etanol y 0,489 g de CO₂ por 1 g de glucosa. Este valor fue cuantificado por Gay Lussac. En la realidad es difícil lograr este rendimiento, porque como se señaló anteriormente, la levadura utiliza la glucosa para la producción de otros metabolitos. El rendimiento experimental varía entre 90% y 95% del teórico, es decir, de 0,469 a 0,485 g/g. Los rendimientos en la industria varían entre 87 y 93% del rendimiento teórico (Boudarel 1984 en Puertas Zeta, 2018). Otro parámetro importante es la productividad (g/h/l), la cual se define como la cantidad de etanol producido por unidad de tiempo y de volumen.

Los parámetros aquí mencionados se definen con relación a la fase y al modo de funcionamiento del biorreactor o fermentador. Por lo general, un biorreactor es un recipiente cilíndrico de doble pared, de vidrio o de acero inoxidable (para el control de la temperatura y esterilización en línea), cubierto de una platina de acero inoxidable. La platina está dotada de entradas y salidas que permiten agregar substratos, nutrientes y sustancias como ácidos o bases, extraer productos, o bien, hacer mediciones en línea. La platina permite acoplar un sistema de agitación para mantener la homogeneidad y facilitar, en su caso, la transferencia de oxígeno y nutrientes.

El Biorreactor es el elemento central para la realización de la fermentación alcohólica. Existen diversas opciones para disponer de esta tecnología; por ejemplo, construir una instalación simple hasta la adquisición de una instalación completa con especificaciones técnicas adecuadas a las características concretas del proceso. Entre estas dos opciones existen múltiples posibilidades caracterizadas por diferentes precios, volúmenes, tecnologías, modos de funcionamiento (discontinuo, fedbatch, continuo, cascada), etc. (Monte et al., 2003), (Bailey et al., 1986). La elección depende de los recursos económicos disponibles y del interés por desarrollar una tecnología propia.

8. Balance energético de la reacción de fermentación alcohólica

A partir del calor de combustión de la glucosa y del etanol podemos obtener por la ley de Hess el calor de reacción de la fermentación alcohólica.



Ecuación 2: Calor de reacción para un mol de glucosa

La evaluación térmica de los procesos es imprescindible para un diseño seguro del proceso y de las instalaciones en las que se lleva a cabo. En este caso con el calor de reacción total para la masa considerada (23189,82 Kg de glucosa) se establece el caudal de agua de refrigerio que debe recircular por la camisa de enfriamiento de la cuba de fermentación (para este caso un caudal de 130.000 Kg/ h). Con estos datos se define también el diseño de la torre de enfriamiento y que bomba se utilizará.

9. PLANTA DE RECUPERACIÓN DE CO₂

La planta de recuperación de CO₂ tiene en la actualidad una gran demanda de industrias de producción de etanol, refrescos, cervecerías y muchos más sectores relacionados para el suministro de agua dulce y agua de alimentación de calderas.

Para realizar este proyecto, se requirió información de la empresa MOS TECHNO ENGINEERS de la ciudad de Mumbai (India) que proporcionó la propuesta adecuada para lo solicitado. La fabricación y el proceso continuo de la planta sugerida cumplen con los estándares internacionales y cuenta con costos de operación económica, que se logra mediante tecnologías innovadoras y garantizadas. La capacidad de recuperación máxima de CO₂ de la planta que ofrece la empresa es de un 99,9%.

La planta de recuperación de CO₂ comprenderá principalmente de equipos como:

- Globo de CO₂
- Módulos de purificación con trampas de espuma.

- Secadoras / Deshidratadores
- Torres de Desodorización
- Recipientes a presión refrigerados de CO₂
- Condensadores de licuefacción
- Tanque de almacenamiento de gas CO₂
- Vaporizador de CO₂

9.1 ETAPAS DE LA RECUPERACION DE CO₂

La recuperación para la reutilización del CO₂ es un proceso que consta de varias etapas que se señala a continuación:

I) Alimentación de CO₂ al sistema

II) Purificación y Limpieza

III) Compresión

IV) Desodorización

V) Secado

VI) Licuefacción de CO₂

VII) Extracción de NO_x

VIII) Almacenamiento



Diagrama 2: Etapas para la recuperación de CO₂

9.2 Descripción de las etapas

I) Alimentación de CO₂ al sistema.

En primer lugar se debe proporcionar la incorporación continua necesaria de CO₂. Para este propósito se utiliza un ventilador de refuerzo de 800 kg/ hora.

El ventilador operará a presión de succión positiva, con prevención de la formación de un vacío y la posibilidad de entrada de aire. El soplador, con sus controles especiales, permite que la presión de fermentación se mantenga constante.

El gas crudo producido a partir de los fermentadores ingresa al sistema en el cual el gas se alimenta en una trampa para eliminar la espuma.

Este sistema contará con:

- Control de frecuencia variable
- Motor eléctrico
- Manómetro, termómetro, transmisor de presión, válvulas y válvula de seguridad.

Trampas de espuma

Unos de los inconvenientes habituales de la fermentación es la espuma que se encuentra en los fermentadores y que proviene principalmente de azúcares y de proteínas desnaturalizadas. Para que el CO₂ tenga las condiciones requeridas, se debe eliminar esta espuma mediante trampas.

Estas trampas de espuma son recipientes con boquillas de aspersion dirigidas por agua corriente para derribar cualquier espuma que pueda remontarse de los recipientes de fermentación.

La instalación recomendada utiliza dos trampas de espumas horizontales; una trampa de ventilación y una trampa de espuma de recolección de CO₂, unidas a varios recipientes de fermentación. Esta disposición permite que el CIP (*cleaning in place*) de la tubería de ventilación / recolección de CO₂ de cada recipiente de fermentación sea parte de la operación normal de CIP del fermentador. También se deben proporcionar boquillas CIP separadas en las trampas de espuma. El CIP de la trampa de espuma solo debe iniciarse cuando todos los fermentadores están aislados de las trampas de espuma.

Por razones de seguridad, se recomienda que se instalen dos válvulas de drenaje automáticas independientes en la línea de drenaje de la trampa de espuma para garantizar que el CO₂ no se ventile a la habitación si una de las válvulas falla al abrirse.

II) Purificación y limpieza

Antes de la compresión, el CO₂ de baja presión debe pasar a través de un lavador de agua a contracorriente para eliminar las impurezas solubles en agua como el etanol.

Si se determina que hay aerosoles (similares a los azúcares) en el CO₂ de los recipientes de fermentación, se puede agregar un lavador de aerosoles al depurador para evitar que la válvula del compresor se ensucie y los costos de mantenimiento resultantes más altos.

El gas se introduce en la cadena / serie de sistemas de lavado con la ayuda de un ventilador de refuerzo. En el primer depurador el gas CO₂ se lava apropiadamente usando agua, luego se purifica con permanganato de potasio (KMnO₄) en una dosificación adecuada. El KMnO₄ es un fuerte oxidante de materia orgánica.

Con agua H₂O se purifica al gas de las siguientes sustancias:

- Alcohol
- Etileno (C₂H₄)
- Acetaldehído (C₂H₄O)
- Óxidos de nitrógeno

Con KMnO₄ se purifica al gas de las siguientes sustancias:

- Sulfuro de carbono (C₂S)
- Sulfuro de dimetilo (C₂H₆S)
- Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

III) Compresión

Luego de la purificación el siguiente paso es la compresión. Los procesos de compresión se refieren a incrementar la presión en un sistema dado para llevar a los gases a la presión adecuada para una reacción, nuestro objetivo será la reducción del volumen del gas CO₂ recuperado a una decimosexta parte del volumen original.

Normalmente el CO₂ se alimenta a los compresores utilizando compresores de refuerzos o un globo de almacenamiento de CO₂ de baja presión. Un globo de almacenamiento de CO₂ tiene la ventaja de permitir que los compresores principales funcionen a plena capacidad de forma on/off y que además es el modo de funcionamiento más barato.

Si se utilizan compresores de refuerzo, los compresores principales deberán funcionar parcial o totalmente descargados durante los periodos de menores tasas de generación de CO₂, lo que resultará en una menor eficiencia.

La compresión entonces se llevará a cabo en un proceso de dos etapas.

En la primera etapa de la compresión, el gas CO₂ se comprime y luego se enfría nuevamente en un enfriador intermedio.

En la segunda etapa de la compresión, el gas llega a la presión final deseada, un postenfriador reduce la temperatura del gas CO₂ que se elimina en el intermedio y en el postenfriador.

El compresor está equipado con un mecanismo que controla de manera automática la capacidad de compresión, cuyo objetivo será adecuar el canal de compresión de acuerdo al caudal de CO₂ producido, el apagado del sistema también será controlado por un mecanismo automático. El compresor cuenta también con un dispositivo de

seguridad, agua de refrigeración, aceite, control de presión, carga automática, descarga y sistema de control de capacidad.

El compresor a utilizar contará con:

- Tambor extraíble / tanque de compensación
- Enfriador intermedio de acero inoxidable 304 con separador de humedad
- Refrigerador posterior de acero inoxidable 304 con separador de humedad
- Motor eléctrico.
- Disposición de control de capacidad
- Manómetro, termómetro, presostatos, detector de temperatura resistivo (RTD), válvula de aislamiento.



Figura 2: Compresor de CO₂. Fuente: Manual gas carbónico unión

IV) Desodorización

El propósito de la desodorización es eliminar todo tipo de sustancias que no fueron excluidas en el dispositivo de purificación y que influyen en el olor y el sabor del producto final. La unidad propuesta ofrece un CO₂ totalmente inodoro. Para ello el gas CO₂ debe entrar en contacto con una gran cantidad de carbono activado especial, adecuadamente preparado para este tipo de procesos.

Después del compresor de CO₂, el gas pasa a través de una columna de desodorización que consta de dos recipientes (doble torre). El llenado del filtro de las torres será con carbón activado, en donde se removerán las impurezas quedando atrapadas en los poros de dicho medio por un proceso de adsorción.

El acetaldehído es uno de los principales compuestos que se busca evitar por su posible oxidación a ácido acético.

El desodorizador de doble torre reactivará con vapor, permitiendo que las torres funcionen en línea. Cuando una de las torres se reactive la otra torre de flujo procesará el CO₂.



Figura 3: Unidad de desodorizado y secado de gas. Fuente: Manual del gas carbónico Unión

V) Secado

A continuación hay que secar el CO₂ eliminado el vapor de agua de manera eficiente. Luego del paso por la torre de carbón activado el CO₂ es conducido a dos secadores con tamices moleculares, los cuales contienen sílica gel o alúmina activa, para eliminar el exceso de humedad.

En el secador se usará un desecante a punto de rocío, a una temperatura de -65 °C o menor, medido a presión atmosférica para secar el gas. Cualquier partícula de polvo que logre pasar será separada en el filtro posterior.

Tanto la sílica gel como la alúmina tienen la misma estructura, con una gran área superficial formada por tubos sumamente finos llamados capilares. Estos desecantes retienen la humedad debido a que las moléculas de agua se adhieren a las paredes internas de los capilares. Éste fenómeno se llama adsorción.

Los desecantes que trabajan bajo el principio de adsorción extraen además de la humedad, materia colorante y ácidos. La humedad e impurezas retenidas por el material adsorbente deben ser removidas, procediendo a regenerar la capacidad adsorbente de éste.

Esta planta ofrece operaciones completamente automáticas de reactivación, purga y ciclos de enfriamiento. Las torres se alternan automáticamente en un ciclo cronometrado con la torre fuera de corriente que se reactiva mientras la torre en corriente está procesando gas CO₂.

La regeneración se completa mediante un elemento eléctrico interno instalado en cada torre.

También el flujo de CO₂ pasará a través del sistema de licuefacción y la torre de no extracción. El gas comprimido se licúa en el condensador y luego se lo recoge para almacenamiento.

Esta unidad de secado también incluye:

- manómetros de tubería, válvulas, temperatura y presión.
- un prefiltro en el lado de entrada, lo que garantiza que el gas CO₂ sin gotas de líquido ingrese a los lechos de los tamices.
- un filtro de posterior en el lado de salida que remueve cualquier partícula de polvo colada del purificador y secador de gas CO₂, lo que garantiza el funcionamiento del condensador de CO₂ sin polvo.
- Controles PLC con indicador electrónico de humedad.
- indicador de flujo de CO₂.
- Válvulas de seguridad.

VI) Licuefacción de CO₂ con sistema de refrigeración

El requerimiento del proceso es licuar el vapor de CO₂ a -27°C, temperatura a la cual se convierte en CO₂ líquido. El equipo de licuefacción es del tipo de servicio pesado y está diseñado para un funcionamiento continuo.

En resumen en esta etapa hay dos sub-procesos principales:

- Refrigeración
- Licuefacción de CO₂

El primer sub-proceso principal se refiere al refrigerante utilizado para proveer energía para condensar el gas. En esta instancia se utiliza amoníaco (NH₃)

El segundo sub-proceso principal se refiere a la licuefacción propiamente dicha de CO₂ (mediante la evaporación del refrigerante), la eliminación de no-condensables por destilación, separación y purga del sistema y transporte del CO₂ líquido purificado de la planta de licuefacción al lugar de almacenaje.

Esta unidad cuenta además con:

- Preenfriador de CO₂:

Es un intercambiador de calor tipo carcasa de acero inoxidable para reducir la cantidad de humedad en el gas CO₂ antes de que ingrese al secador, el refrigerante se suministra desde el sistema refrigerante principal. Incluye también a un separador de humedad y un sifón de drenaje de agua y control necesario.

- Compresor refrigerante

El compresor de refrigeración cuenta con un motor eléctrico con válvula de control de capacidad incorporada, calentador de cárter, indicador de succión, descarga y aceite. Usa el amoníaco como refrigerante

- Condensador / receptor refrigerante

Es un intercambiador de calor tipo carcasa y con tubo refrigerado por agua. Cuenta con válvulas de agua reguladora de presión y válvulas de seguridad.



Figura 4: Unidad de licuefacción de CO₂. Fuente manual del gas carbónico unión

VII) Extracción de NOx

La eliminación de NOx se utiliza para reducir la concentración de entrada de NO₂ en el CO₂ del producto.

El equipo de eliminación de NOx consta de un absorbedor de doble torre que contiene cada uno un medio de eliminación de NO₂ y un filtro de medios aguas abajo. El CO₂ líquido se bombea a la parte superior de la torre de eliminación de NOx donde pasa a través de un difusor especialmente diseñado hacia abajo a través de un lecho de absorbente. Cuando se detecta una ruptura de NO₂ en la torre, la embarcación se desconecta, se despresuriza y el adsorbente se desecha. Posteriormente se recarga. Se instala un filtro en la salida del NO₂ en la torre de extracción para capturar cualquier material absorbente.

VIII) Almacenamiento

Por compresión y condensación, el volumen del gas se reduce hasta tal punto que el almacenamiento temporal de cantidades muy grandes de CO₂ demande poco espacio.

Este almacenamiento se realiza directamente en un tanque de 20 toneladas (t) a baja presión y baja temperatura, por un periodo de tiempo particular. A continuación se efectuará su distribución.

Debido a que el gas CO₂ es 1,5 veces más pesado que el aire, el tanque de CO₂ líquido presenta un riesgo de seguridad grave y posiblemente fatal en caso de una fuga importante. Por lo tanto, se recomienda que los tanques de almacenamiento de CO₂ líquido estén ubicados en el exterior y lejos de áreas de posible impacto.

En el caso de que un tanque de almacenamiento de CO₂ líquido deba ubicarse en el interior, debe estar encerrado en una habitación separada que esté provista de un sistema de ventilación de emergencia y monitores / alarmas de CO₂.

Especificación del tanque:

- Capacidad 50 toneladas métricas (Tm)

- Presión de diseño 24,0 kg / cm²
- Presión de trabajo 19 a 21 kg / cm²
- Temperatura de diseño - 45 °C hasta + 50°C
- Capacidad de transferencia de la bomba 12 m³/ h



Figura 4: Tanque de almacenamiento. Fuente: Manual del gas carbónico unión

10. MEDIDAS DE SEGURIDAD AL TRABAJAR EN PLANTAS PRODUCTORAS DE CO₂

10.1 Medidas de seguridad

Las medidas de seguridad se deben tener siempre en cuenta al operar y hacerle mantenimiento a la planta de CO₂. Cuando una máquina se detiene por trabajos de mantenimiento deberá ser desconectada de la toma eléctrica para prevenir cualquier puesta en marcha involuntaria. Se deben colocar las señales respectivas para prevenir que otros operadores enciendan la máquina. El montaje de pantallas de revestimiento, acoples y correas deben realizarse cuando la máquina esté operativa.

Se deberán despresurizar las tuberías y tanques antes de realizar cualquier trabajo de mantenimiento. Durante el trabajo en la planta de refrigeración será obligatorio el uso de guantes y máscaras de seguridad en caso de que exista riesgo de pérdida de amoníaco. Las fugas tienen que ser reparadas al momento de ser descubiertas.

Los compuestos químicos deben ser manejados y almacenados según lo requiera cada compuesto en específico.

10.2 Condiciones de seguridad mínima del CO₂

El estado natural del CO₂ en condiciones atmosféricas normales es gaseoso, incoloro, inodoro e insípido y por lo tanto difícil de ser detectado, a pesar de que una concentración significativa en el aire provoca escozor en nariz, ojos y boca. El valor límite umbral del dióxido de carbono se fijó en 5000 ppm.

La asfixia por causa de altas concentraciones de CO₂ es un peligro agudo, un 10% de CO₂ en el aire puede ser resistido sólo por pocos minutos.

El dióxido de carbono en estado gaseoso es 1,5 veces más pesado que el aire y se concentrará en el suelo, en pozos y ductos hasta tanto no estén bien ventilados. Debido a que el CO₂ por su peso desplaza el aire, se deben tomar ciertas precauciones a la hora de entrar a los conductos y contenedores a fin de evitar sofocaciones.

Cuando el CO₂ se almacena en los cilindros, sin importar la temperatura de estos, y se expulsa hacia la atmósfera se transforma rápidamente en nieve con una temperatura de -78,5°C, lo que puede ocasionar en caso de contacto con la piel desnuda un severo congelamiento.

11. USOS DEL CO₂

El CO₂ se utiliza en las siguientes industrias entre otras:

- Fábricas de bebidas gaseosas
- Cervecerías
- Aviación
- Equipos y procesos de soldadura
- Equipos e instalaciones contra incendios
- Invernaderos para el cultivo de vegetales
- Empaques de productos alimenticios
- En la industria tabacalera en la elaboración de cigarrillos “light”.

Análisis del mercado local para la comercialización de CO₂

La región del NOA cuenta con muchas industrias de producción de bebidas gaseosas por lo que este rubro será el principal destino del CO₂ recuperado. Entre las provincias

del norte que se destacan en esta rama comercial, se encuentran Tucumán, Salta y Santiago del Estero. Esta última creó, en estos últimos años, unas diez plantas nuevas de aguas gaseosas. El CO₂ requerido por estas provincias suelen exceder a las posibilidades de los proveedores locales, por lo que varias de estas plantas se abastecen con CO₂ de empresas productoras de la provincia de Buenos Aires.

Este escenario se muestra propicio para poder comercializar la totalidad del coproducto obtenido.

Cantidades de glucosa y CO₂ obtenidas en la destilería

Actualmente en la planta se incorporan 40 toneladas diarias de maíz, las cuales derivan de una producción estándar por día de etanol de 15.000 litros 100 % anhidro y con una densidad = 0,79 g/ml. Con este número se obtendrían 11.334 Kg de CO₂ (estequiométricamente). Teniendo en cuenta los venteos, se recuperará un 85 % de la cantidad estequiométrica. Esto provoca que 5000 l de agua de lavado se vayan a efluentes, quedando 9638,83 kg/día de CO₂ para envasar y vender. Con un precio en el mercado local de 0,14 dólares por Kg se podría obtener ganancias por un monto de 492.544,21 dólares anuales aproximadamente.

Mecanismo de Gay - Lussac para obtención de 15.000 l de alcohol anhidro con densidad de 0,79 gr /ml



Ecuación 3: Reacción de fermentación para la cantidad de glucosa producida en un día

La planta propuesta por la empresa MOS ofrece un 99,9 % de recuperación del gas. Como referencia se utiliza un valor real proporcionado por una cervecería de la región que arroja un 85% de rendimiento en la recuperación real de CO₂. Para este porcentaje y para la cantidad de glucosa fermentada se recuperaría unos **9.638,83 Kg/día de CO₂**, siendo la recuperación anual de unos **3.518.173 Kg (3.518,173 toneladas)**.

Emissiones de CO₂: es masa del gas emitido por año a la atmosfera

Se calcula que la emisión anual de la planta sin recupero es de 4.139.027 kg CO₂ / año, este es el resultado de un 85% de la masa producida de CO₂ por la fermentación de 23.189,82 Kg de glucosa.

Emisiones de CO ₂ por año a la atmósfera (sin captura)	Emisiones de CO ₂ por año a la atmósfera (con captura)
4.139.027 kg CO₂ / año	620.854 Kg CO₂ / año (= 4.139.027 Kg CO ₂ /año - 3.518.173 Kg CO ₂ / año)

Tabla 1: Emisiones de CO₂ por año

Cálculo de los moles kg de CO₂ que se evitan expulsar a la atmosfera

$$\begin{array}{l}
 44 \text{ Kg de CO}_2 \text{ ----- } 1 \text{ mol kg de CO}_2 \\
 3.518.173 \text{ Kg CO}_2 \text{ ----- } X = 79.958,477 \text{ moles kg de CO}_2
 \end{array}$$

La cantidad anual de moles Kg que no se expulsarán a la atmosfera es de 79.958,477 moles Kg de CO₂.

12. FACTIBILIDAD Y EVALUACION DE PROYECTO

Factores y productos

Los factores productivos son las mercancías o los servicios que consumen o utilizan las empresas en sus procesos de producción para producir otros bienes. La economía utiliza la tecnología para combinar factores productivos y obtener productos.

Los productos son los distintos bienes y servicios útiles resultantes de los procesos de producción. En este caso el producto es el dióxido de carbono recuperado

Para poder planificar la perspectiva económica del proyecto y justificar la correspondiente inversión, primero hay que obtener los costos totales de producción y los posibles beneficios que resulten de la venta del producto, en un periodo de tiempo a considerar.

Los costos de producción son la sumatoria del costo de la materia prima, el costo de la mano de obra directa y de los costos indirectos, según lo expresa la ecuación a continuación.

$$\text{CPP (Costos de producción)} = \text{MP (materia prima)} + \text{MOD (mano de obra directa)} + \text{CI (costos indirectos)}$$

Ecuación 4: costos de producción

13. OFERTA COMERCIAL DE LA EMPRESA MOS

Considerando que la producción diaria máxima de CO₂ que se puede obtener es de 11.339,8 Kg las dimensiones de la planta de recuperación del gas se deben adecuar para esa cantidad, para este requerimiento la empresa MOS TECHNO ENGINEERS de la ciudad de Mumbai (India) nos ofrece un sistema básico de planta completa de recuperación de CO₂ de grado alimentario de 12 toneladas por días (TPD). El precio total por diseño, ingeniería, fabricación y transporte cotizado por MOS, es de 276.000 USD dólares estadounidenses.

Precios de tanque de CO₂

El tanque de almacenamiento de CO₂ se cotiza por separado, el precio ofrecido por la empresa MOS para un tanque horizontal con aislamiento es de 32.700 USD.

Precios para contrato de tres ingenieros seniors

La empresa también no solicita el contrato de tres ingenieros seniors para poner en marcha la planta, los costos requeridos son los siguientes:

3 pasajes: 4500 USD.

Viáticos, honorarios y estadía por duración de un mes:

Estadía de treinta días: 5.000 USD.

Viáticos y honorarios: 30.000 USD.

Fletes y transporte interno

Cuando la planta y los equipos arriben a la Argentina necesitan ser transportados a la provincia de Santiago del Estero. El gasto estimado para esta etapa es de 3.000 USD.

Impuestos nacionales y provinciales

En cuanto a los impuestos nacionales y provinciales para importaciones de esta envergadura se estipula que una industria del medio debe abonar un 80% del total del de la compra.

Construcción civil y conexiones de servicio

Para las dimensiones de esta planta los precios manejados por empresas y colegios profesionales locales oscilan en los 50.000 USD.

Inversiones	Costos en dólares
Planta de recuperación	276.000
Tanque de CO ₂	32.700
Fletes y transporte interno	3.000
Contrato, pasajes y estadía 3 ingenieros seniors	39.500
Impuestos nacionales y provinciales (80% del valor)	246.969
Construcción civil, conexión de agua, electricidad y gas	50.000
TOTAL	648.169

Tabla 2: resumen de inversiones

Costo total: 648.169 USD (seiscientos cuarenta y ocho mil ciento sesenta y nueve dólares).

13.1 Precios de venta del CO₂ producido

El precio de venta actual que proporciona el mercado mediante las empresas productores locales, arroja un valor de 0,14 USD dólares por Kg de CO₂. Teniendo en cuenta los 3.518.173 Kg de CO₂ /año capturado por la empresa, daría un ingreso de 492.544,21 USD aproximadamente.

Gastos fijos anuales

GASTOS ANUALES	COSTOS EN DOLARES
Gastos en servicios: 15% de los beneficios generados	73.882
Contrato para el transporte del CO ₂ anual	50.000
TOTAL	123.882

Tabla 3: gastos fijos anuales

13.2 Beneficio generado por la venta anual de CO₂

El beneficio neto en un año por la venta del CO₂ será el resultado del monto obtenido por la venta del producto al precio antes mencionado descontando los costos fijos de mantenimiento y de distribución.

Beneficio anual neto = Venta del Producto – Gastos fijos anuales (contraparte + costos de transporte)

Beneficio anual neto = 492.544,21 USD - (73.882 USD + 50.000 USD)

Beneficio anual neto = 492.544,21 USD – 123.882 USD

Beneficio anual neto = 368.662,21 USD

Beneficios netos de dos años: 737.342 USD

Saldo: Beneficio neto de dos años – Costo de inversión

Saldo: 737.342 USD- 648.169 USD = **89.173 USD (saldo favorable)**

Considerando que la inversión inicial es de 648.169 USD y que el beneficio anual neto es de 368.662,21 USD se puede determinar que con la ganancia neta de dos años (737.342 USD) se recupera la totalidad de la inversión.

14. CONCLUSIONES

La destilería de la empresa Trigotuc obtiene unos 11.850 Kg de etanol por proceso de fermentación eliminando al año unos 4.139.027 kg de CO₂ a la atmósfera, los equipos ofrecidos por la empresa MOS de India nos garantizan en primera instancia un 85% de recuperación del CO₂ producido de la fermentación de la biomasa. Considerando estos valores con la planta propuesta se evita que aproximadamente 3.518.173 kg de CO₂ por año sean expulsados a la atmósfera contribuyendo a un menor impacto ambiental y a una disminución de los GEI. En base al análisis de comercialización de CO₂ en el mercado local y a los costos de inversión se evaluó que el proyecto es viable, con un cálculo de recuperación de capital invertido en un período óptimo de tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Barbosa Cortez, L. A.; E. E. Silva Lora y E. O. Gómez. 2008. Biomasa para energía. Ed. Unicamp. Universidad de Campinas. Campinas – Brasil.
- Benavides Ballesteros, Henry Oswaldo. 2007. Información técnica sobre Gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Subdirección de meteorología. Colombia.
- Burch, Darrell E. 1962. Total Absorptance of Carbon Dioxide in the Infrared. Applied Optics Vol. 1.
- Caballero, Margarita 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Instituto de geofísica. Revista Digital Universitaria. Universidad Autónoma de México.
- Carrasco García, J. 2008. Energías Renovables y Mercado Energético. Escuela de Organización Industrial (EOI). Disponible en: <http://imagizercv.imageshack.us/a/img811/4163/ajk2.png>
- Chylek, P. 2007. Limits on climate sensitivity derived from recent satellite and surface observations. J. Geophys. Res., 112.
- Griggs, JA., & Harries, JE. 2004. Comparison of spectrally resolved outgoing longwave data between 1970 and present. Proceedings of SPIE, 5543, University of Bristol.
- Guarás, Daniela. 2013. El cambio climático en la agenda internacional 2013. Revista Producción Forestal del Ministerio de agricultura, ganadería y pesca de la Nación.
- Harries, John E. 2001. Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997. Nature.
- Herzberg, G. 1953. Rotation-Vibration Spectra of Diatomic and Simple Polyatomic Molecules with Long Absorbing Paths XI. The Spectrum of Carbon Dioxide (CO₂) below 1.25 μ . Journal of the Optical Society of America Vol. 43.

- Instituto Scripps de Oceanografía .2014..San Diego, California Disponible en <https://scripps.ucsd.edu/>
- Kerry,J; Frank.G. 2007. Industrial gas handbook; gas separation and purification. USA: CRC Press, USA.
- Manual de montaje, operación y mantenimiento del sistema purificación de gas carbónico.1979. Dinamarca: NTR Houlding group.
- Manual del ingeniero industrial. 2007. Maynard México: McGraw-Hill.
- Manual del gas carbónico.1998 Unión Dinamarca: NTR Houlding group.
- Manuales sobre energía renovable: Biomasa/ Biomass Users Network (BUN-CA).2002. San José, C.R.: Biomass Users Network (BUN-CA).
- Montes, A. R., Rigo, M., Joekes I. 2003. Ethanol Fermentation of a Diluted Molasses Medium by *Saccharomyces cerevisiae* immobilized on chrysotile Braz. Archives of Biology and Technology.
- . Nogués, F. S.; D. García Galindo y A. Rezeau. 2010. Energías renovables. Energía de la biomasa (Vol. 1). Prensas Universitarias de Zaragoza. Universidad de Zaragoza. España.
- Núñez-Caraballo,Arianna; González-Martínez, Martha; Gustavo Saura-Laria, Gustavo. 2012. Proceso de recuperación de CO₂. Generalidades. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Facultad de Ingeniería Química-Universidad de Oriente Santiago de Cuba.
- Onitcanschi, Guillermo.2001. Evaluación financiera de proyectos de inversión. Ed. Errepar.
- Palomas, David .2015. El CO₂ buscado por alteración del efecto invernadero. Artículo publicado por revista Dciencia España. Disponible en <https://www.dciencia.es/>
- Puertas Zeta, Geraldine Milagros.2018. Efecto dela cinética de hidrólisis ácida de almidón de maíz en el rendimiento para obtención de etanol. Trabajo de tesis para

optar por el título profesional de Ingeniería agroindustrial e industrias alimentarias. Universidad de Piura. Perú.

- Sánchez, Javier. 2019. El impacto medio ambiental del CO₂. Artículo de revista Ecología verde, España. Disponible en <https://www.ecologiaverde.com/>
- Semyraz, Daniel. 2014. Elaboración y evaluación de proyectos de Inversión. Ed. Buyatti, Argentina.

Sitios web

- <https://www.dciencia.es/co2-efecto-invernadero/>
- <https://www.ecologiaverde.com/>
- <http://www.maizar.org.ar/>
- <https://scripps.ucsd.edu/research/climate-change-resources>
- <https://www.skepticalscience.com/translation.php?a=133&l=4>