

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Determinación de la vía más adecuada del empleo del CO₂ generado en la textilera "Desembarco del Granma"

Autor: Zuidery Macias Guzmán

Tutores: Dra. C. Isabel Cabrera Estrada

MSc. Mercedes Arbona Cabrera

Consultante: Dra. Elena Rosa Domínguez

Santa Clara, Julio, 2023
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Academic Department

DIPLOMA THESIS

Title: Determination of the most appropriate way of using the CO₂ generated in the textile industry "Desembarco del Granma"

Author: Zuidery Macias Guzmán

Thesis Director: Isabel Cabrera Estrada, Ph. D

Mercedes Arbona Cabrera, MSc.

Consultant: Elena Rosa Domínguez, Ph. D.

, July, 2023

Santa Clara
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



ACTA DE CONFORMIDAD PARA ESTUDIANTES DE PREGRADO
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Por una parte Zuidery Macias Guzmán estudiante de la carrera de Ingeniería Química en la facultad de Química y Farmacia en lo adelante EL ESTUDIANTE. Con número de identidad permanente 93042811006 o pasaporte _____

Y por otra parte Dr. C. Nestor Ley Chong Jefe del Departamento Docente de Ingeniería Química en la ya mencionada facultad en lo adelante EL JEFE DE DEPARTAMENTO y

M.Sc. Mercedes Arbona Cabrera; Dr. C. Isabel Cabrera Estrada profesora(s) encargada(s) de tuturar el Trabajo de Diploma DEL ESTUDIANTE, en lo adelante EL TUTOR. Reconocen que:

- i. A EL ESTUDIANTE se le ha aprobado como tema de investigación para su Trabajo de Diploma el título de Determinación de la vía más adecuada del empleo del CO₂ generado en la textilera "Desembarco del Granma".
- ii. EL ESTUDIANTE no divulgará información concerniente a la investigación, tanto durante el desarrollo como tras la culminación de esta sin la debida autorización DEL TUTOR o EL JEFE DE DEPARTAMENTO.
- iii. Que el Trabajo de Diploma fruto de la labor investigativa de EL ESTUDIANTE y la asesoría de EL TUTOR resulta de TITULARIDAD EXCLUSIVA de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- iv. EL ESTUDIANTE una vez aprobada su tesis para la defensa, depositará una copia electrónica de la misma en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- v. A partir de la defensa y aprobación del Trabajo de Diploma, la publicación total, parcial o la elaboración de cualquier obra que se derive de esta investigación por parte de EL ESTUDIANTE, contará con la coautoría de EL TUTOR y viceversa, resultante de referencias obligada esta obra en cualquier obra que se elabore. El incumplimiento de esta cláusula, puede llevar consigo el inicio de procesos de plagio. Todo lo anterior de acuerdo a la normativa de Derecho de Autor vigente en Cuba.

Y para que así conste se firma la presente en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, a los 6 días del mes de julio del año 2023

Zuidery Macias Guzmán
EL ESTUDIANTE

Dr. C. Nestor Ley Chong
JEFE DE DEPARTAMENTO

Mercedes Arbona Cabrera
TUTOR



Dr. C. Isabel Cabrera Estrada
TUTOR

Dedicatoria

Dedico esta investigación a la memoria de mi abuela.

Agradecimientos

A Dios, a la familia y a los amigos.

Resumen

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero y se produce en la textilera “Desembarco del Granma” por la combustión en el generador de vapor y en el calentador de aceite. El CO₂ puede ser considerado como un recurso aprovechable dentro de la propia textilera y con ello tributar a un cambio de paradigma hacia un modelo de economía circular. El objetivo general fue determinar la vía más adecuada del empleo del CO₂ generado en la textilera “Desembarco del Granma” para mitigar el impacto de este gas de efecto invernadero. El CO₂ capturado en la textilera “Desembarco del Granma” tiene propiedades que propician su uso en sectores tales como: la neutralización de aguas residuales textiles, la industria de alimentos y la extinción de incendios. En las condiciones actuales el empleo del CO₂ en la neutralización de las aguas residuales de la textilera “Desembarco del Granma” resulta la vía más adecuada en comparación con las otras variantes y no requiere de gastos de transportación adicionales. Se obtuvo un indicador de circularidad de 80,3 %, lo que propicia un modelo que permite un cierre del ciclo del CO₂. La categoría de daño salud humana resultó la más beneficiada al emplear el CO₂ en el proceso de neutralización ya que se disminuyen 62,8 puntos de la afectación a esta categoría determinado con el programa Sima Pro. Los indicadores dinámicos VAN, TIR y PRD para la planta de recuperación del CO₂ fueron \$ 2 445 376,8; 38 % y 2,82 años respectivamente.

Abstract

Carbon dioxide is a greenhouse gas and is produced at the “Desembarco del Granma” textile factory by combustion in the steam generator and in the oil heater. CO₂ can be considered as a usable resource within the textile company itself and thereby contribute to a paradigm shift towards a circular economy model. The general objective was to determine the most appropriate way of using the CO₂ generated in the textile company "Desembarco del Granma" to mitigate the impact of this greenhouse gas. The CO₂ captured in the “Desembarco del Granma” textile company has properties that favor its use in sectors such as: the neutralization of textile wastewater, the food industry and firefighting. Under current conditions, the use of CO₂ in the neutralization of wastewater from the textile company "Desembarco del Granma" is the most appropriate way compared to the other variants and does not require additional transportation expenses. A circularity indicator of 80,3 % was obtained, which favors a model that allows a closure of the CO₂ cycle. The category of human health damage was the most benefited when using CO₂ in the neutralization process since 62,8 points of the affectation to this category is reduced, determined with the Sima Pro program. The dynamic indicators VAN, TIR and PRD for the CO₂ recovery plant were \$2 445 376,8; 38 % and 2,82 years respectively.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1 Revisión bibliográfica.....	3
1.1 Cambio climático	3
1.2 Huella del carbono.....	4
1.3 Propiedades del CO ₂	5
1.4. Vías para lograr la separación del CO ₂	6
1.5. Almacenamiento de CO ₂	10
1.6 Aplicaciones del CO ₂	11
1.7 Las aguas residuales de la textilera Desembarco del Granma	15
1.8 Inyección de CO ₂ a los reactores de neutralización	16
1.9 Evaluación de externalidades.....	17
1.10 La economía circular.....	18
1.11 Conclusiones parciales.....	24
Capítulo 2 Empleo del CO ₂ recuperado de la corriente de gases	24
2.1 Características del proceso de recuperación.....	25
2.1.1 Simulación de la etapa de obtención de CO ₂ líquido	26
2.2 Vía para la distribución del CO ₂ almacenado.....	28
2.3 Proceso de purificación CO ₂ para usos de la Industria Alimentaria.....	34
2.4 Empleo del CO ₂ para la extinción de incendios.....	37
2.5 Comparación de los posibles usos del CO ₂ capturado de las emisiones gaseosas	38
2.6 Conclusiones parciales.....	39
Capítulo 3 Evaluación económica y ambiental del empleo del CO ₂ como agente neutralizante	40
3.1 Las externalidades	40
3.2 Tasa de circularidad.....	42
3.3 Evaluación ambiental de la sustitución del ácido sulfúrico por CO ₂	42
3.4 Análisis económico del empleo del CO ₂ para neutralizar aguas residuales.....	52
3.5 Conclusiones parciales.....	56
Conclusiones.....	57
Recomendaciones	59
Bibliografía	
Anexos	

Introducción

El clima a nivel mundial está cambiando, lo cual ha sido provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero. El mecanismo clave para mitigar dicho efecto es reducir considerablemente las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En la textilera “Desembarco del Granma” se generan emisiones gaseosas debido a procesos de combustión en el generador de vapor y calentador de aceite (que constituyen las fuentes fijas) las cuales contienen 13% de CO₂.

Se conoce que el CO₂ puede ser capturado de las corrientes gaseosas a través de diferentes vías, siendo la absorción química una de las más eficaces, (López, 2013). Resulta necesario que el CO₂ recuperado tenga el uso más conveniente de acuerdo al lugar donde se genere y en función de las características que presente. También se debe considerar la necesidad del ahorro de recursos, dentro de la concepción de un modelo de economía circular. Se hace necesario incentivar el propósito de reusar, recuperar y reciclar materiales para promover la economía circular en Cuba.

El problema científico de esta investigación viene dado porque las corrientes gaseosas generadas por las fuentes fijas de la textilera contienen CO₂, el cual es un gas de efecto invernadero.

La hipótesis fue que si se determina la vía más adecuada del empleo del CO₂ generado en la textilera “Desembarco del Granma” se podrá contribuir a mitigar el impacto de este gas de efecto invernadero.

El objetivo general fue determinar la vía más adecuada del empleo del CO₂ generado en la textilera “Desembarco del Granma” para mitigar el impacto de este gas de efecto invernadero.

Para dar cumplimiento al objetivo general se trazaron los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar las aplicaciones del CO₂ y el beneficio ambiental de su empleo a partir de una revisión bibliográfica sobre el tema.
2. Comparar los posibles usos del CO₂ capturado de las corrientes gaseosas generadas en las fuentes fijas.
3. Determinar los daños evitados al medio ambiente al emplear CO₂ en la neutralización.

4. Evaluar económicamente la variante seleccionada.

La metodología llevada a cabo consistió en desarrollar balances de masa y energía para cuantificar las corrientes del proceso, emplear programas computacionales tales como el Hysys y el Sigma Pro para simular secciones de interés, así como evaluar el impacto ambiental. También se utilizaron técnicas de optimización. La estimación económica de la propuesta tecnológica se desarrolló aplicando la metodología referenciada por Peters and Timmerhaus (1991). Se llevó a cabo el análisis y síntesis de la información, obtenida a partir de la literatura y de los criterios de expertos.

Capítulo 1 Revisión bibliográfica

1.1 Cambio climático

Los efectos antropogénicos son responsables de la mayor parte del cambio climático, por la rotura de muchos equilibrios biológicos y energéticos. A pesar del escaso efecto invernadero de los compuestos habituales de la atmósfera (nitrógeno: 79 %) y (oxígeno: 21 %) las actividades humanas (industria, generación de energía con combustibles fósiles, transporte, agricultura, deforestación), aumentan los Gases de Efecto Invernadero (GEI), (ver anexo I), produciendo el calentamiento de la tierra, y la producción de sulfatos que, actuando como contrapeso, contribuyen a refrigerarla. El clima a nivel mundial está cambiando debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. La atmósfera y los océanos se han calentado, lo que ha ido acompañado del aumento del nivel del mar, una fuerte disminución del hielo marino del Ártico y otros cambios relacionados con el clima. Los impactos del cambio climático en las personas y la naturaleza son cada vez más evidentes. Inundaciones, olas de calor e incendios forestales sin precedentes han costado miles de millones en daños. Los hábitats están experimentando cambios rápidos en respuesta a cambios de temperaturas y patrones de precipitación, (McNutt, 2020).

El clima de la Tierra ha cambiado a lo largo de su historia, en ciclos que se suceden a través de periodos muy largos de tiempo. Este es un proceso natural. La frase “cambio climático” se usa para referirse a los cambios muy rápidos en el clima que se han visto en los últimos 50 años. La evidencia científica es clara de que estos cambios no son impulsados por ciclos climáticos naturales a largo plazo. Sin embargo, su principal causa es el calentamiento global y las actividades humanas que lo provocan.

El potencial de calentamiento global (PCG) es una medida de la capacidad que tienen diferentes gases de efecto invernadero (GEI) para retener el calor en la atmósfera, ya que no todos los gases absorben la radiación infrarroja de la misma manera, ni todos tienen igual tiempo de vida en la atmósfera. El gas utilizado como referencia para medir otros GEI es el CO₂ y su potencial de calentamiento global es igual a 1. Cuanto más alto sea el PCG que produce un gas, mayor será su capacidad de retención del calor en la atmósfera, (Sosa, 2019).

En aplicaciones industriales se puede decir que el CO₂ existe en una de las dos situaciones siguientes: como un componente valioso o como un componente perjudicial. Cuando el CO₂ es un componente perjudicial, el material recuperado a menudo es usado en algunos otros procesos en lugar de ser simplemente descartado. El CO₂ puede ser empleado internamente, o vendido a un comprador externo. Una tercera situación donde existe el CO₂ es en la atmósfera. Aunque el CO₂ atmosférico se requiere para la vida de las plantas, los niveles elevados en años recientes han desencadenado el debate del calentamiento global. La comunidad científica generalmente está de acuerdo que el CO₂ es un gas de efecto invernadero importante, (Espíritu, 2012).

1.2 Huella del carbono

La huella de carbono se puede definir como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO₂ equivalentes. Es una herramienta muy útil de gestión para conocer las conductas o acciones que están contribuyendo a aumentar las emisiones, cómo se pueden mejorar los recursos y hacer un uso más eficiente de ellos. La huella de carbono surge como una medida de cuantificar y generar un indicador del impacto que una actividad o proceso tiene sobre el cambio climático, más allá de los grandes emisores.

La huella de carbono es un indicador ambiental que refleja la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI), expresada como CO₂ equivalente, que es emitida directa o indirectamente como consecuencia de una actividad determinada. Aunque es habitual enfocarse en el dióxido de carbono, no debe olvidarse que existen otros gases que también provocan el efecto invernadero, como son el metano (CH₄) o el óxido nitroso (N₂O).

Para tener en cuenta la contribución de cada gas, existe un parámetro denominado Potencial de Calentamiento Global o GWP, (del inglés, Global Warming Potential) que compara el poder de calentamiento de una masa de ese gas de efecto invernadero con el poder de calentamiento de la misma masa de CO₂, para así poder expresar el efecto conjunto de estos gases en la misma base de medida, denominada CO₂ equivalente

(CO₂ e). Para calcular las emisiones de los gases de efecto invernadero se recurre por tanto a la ecuación 1, (Espíndola, 2012).

() () ()
El primer paso para calcular la huella de carbono es realizar un inventario de emisiones de estos gases o un análisis de ciclo de vida según la tipología de huella. Con este conocimiento como base, es posible implementar una estrategia de reducción de emisiones de CO₂ basada en eficiencia energética, ahorro de materias primas, economía circular y mejoras en el proceso.

Medir la huella de carbono es importante porque permite entender cuánto una entidad contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, a los cambios climáticos. Al conocer la magnitud de las emisiones, se pueden tomar medidas para reducirlas y minimizar el impacto en el medio ambiente. Además, puede tener un impacto positivo en la percepción de la marca y en la fidelidad del cliente. Muchos consumidores están interesados en apoyar a empresas sostenibles y conscientes del medio ambiente, por lo que una huella de carbono baja puede ser una ventaja competitiva para la industria, (DOTRAINING 4 FUTURE, 2023).

1.3 Propiedades del CO₂

Este gas es incoloro e insípido y se genera en todos los procesos de combustión y durante la respiración. Debido a su propiedad de filtrar el calor radiante, es una contribución importante al efecto invernadero. Es más pesado que el aire. El dióxido de carbono está formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno, de la forma O = C = O, es una molécula lineal y no polar, a pesar de tener enlaces polares. Esto se debe a que, dada la hibridación del carbono, la molécula posee una geometría lineal y simétrica. A pesar de que el dióxido de carbono existe principalmente en su forma gaseosa, también tiene forma sólida y líquida. A la presión atmosférica, el CO₂ es gaseoso. A temperaturas entre -56,6 y 31,1 ° C, y las presiones de al menos 5,2 bar, el CO₂ puede existir en forma líquida. El CO₂ líquido no puede existir a la presión atmosférica (1 bar). A temperaturas inferiores a -56,6 ° C, el CO₂ puede encontrarse en el estado sólido.

El dióxido de carbono es un óxido ácido (una propiedad típica de la mayoría de los óxidos no metálicos) y reacciona con el hidróxido de sodio para formar una sal y agua.

Además reacciona con el agua en una reacción reversible para formar ácido carbónico (H_2CO_3). La molécula de dióxido de carbono es relativamente estable desde el punto de vista termodinámico y no cambia fácilmente. La descomposición puede efectuarse por el uso de alta temperatura, luz ultravioleta o descarga eléctrica, (Topham, 2014). Es tal su estabilidad que para poder potenciar su uso industrialmente como materia prima para la carboxilación de diferentes sustratos reactivos, por ejemplo, epóxidos y alcoholes se requiere la presencia de varios tipos de compuestos de metales de transición. Las reacciones de los alcoholes se llevan a cabo con altos rendimientos solo en presencia de un catalizador, (Liu, 2015). Por lo cual en condiciones normales de temperatura y presión sin la presencia de catalizadores estas reacciones no tendrán lugar.

La temperatura crítica es de $31\text{ }^\circ\text{C}$ y la presión crítica $7,4\text{ MPa}$, por lo que debe ser licuado a cualquier temperatura entre $31\text{ }^\circ\text{C}$ y su punto triple ($-56,6\text{ }^\circ\text{C}$), (Perry, 1992).

1.4. Vías para lograr la separación del CO_2

El incremento en las concentraciones de CO_2 , que está vinculado al calentamiento del planeta, resulta principalmente de una mayor explotación de combustibles fósiles (incluyendo los combustibles que utilizan los vehículos automotores) y del uso del suelo (inclusive la desforestación).

Los humos generados en la combustión de combustibles fósiles contienen entre el cuatro (4) y el 14 % de CO_2 , dependiendo del combustible utilizado, siendo el resto principalmente N_2 , (Queijo, 2017). Es necesaria la utilización de tecnologías que permitan la separación del CO_2 del resto de gases de la combustión, por ser el CO_2 un gas de efecto invernadero, pero que tiene aplicaciones en diferentes industrias. Existen tres posibles vías de captura de CO_2 en los sistemas: posterior a la combustión, previa a la combustión y oxicomustión, (Tamajón, 2015).

En el caso de la investigación realizada en la textilera “Desembarco del Granma” se consideró un proceso de captura posterior a la combustión, ya que el CO_2 que se quiere recuperar es el resultado de la quema de fuel oil en el generador de vapor y en el calentador de aceite.

En la captura posterior a la combustión se separa el CO_2 de los gases de combustión producidos en la combustión del combustible primario con aire. Esta separación se

puede hacer por distintos métodos: absorción física o química, membranas, métodos criogénicos, adsorción o captura mediante algas o bacterias.

La absorción de gases es una operación en la cual una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de estos en el líquido, (Treybal, 1985).

Esta operación puede clasificarse dependiendo de la interacción entre los componentes del gas y el absorbente en absorción física y química. En la absorción física el componente a eliminar de la corriente de gas es más soluble en el líquido que los demás componentes, pero no hay reacción química con el absorbente. La cantidad de gas que se puede disolver en un líquido está condicionada por la naturaleza de dicho gas y la del líquido, la presión y la temperatura, de acuerdo con la Ley de Henry. Según esta ley, la cantidad de gas que se puede disolver aumenta proporcionalmente con la presión parcial de dicho gas e inversamente con la temperatura. Por ello, este proceso es adecuado para tratar gases que se encuentran en condiciones de alta presión y baja temperatura.

Muchos procesos industriales de absorción van acompañados de una reacción química. En la absorción química es especialmente común la reacción en el líquido del componente absorbido y de un reactivo en el líquido absorbente. Algunas veces, tanto el reactivo como el producto de la reacción son solubles, como en la absorción del dióxido de carbono en una solución acuosa de etanolaminas u otras soluciones alcalinas.

Los sistemas de absorción química se han empleado para la producción de CO_2 altamente concentrado durante décadas, por tanto, esta rama cuenta con una gran madurez técnica. Emplean un compuesto químico para capturar el CO_2 de la corriente de gases a tratar. Para poder reutilizar este compuesto, es necesario regenerarlo, para lo cual, se calienta, liberándose el CO_2 , el cual está listo para ser comprimido y transportado, (Tavan, 2017).

Al explorar las opciones de captura de postcombustión es importante tener en cuenta: el nivel de impurezas presentes en el gas de combustión (NO_x , SO_x , y las partículas deben ser mínimos). Además hay que considerar que el flujo volumétrico total de los gases de combustión es el aspecto principal para dimensionar todo el equipo

necesario. Otros factores importantes son: la presión parcial de CO₂ en los gases de combustión (adecuada para 3-20%), la temperatura de la corriente de gas de combustión de entrada (el gas necesitará enfriarse), la eficiencia de eliminación de CO₂ requerida y el uso previsto del CO₂ capturado (se necesita CO₂ de alta pureza para la industria de alimentos y bebidas, pero no para almacenamiento geológico), (Moreno, 2019).

La tecnología de depuración de aminas se estableció hace más de 60 años en las industrias químicas y del petróleo, por remoción de sulfuro de hidrógeno y CO₂ de corrientes de gases. Comercialmente, es la mejor establecida de las técnicas disponibles para la captura de CO₂. Actualmente, existen varias instalaciones en las que se utilizan aminas para capturar CO₂ de las corrientes de gases de combustión, una por ejemplo, la central eléctrica de carbón Warrior Run en Estados Unidos donde se capturan 150 t/d de CO₂. La monoetanolamina (MEA) es un tipo de amina muy utilizada para la captura de CO₂. Se puede lograr un 98 % y una pureza del producto. Se pueden usar adsorbentes sólidos, como zeolitas y carbón activado, para separar el CO₂ de las mezclas de gases.

En la mayoría de los procesos de absorción, donde están involucradas reacciones químicas, es necesario realizar un proceso regenerativo, es decir, las disoluciones consumidas en las columnas de absorción podrían ser regeneradas y posteriormente reutilizadas nuevamente en el proceso de absorción, (Mohamed, 2022).

Los procesos de absorción se basan en el lavado húmedo del gas residual en torres de relleno para retener el CO₂ y la regeneración posterior del disolvente, obteniéndose una corriente concentrada de CO₂ susceptible de almacenamiento y recuperándose el disolvente para un nuevo ciclo de absorción. El método general consiste en exponer una corriente de gas a una solución acuosa de amina para que al reaccionar con el CO₂ del gas de combustión se forme una sal de carbonato soluble mediante una reacción de neutralización ácido-base, (Espíritu, 2012, López, 2013, Martínez, 2018). La reacción entre el CO₂ y la monoetanolamina es la siguiente:

En el caso de la recuperación del CO₂ de los gases de las chimeneas de las fuentes fijas de la textilera “Desembarco del Granma” no es apropiado el uso de la absorción física porque los mismos son emitidos a la presión atmosférica.

En la adsorción por cambio de presión, la mezcla de gas fluye a través de un lecho empacado de adsorbente a temperatura elevada y presión hasta que la concentración del gas deseado se acerque al equilibrio. Los sistemas de adsorción física capturan el CO₂, fundamentando su funcionamiento en la propiedad de sustancias en estado sólido para adsorber moléculas gaseosas cuando estas están sometidas a una presión elevada. La cama es regenerada por reducción de la presión.

La adsorción por cambio de temperatura y por cambio de presión son métodos practicados comercialmente de separación de gases y se utilizan en cierta medida en producción de hidrógeno y en la remoción de CO₂ del gas natural. La adsorción aún no se considera atractiva para la separación a gran escala de CO₂ de los gases de combustión porque la capacidad y selectividad de CO₂ de los adsorbentes disponibles es baja. Sin embargo, puede tener éxito en combinación con otra tecnología de captura superior al 99 % de recuperación de CO₂.

Las membranas de separación de gases permiten que un componente de una corriente de gas pase más rápido que los demás. Hay muchos tipos diferentes de membranas de separación de gases, incluidas las membranas inorgánicas porosas, membranas de paladio, membranas poliméricas y zeolitas. Las membranas generalmente no pueden lograr altos grados de separación, por lo que se requiere de múltiples etapas. Esto conduce a una mayor complejidad, consumo de energía y costos. Pueden ser necesarias varias membranas con diferentes características para separar el CO₂ de alta pureza. Se están desarrollando membranas asistidas para combinar las mejores características de las membranas.

El CO₂ se puede separar de otros gases por enfriamiento y condensación. La separación criogénica se usa comercialmente para corrientes que ya tienen altas concentraciones de CO₂ (típicamente >90%) pero no es apropiada para flujos de CO₂ más diluidos. Una desventaja importante de la separación criogénica de CO₂ es la cantidad de energía requerida para proporcionar la refrigeración necesaria para el proceso, particularmente para corrientes de gas diluido. Otra desventaja es que

algunos componentes, como el agua, deben eliminarse antes de que se enfríe la corriente de gas, para evitar bloqueos.

La separación criogénica tiene la ventaja de que permite la producción directa de CO₂ líquido, que se necesita para determinadas opciones de transporte, como el transporte por barco. La criogenia normalmente solo se aplicaría a gases de alta concentración y alta presión, como en procesos de captura de precombustión, (Capture-Project, 2008).

Algunas bacterias son capaces de desarrollarse en atmósferas con una alta concentración de dióxido de carbono y producir, a partir de este gas, biocombustibles que emiten menor cantidad de CO₂ que los combustibles fósiles tradicionales. Si la bioingeniería halla los genes que se encargan de iniciar y mantener este proceso, esta sería otra alternativa real para la captura de CO₂. Se está investigando la utilización de algas como medio para producir biocombustibles a partir del CO₂, (Queijo, 2017).

1.5. Almacenamiento de CO₂

En un separador gas – líquido, el líquido sale del recipiente por el fondo a través de una válvula de control de nivel o de descarga. El gas sale por la parte superior del recipiente.

La licuefacción de gases es un proceso común para diferentes fines; por ejemplo, el propano líquido en cilindros se usa como combustible doméstico. La licuefacción resulta cuando un gas se enfría hasta una temperatura en la región difásica, lo que puede realizarse de diversas formas:

1. Por intercambio de calor a presión constante.
2. Por expansión en una turbina, obteniéndose trabajo.
3. Por un proceso de estrangulamiento.

Los procesos de compresión se refieren a incrementar la presión en un sistema dado. Los compresores son aparatos diseñados con este objeto, y resultan vitales para el transporte de gases, para llevar a los gases a la presión apropiada para una reacción o proceso. Los compresores de gases pueden ser equipos con aspas rotatorias (como una turbina que funciona en reversa) o cilindros con pistones reciprocantes.

El CO₂ comprimido debe ser almacenado. La clasificación más comúnmente aplicada a los depósitos de almacenamiento es según tengan componentes internos o no. Las principales funciones dentro de los del primer grupo denominado botellones o tanques,

son la de almacenamiento intermedio o amortiguadores de una corriente de proceso durante un período limitado o extenso o para provocar la separación de fases mediante la sedimentación. La diferencia entre un botellón y un tanque radica en el tamaño y no es muy grande. Normalmente son recipientes cilíndricos con terminaciones planas o curvas, dependiendo de la presión y de si es horizontal y vertical. En los procesos continuos los botellones situados entre dos equipos principales proporcionan una medida estabilizadora, (Ulrich, 1985).

Debido a que el CO₂ es un gas relativamente inerte, no se requieren de recipientes hechos de materiales especiales para su almacenamiento. Sin embargo, en altas concentraciones, ante la presencia de humedad, se puede formar ácido carbónico, por lo que es necesario utilizar materiales resistentes a este ácido. Cuando la velocidad del CO₂ en circulación es muy elevada, o la presión de almacenamiento muy baja, la temperatura de la sustancia se acerca al punto de ebullición, situado a – 78, 5 °C, para una presión de 520 kPa si este punto se rebasa, parte del gas condensa y puede aparecer lo que se conoce como hielo seco, para estos casos no se deben usar depósitos hechos con materiales quebradizos. El CO₂ en estado líquido puede almacenarse en grandes recipientes con capacidades de cinco toneladas en adelante.

La UEB de Gases Industriales de Villa Clara posee tanques de almacenamiento de 25 t se comercializa en envases de 21 kg y 10 kg a precio de 196,9 CUP y 93,76 CUP respectivamente.

1.6 Aplicaciones del CO₂

El CO₂ se puede usar en diferentes industrias, tales como: la química y petroquímica, la papelera, la de alimentos, industria textil y procesadora de metales, así como refrigerante y para la extinción de incendios.

El CO₂ se utiliza en el punto de producción de productos químicos comerciales, principalmente urea y metanol. Para ello se emplea en estado gaseoso, y sus propiedades químicas son de vital importancia. Una de las aplicaciones más importantes cerca del punto de producción es la de aumentar la recuperación de petróleo, la cual fue desarrollada en Estados Unidos.

Los usos del CO₂ en estado líquido son los más variados. Previamente a la licuefacción del CO₂ este se ha de purificar. Se utiliza carbón activado para eliminar olores y

sabores. También es importante el secado del gas, mediante alúmina activada o gel de sílice.

Una aplicación extendida del CO₂ es la obtención de atmósferas inertes. En el manejo y transporte de alimentos envasados, la pérdida de aroma o el crecimiento de bacterias se puede prevenir mediante el uso de CO₂ embotellado y transporte de cerveza, empaquetado de café, transporte de frutas, vegetales y cereales son claros ejemplos donde, además, la naturaleza no tóxica del CO₂ es obviamente muy importante, compitiendo con el nitrógeno en esta aplicación.

El CO₂ es muy útil en la extinción de incendios porque es más pesado que el aire y extremadamente estable. Puede ser utilizado en aquellos fuegos en los que el agua no sea eficaz, por ejemplo en los de origen eléctrico. Dado que no es tóxico y se evapora sin dejar residuo, no daña ni contamina los materiales sobre los que actúa. También se utiliza como gas de protección de soldaduras, cuya función es proteger la zona a soldar del ataque del oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. Pocos gases poseen este efecto escudo, y las alternativas al CO₂ (gases nobles, principalmente Ar) son más caras, (Sánchez, 2006).

Un extintor de CO₂, es eficaz para actuar contra conatos de incendio producidos por: materiales combustible sólidos o tipos de fuego A y fuegos secos superficiales, tipos de combustibles líquidos que son los tipos de fuego B y en combustibles gaseosos, tipos de fuego clase C.

Como el CO₂ no es conductor evita la transmisión de corriente en lugares donde está presente la electricidad. Su alto nivel de eficacia radica en que reducen el contenido de oxígeno en la atmósfera, evitando que siga la combustión.

En el momento se procede a descargar el contenido del extintor, de estado líquido pasa a estado gaseoso provocando una gran nube blanquecina que consigue desplazar el oxígeno, elemento necesario para la combustión.

Una vez en el exterior también produce condensación de agua, por el brusco cambio de temperatura. Todo ello hace que se obtenga un efectivo elemento para poder sofocar un conato de incendio, (Extintores-Carlisa, 2022).

Una aplicación derivada de su acción en la naturaleza es la mejora del crecimiento de las plantas, utilizada sobre todo en el Reino Unido y Holanda por los agricultores de

frutas y verduras. Introducen el gas en sus invernaderos para aumentar los niveles que normalmente se encuentran en el aire (por ejemplo, 100 mg/kg comparado con 300 mg/kg). Las plantas responden asimilando una mayor cantidad de CO₂ con aumentos del rendimiento de hasta un 15%.

El CO₂ presenta una moderada solubilidad en agua, y se hace uso de esta propiedad en la producción de bebidas alcohólicas y no alcohólicas. Esta fue la primera gran aplicación del CO₂. La carbonatación de bebidas se lleva a cabo con CO₂, para evitar la precipitación de compuestos de calcio insolubles.

El uso del CO₂ en la industria del aerosol va aumentando estacionariamente. Esta aplicación depende de la solubilidad en el producto a ser administrado.

En el proceso silicato-dióxido de carbono para la producción de moldes fundidos, se utiliza la reacción química entre el CO₂ y la sílice para unir los granos de arena.

El CO₂ líquido se utiliza en la obtención de carbón, siendo alimentado a la mina para que la rápida expansión rompa el carbón. En la extracción a altas presiones de productos naturales se utiliza CO₂ líquido como disolvente, para aislar aromas o fragancias particulares, (Sánchez, 2006).

Uso del dióxido de carbono como refrigerante:

La primera constancia de utilización del CO₂ en sistemas de congelación y transporte de alimentos se remonta a 1890, siendo ampliamente utilizado en el envío desde Argentina, Nueva Zelanda y Australia en buques frigoríficos hacia Europa para su distribución y consumo. Su baja toxicidad y nula inflamabilidad fueron los motivos fundamentales para el auge de su desarrollo durante comienzos del siglo XX, ganando popularidad por la confiabilidad que ofrecía su uso para enfriar y/o congelar una gran variedad de productos.

Sin embargo el declive de su éxito comenzó en la década de 1940, cuando los refrigerantes sintéticos aparecieron. Durante estos años el desarrollo del R-22 (clorodifluorometano) desplazó el uso del CO₂ debido a sus propiedades como un muy bajo punto de fusión, una altísima densidad y unas bajas presiones de saturación en comparación con el dióxido de carbono.

En la década de los setenta se empezaron a conocer los efectos nocivos de los CFC's sobre la atmósfera, sobre todo en su contribución al debilitamiento de la capa de

ozono. Esto alertó a gobiernos y expertos, que decidieron tomar medidas al respecto, llevando a la firma del Protocolo de Montreal.

Debido a todos estos motivos, los refrigerantes naturales, y en concreto el dióxido de carbono por su alta presencia en la atmósfera y nula toxicidad, se han convertido en una alternativa más que viable en los últimos años. Sin embargo, como contrapartida están las altas presiones de trabajo del CO₂ así como la baja temperatura de su punto crítico que suponen un desafío para la seguridad y la búsqueda de sistemas eficientes y competitivos. En los nuevos sistemas modernos de refrigeración se intenta sacar partido de los puntos fuertes del dióxido de carbono como refrigerante: baja viscosidad, alta conductividad térmica y densidad de vapor alta, resultando en una buena transferencia de calor en condensadores, evaporadores y enfriadores de gas, y en consecuencia pudiendo trabajar con equipos más pequeños que en el caso de los refrigerantes tradicionales, (Ramos, 2016).

Almacenaje de Granos:

Para que un sistema de almacenaje sea exitoso es necesario que se creen dentro del granel condiciones desfavorables al desarrollo de insectos y hongos y que además disminuya la propia actividad de los granos. El principio básico del almacenaje hermético es la eliminación del oxígeno existente en el depósito hasta un nivel que suprima o inactive la capacidad de reproducción y/o desarrollo de insectos plagas y hongos. Los procesos respiratorios de los integrantes bióticos del granel (granos, insectos, hongos, etc.) consumen el oxígeno existente en el ambiente, produciendo dióxido de carbono. Como el almacenaje hermético impide el pasaje de aire y gases entre el interior y el exterior del recipiente, una vez que la atmósfera se modifica, no se vuelven a crear condiciones favorables para el desarrollo de plagas, asegurándose su conservación en el tiempo. La energía que necesitan los seres vivos para crecer y desarrollarse se obtiene del proceso respiratorio y conforma una serie compleja de reacciones químicas iniciadas por enzimas presentes en los propios organismos, (Bartosik, 2006).

Al disolver CO₂ en el agua, este se combina de tal forma que modifica la relación entre las diferentes especies del carbono, al mismo tiempo que actúa como ácido al crear iones (H⁺), aunque como ácido débil debido a los valores de la constante de disociación

del H_2CO_3 . La consecuencia es siempre una reducción del pH del agua. Es, por lo tanto, una alternativa al uso de ácidos minerales cuando dicha reducción sea necesaria. Dentro de las necesidades de ajuste del pH, es posible encontrarse con aguas con pH muy elevados. Por ejemplo, aguas residuales con valores entre 10 y 13, debido a un alto contenido en iones (OH^-). En la mayoría de los casos, los causantes de estos niveles son los hidróxidos de sodio y de calcio. Cuando esto sucede, al usar CO_2 en lugar de otros ácidos minerales, este reacciona directamente con el hidróxido correspondiente formando primero carbonatos y a continuación bicarbonatos, (Pallé, 2018).

Para potenciar el empleo del CO_2 en diferentes procesos industriales la UEB Gases Industriales de Villa Clara comercializa el CO_2 líquido cuyos clientes fundamentales son la Empresa Fabric Aguilar Noriega (Planta Mecánica), Empresa de Ciclos Minerva, Empresa Cervecera Manacas y la Empresa de Bebidas y Refrescos de Villa Clara.

Sin embargo, el uso del CO_2 como agente neutralizante de aguas residuales, no está extendido en Cuba. La aplicación del CO_2 para neutralizar aguas residuales alcalinas permite contar con sistemas de tratamientos pequeños con tecnología sencilla, segura y amigable con el medio ambiente.

1.7 Las aguas residuales de la textilera Desembarco del Granma

Una de las características químicas más importantes para determinar la calidad e idoneidad de las aguas es el pH. Las aguas residuales de la textilera presentan hidróxido de sodio pues se emplea en las etapas de blanqueo y mercerizado y es el principal responsable del pH básico del agua residual, la cual es llevada a la planta de tratamiento para su depuración.

A la Planta de Tratamiento de Residuales llegan, principalmente, líquidos residuales procedentes de los procesos de blanqueo y preparación de tejeduría. Para depurar el agua se usa un proceso biológico y aeróbico donde los microorganismos se alimentan de los contaminantes orgánicos.

Primeramente el agua residual pasa a través de unas pantallas de barras que eliminan las grandes inclusiones que este trae consigo (cribado). Posteriormente, luego de controlado su flujo, va a la cisterna de segundo ajuste para su homogenización y se inyecta aire con los sopladores para facilitar la mezcla con la turbulencia que crea el

aire y así incorporar oxígeno al residual; luego se bombea el agua residual hacia la cisterna de neutralización, en la que se controla su pH añadiendo ácido sulfúrico. La adición del mismo se hace de forma automática por medio del control de pH que existe en la cisterna de neutralización. Es importante lograr un pH igual a siete pues es la mejor condición para la vida de los microorganismos, (Pérez, 2020).

Luego cae por gravedad el agua dentro de la cisterna de aireación. En esta cisterna existe el aireador flotante el cual posibilita oxigenar el agua para garantizar la respiración de los microorganismos aerobios y lograr el mejor contacto posible entre el agua contaminada y el lodo activado. El líquido mezcla pasa por gravedad a la cisterna de primera sedimentación, donde se separan los sólidos (flóculos) del licor. Estos sólidos sedimentados, son a la cisterna de aireación; el exceso de lodo (si existiera) es bombeado por las bombas de drenaje hacia el espesador. Luego, el agua residual sufre una nueva sedimentación, en la cisterna de segunda sedimentación. El sobrenadante es descargado como agua residual tratada al exterior de la empresa, en tanto que el sedimento se conduce por las bombas de drenaje de lodo hacia el espesador. En este equipo se separa nuevamente la fase sólida de la líquida. El lodo concentrado se transporta al patio de secado, (Texvi, 2015).

Se han realizado investigaciones para sustituir el H_2SO_4 empleado en la etapa de neutralización por el CO_2 recuperado de las emisiones gaseosas de la planta de servicios de ingeniería ya que el ácido sulfúrico es corrosivo y puede producir graves quemaduras en los ojos, la piel e irritar las mucosas. Además, en contacto con productos orgánicos los deshidrata y carboniza, llegando en ocasiones a incinerarlos. Es considerado un agente tóxico para la vida acuática. En el suelo puede disolver algunos minerales, deteriorando las características de este.

1.8 Inyección de CO_2 a los reactores de neutralización

El tratamiento de las aguas residuales puede efectuarse en unidades que se clasifican según su forma de alimentación, en reactores de flujo intermitente y de flujo continuo. Los reactores de flujo continuo presentan una entrada y salida permanente de caudal y, de manera simultánea, se efectúa el tratamiento de las aguas residuales.

Los reactores de flujo continuo de tanque agitado son normalmente aplicados en procesos de tratamiento de agua de residuos. En los reactores continuos con agitación

la composición de productos es idéntica a la composición del material dentro del reactor, la cual es una función de tiempo de residencia y velocidad de reacción, (Levenspiel, 2004).

Se hace necesario poner en contacto el dióxido de carbono con el agua residual que será tratada en el reactor mezcla perfecta. El CO₂ se puede inyectar directamente en las tuberías, a través de difusores porosos o a través de equipos específicos adaptados a cada instalación. El uso de CO₂ no presenta riesgos cuando se utiliza con otros productos, salvo los ácidos que pueden resultar peligrosos al asociarse con otros agentes.

Un ejemplo de equipo es el inyector POROXAL®, sumergido en el fondo del depósito, trata las aguas residuales ya que es apropiado para disolver el dióxido de carbono (CO₂) para reducir el pH. Entre las facilidades de instalación y de mantenimiento está que no es necesario vaciar las cuencas. El inyector-POROXAL es un sistema de inyección a nivel del suelo, que se sumerge hasta el fondo del depósito e incluye: bastidor de acero inoxidable, mangueras porosas hechas de una goma EPDM (específica). La figura se muestra en el anexo II, (industrial.airliquide.es, 2021). Una vista de una planta que utiliza CO₂ para la neutralización de las aguas residuales aparece en el anexo III, (airliquide.com, 2022).

1.9 Evaluación de externalidades

Las externalidades se producen cuando las actividades sociales o económicas de un grupo de personas tienen un impacto sobre otro (el ambiente se considera como un grupo más), y dicho impacto no está plenamente tomado en cuenta por el primer grupo. Otra forma de ver las externalidades, es como eventos que confieren beneficios o costos considerables a una persona o grupo de personas sin que estas hayan dado su consentimiento al momento de tomar las decisiones que llevaron directa o indirectamente a la ocurrencia de dichos eventos. Visto de otra manera una externalidad se presenta cuando la utilidad de un individuo A se ve afectada por ciertas variables cuyos valores son decididos por otros (personas, corporaciones o gobiernos), sin interesarse en los efectos y el bienestar del individuo A. En general, las externalidades ambientales pueden ser: efectos en el paisaje, efectos en la salud humana (morbilidad), incremento o disminución de muertes (mortalidad), pérdida del

equilibrio ecológico, efectos en los acuíferos y cuerpos de agua superficiales, cambios en la calidad del aire, cambios en el nivel de calidad del agua, pérdida de sitios recreativos, efectos en suelos o calentamiento global. Algunos de estos costos pueden estimarse cuantitativamente en términos monetarios (pérdida de cosechas, bosques o tierras cultivables); mientras que otros no (pérdida del paisaje natural o incremento en la morbilidad), aunque de estos se puede aspirar a tener una idea cualitativa y suficientemente objetiva. Para esto se requiere, tanto el conocimiento de las técnicas de evaluación de impacto ambiental, como los modelos para evaluar las variables ambientales de modo que puedan identificarse plenamente las consecuencias que estos generan. De esta manera, se observarán los efectos tanto positivos como negativos debidos a dichos impactos y podrán expresarse en términos económicos, (Jaime, 2006).

Las externalidades ambientales deben valorizarse e incluirse en el costo de los productos o servicios. Se puede internalizar total o parcialmente algunas de las externalidades medioambientales negativas generadas por la actividad empresarial en el costo de los productos. Los costos medioambientales son un elemento más del costo de producción y tienen impacto en la fijación de los precios de venta, y que al no incluirlos la empresa perderá competitividad, (Sinforoso, 2019).

1.10 La economía circular

La economía circular tiene una fácil aplicación en los sectores primario y secundario dado su innata relación con los medios de producción y explotación de recursos, sin embargo, es difícil valorar el desempeño en actividades que no incluyen flujos materiales propios. De este modo surge la tercera parte del estudio, la aplicación de la circularidad, donde se valora su adaptación en los sectores primario y secundario, desarrollando las fases de análisis, oportunidades de estas actividades o indicadores aplicables; para, a continuación, centrar el estudio en el sector servicios, destacando las problemáticas para aplicar la circularidad y diferenciando las oportunidades y herramientas de desempeño en función de los flujos materiales de la actividad y el tipo de servicio, (Campos, 2022).

El modelo de economía circular distingue entre ciclos biológicos o técnicos; los primeros son aquellos alimentos y materiales de base biológica (por ejemplo, algodón o

madera) que retroalimentan el sistema a través de procesos como el compostaje y la digestión

anaerobia. Estos ciclos regeneran los sistemas vivos (por ejemplo, el suelo), que proporcionan recursos renovables para la economía; y los técnicos recuperan y restauran productos, componentes y materiales a través de estrategias que incluyen reutilización, reparación, remanufactura o (en el último recurso) reciclaje.

La Economía Circular propone 7 elementos sobre los que construir una estrategia de economía circular (Correa, 2023), los cuales se relación de esta manera:

- 1- Priorizar los recursos renovables.
- 2- Repensar el modelo económico.
- 3- Diseñar pensando en el futuro.
- 4- Colaborar para crear valor conjunto.
- 5- Preservar y reutilizar lo que ya está construido.
- 6- Usar los residuos como recursos.
- 7- Incorporar la tecnología digital.

Actualmente, en Cuba se ejecuta el proyecto sobre el Fortalecimiento de la infraestructura de la calidad en la economía circular en México y Cuba, que implementa el Instituto de Metrología de Alemania, financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de esa nación europea, lo cual fue analizado en un encuentro del Consejo Nacional de Innovación, en el cual participó el de Jefe de Estado que se refirió al tema como algo que en el país debe irse mirando de otra manera: como un eje que atraviesa todos los procesos de la sociedad , (CITMA, 2022).

“La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, arrendar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar los materiales y productos existentes durante el mayor tiempo posible”, (Díaz-Canel, 2022).

Esto manifiesta que ciertas actividades productivas se convierten en focos contaminantes; y como si lo que median son la audacia, el afán de optimizar provechos, y los deseos de ser amigables con la naturaleza, la cáscara del arroz, por ejemplo, puede utilizarse como combustible, o los excrementos de la ganadería pueden convertirse en energía y abono orgánico.

La iniciativa contribuye al propósito de reusar, recuperar y reciclar materiales para promover la economía circular en todas las esferas posibles y desde las más adecuadas normas y regulaciones técnicas.

El Indicador de Circularidad de Material o simplemente Indicador de Circularidad (IC) puede ser utilizado de forma interna por las organizaciones, o ser publicado para que lo conozca el público general o terceros interesados. El IC es un valor entre cero y uno, en el que el uno representa la circularidad máxima y cero representa la inexistencia de circularidad.

El inventario pretende ser una herramienta dinámica que se actualice con frecuencia y regularidad dado el progreso realizado por países, regiones y ciudades en el desarrollo de estrategias de economía circular y marcos de medición relacionados. El inventario clasifica los indicadores de economía circular en cinco categorías principales:

- 1) Medioambiente (39%): Recoge indicadores con impacto directo en el ecosistema, tales como emisiones, proceso material de salida y producción y consumo.
- 2) Gobernanza (34%): Se enfoca en indicadores relacionados con educación, desarrollo de capacidades y regulación, entre otros.
- 3) Económicos y empresariales (14%): Incluye aquellos indicadores expresados en unidades monetarias como el valor añadido de la economía circular y la inversión pública en proyectos de economía circular, así como aquellos indicadores centrados específicamente en las actividades realizadas por y dentro de las empresas.
- 4) Infraestructura y tecnología (8%): Abarca todos los indicadores que pretenden medir la existencia de herramientas, tecnologías y espacios que impulsen la economía circular.
- 5) Empleos (5%): Recoge indicadores asociados al empleo y recursos humanos.

Dentro del Inventario de Indicadores de Economía Circular los indicadores ambientales prevalecen. Los indicadores medioambientales se han dividido en subcategorías, siguiendo en la medida de lo posible la categorización aplicada por la Comisión Europea (CE) y la Agencia Europea de Medio Ambiente

Predominan los indicadores de proceso material de salida (36% del total de indicadores ambientales). Esta subcategoría incluye indicadores que miden las distintas fases de los residuos y materiales que pueden reutilizarse y transformarse en recursos (por

ejemplo, material recogido para la reutilización de materiales de construcción y recogida de plásticos; objetos recuperados en centros de reutilización y materiales y residuos recuperados).

La producción y el consumo (27%) abarcan materiales y recursos que se han utilizado en la economía, principalmente en la generación de residuos medidos en varios sectores (por ejemplo, residuos de construcción, residuos de alimentos, generación de residuos del comercio y la industria, residuos municipales). También se incluye dentro de esta subcategoría el consumo de recursos: consumo de energía, consumo de materiales domésticos, consumo de materiales vírgenes y consumo de agua.

La subcategoría de uso (14%) describe aquellos indicadores sobre la utilización y reutilización de recursos (por ejemplo, cantidad de recursos utilizados y devueltos al sistema, uso directo de recursos y uso directo de la tierra), así como varias tasas de uso (por ejemplo, tasa de uso de material circular y reutilización de residuos de envases).

Ahorro (12%) se refiere a indicadores que mencionan el consumo evitado y el ahorro de diferentes recursos como energía, alimentos, materias primas y ropa (por ejemplo, desperdicio de alimentos evitado a través de un consumo circular y energía ahorrada por programas de eficiencia energética).

Indicadores de emisiones (9%), miden principalmente la generación de gases de efecto invernadero incluyendo las emisiones de CO₂ de las diferentes actividades. En algunos casos, estos indicadores se refieren a la economía circular en un sentido amplio y no se refieren a sectores específicos (por ejemplo emisiones de CO₂ per cápita), mientras que otros indicadores están asociados a actividades y áreas específicas (por ejemplo, emisiones relacionadas con el consumo de materiales; ahorros de CO₂ como resultado de las actividades de compra; el impacto del carbono de generación de residuos).

Otros indicadores de esta categoría analizan la eficiencia (2%), que mide el logro del máximo rendimiento de un determinado nivel de recursos utilizados para llevar a cabo una actividad. Los indicadores relacionados con la eficiencia de la muestra se centran en el sector energético (por ejemplo, eficiencia energética, intensidad energética y eficiencia energética en edificios y viviendas).

La tasa de circularidad es la proporción de recursos materiales utilizados que proceden de materiales de desecho reciclados, ahorrando así extracciones de materias primas vírgenes. El índice de circularidad forma parte del marco de seguimiento de la Unión Europea (UE) sobre la economía circular. Frente a un modelo económico lineal, en el que los recursos se utilizan hasta su eliminación, la sostenibilidad se entiende con un nuevo modelo, al que se llama, modelo económico circular, en el que los productos se convierten cada vez más en servicios, y donde los residuos son de nuevo materias primas. La “Economía Lineal” se basa en el concepto de “extraer-fabricar-usar-tirar”, o más sencillamente “usar y tirar”. En este modelo se extraen los recursos de la tierra, se fabrican los productos necesarios, y el consumidor se deshace de ellos o de sus residuos después de usarlos. Este modelo no tiene camino de retorno, tiene un principio y un fin, por eso se denomina “Economía Lineal”. En el modelo de la Economía Circular se prioriza el mantenimiento, para alargar la vida del producto. Cuando el producto ya no es útil al usuario, se plantean la reutilización y redistribución, sin alterar el producto, en el caso de que todavía pueda ser utilizado por otro usuario. Cuando el producto ya no puede ser utilizado por ningún usuario, pudiera ser reacondicionado, que permite dejar el producto en condiciones similares al original. Si el producto no puede ser reacondicionado, posiblemente pueda ser remanufacturado. La remanufactura implica utilizar el producto usado, o sus componentes para fabricar un producto nuevo similar o completamente distinto. El último paso es el reciclado, que consiste en recuperar los materiales del producto original para crear nueva materia prima, (Macarthur, 2022).

Las siete R de la elaboración de los productos y de la gestión de los residuos, que sirven de soporte a la Economía Circular son: rediseñar, reducir, reutilizar, reparar, renovar, recuperar y reciclar. En su conjunto, forman una potente iniciativa por medio de la cual se sustituye la insostenible economía lineal actual, basada en extraer materias primas finitas, transportarlas, fabricar productos, distribuirlos, usarlos y tirarlos como residuos, en otro modelo donde todas las personas pueden preservar el medio ambiente y, al mismo tiempo, fomentar la economía circular, (Marcos, 2023).

Es importante tener en cuenta que el Indicador de Circularidad evalúa únicamente la circularidad de un producto o una combinación de ellos, pero no considera otras

valoraciones como el tipo de materia, o producción, el origen, o los impactos ambientales y sociales. Por ello, el indicador de circularidad debe ser utilizado en conjunto con otros indicadores y análisis para tener una imagen completa de la sostenibilidad del producto o la organización. Mediante el análisis de múltiples indicadores como la Huella Ambiental, la Huella de Agua, la Huella de Carbono, el Uso de Recursos o el Indicador de Circularidad, se obtiene una visión completa y objetiva de la sostenibilidad de un producto u organización, (Macarthur, 2022).

Para avanzar en la estrategia de cambio hacia la economía circular, la metodología presenta tres pasos: primero, identificar cadenas con potencial de transformación en la región a partir de criterios pragmáticos para contribuir a las economías locales en América Latina y el Caribe (ALC). Las cadenas productivas para priorizar cumplen los siguientes criterios:

- La cadena productiva es desarrollada de manera local desde el diseño del producto o servicio, la extracción de materia prima, el procesamiento, la distribución, consumo y fin de vida.
- Importancia en cuanto a la contribución de la economía de la región, consumo de recursos, e interés de políticas públicas en el territorio.
- En la cadena, participan pequeñas y medianas industrias, segmento prioritario para la recuperación económica a partir de la pandemia.

El segundo paso, presenta el marco de análisis con indicadores para evaluar el avance en economía circular de la cadena productiva y para identificar oportunidades para su desarrollo. El tercer paso formula recomendaciones de política pública para acelerar la transformación hacia la economía circular en las cadenas productivas priorizadas.

La evaluación de indicadores de circularidad en cadenas productivas prioritarias para ALC se tienen en cuenta las siguientes Dimensiones: Flujo de Recursos, Innovación Colaboración Modelos de negocios.

En la dimensión flujo de recursos se pueden encontrar los indicadores: tipo de recurso, volumen, homogeneidad y circularidad, esta última es la relación entre los residuos aprovechados sobre los recursos generados (Van, 2022).

1.11 Conclusiones parciales

- 1) El dióxido de carbono generado en las fuentes fijas de la textilera “Desembarco del Granma”, constituye un gas de efecto invernadero y puede ser mitigado su impacto ambiental si se recupera de las corrientes gaseosas.
- 2) Una vía apropiada para capturar el CO₂ resulta el proceso de absorción con monoetanolamina.
- 3) El dióxido de carbono es un óxido ácido, se genera en todos los procesos de combustión y reacciona con el hidróxido de sodio para formar una sal y agua.
- 4) La tasa de circularidad es la proporción de recursos materiales utilizados que proceden de materiales de desecho reciclados, evitando el uso de nuevas materias primas.
- 5) El CO₂ tiene una gran variedad de aplicaciones, tales como: en la industria de alimentos, la extinción de incendios y para la neutralización de aguas residuales textiles.

Capítulo 2 Empleo del CO₂ recuperado de la corriente de gases

Resulta de interés buscar alternativas para el empleo del dióxido de carbono generado en la textilera una vez que se recupere el mismo, pues es un gas que puede ser reutilizado como parte de una estrategia de economía circular. En este capítulo se analizan las ventajas del uso del CO₂, considerando la posibilidad de neutralizar el agua residual ya que en Cuba este uso ha sido poco investigado. Además se tendrán en cuenta otras perspectivas de aplicación.

2.1 Características del proceso de recuperación

Se ha estudiado una vía para la captura del CO₂ a partir de la recuperación de este gas de las emisiones gaseosas de las fuentes fijas de la textilera a través de la simulación en Aspen, (De la Coba, 2022). En la figura 1 se muestra el diagrama del proceso de captura y recuperación del solvente (monoetanolamina).

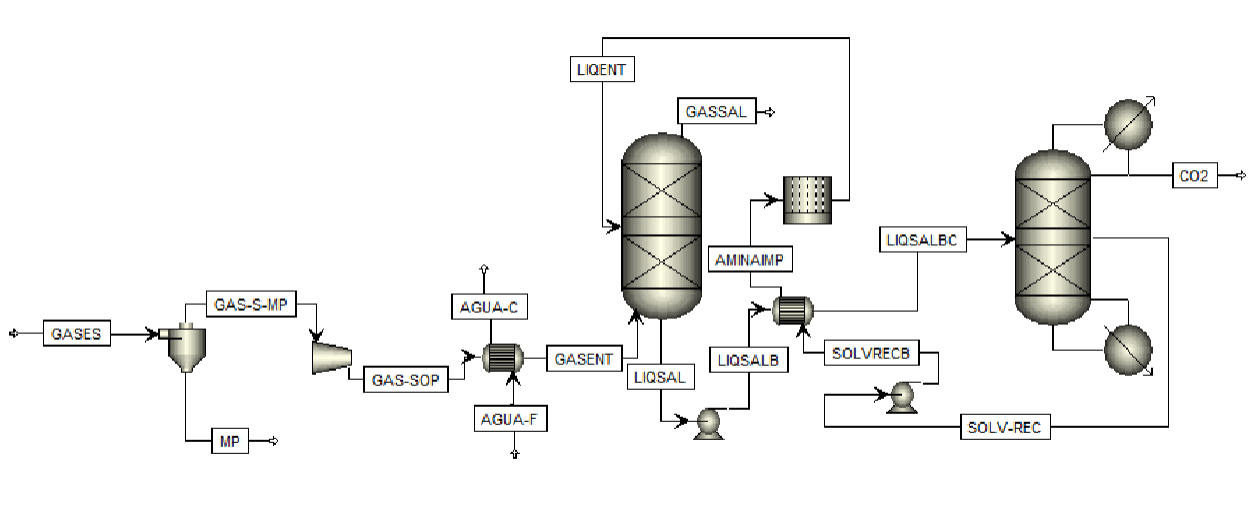


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de obtención del CO₂

Donde:

GASES: Gases de combustión provenientes del generador de vapor y el calentador de aceite

GAS-S-MP: Gases sin material particulado

MP: Material particulado

GAS-SOP: Gases a la salida del soplador

AGUA-F: Agua fría para enfriar los gases que salieron del soplador

AGUA-C: Agua caliente

GASENT: Gases de enfriados que entran a la columna de absorción a 30 °C

GASSAL: Gases a la salida de la columna de absorción

LIQSAL: Solución rica en CO₂

LISALB: Solución rica en CO₂ impulsada hacia el intercambiador de calor

LIQSALBC: Solución rica en CO₂ caliente que entra a la columna de desorción

SOLV-REC: Solución de monoetanolamina pobre de CO₂

SOLVRECB: Solución de monoetanolamina pobre en CO₂ impulsada hacia el intercambiador de calor para calentar la solución de monoetanolamina rica en CO₂ que entra a la columna de desorción

AMINAIMP: amina con impurezas

LIQENT: Solución de monoetanolamina pobre de CO₂ recuperada

CO₂: producto deseado

Se obtuvieron como resultado de la simulación 3 630,64 kg/h de CO₂, los cuales deben ser convenientemente almacenados y dosificados según la cantidad requerida.

2.1.1 Simulación de la etapa de obtención de CO₂ líquido

Con el empleo del HYSYS se simuló la obtención del dióxido de carbono líquido tras su captura en el tope de la columna de desorción, en este programa existe una amplia variedad de paquetes de fluidos, cada uno de ellos contiene toda la información para cálculos físicos de las propiedades de componentes. En esta investigación se utiliza el modelo Peng-Robinson que posibilita determinar con mayor precisión el valor de la densidad de la fase líquida y el valor de la presión de vapor de sustancias puras y mezclas multicomponentes.

La ecuación de Peng-Robinson es muy usada en termodinámica de Ingeniería Química. Proporciona unas predicciones mejores para densidades de líquidos que la ecuación de Soave-Redlich-Kwong por Soave (1972).

El diagrama de flujo se muestra en la figura 2. El CO₂ líquido pasará a un sistema de tanques de almacenamiento. El separador de HYSYS se simula como un separador ideal donde se lleva a cabo la separación completa de las diferentes fases (Gas-Líquido). El compresor es el equipo a través del cual se le adiciona energía, normalmente cedida por un motor acoplado, y se eleva la presión del fluido que ingresa a este.

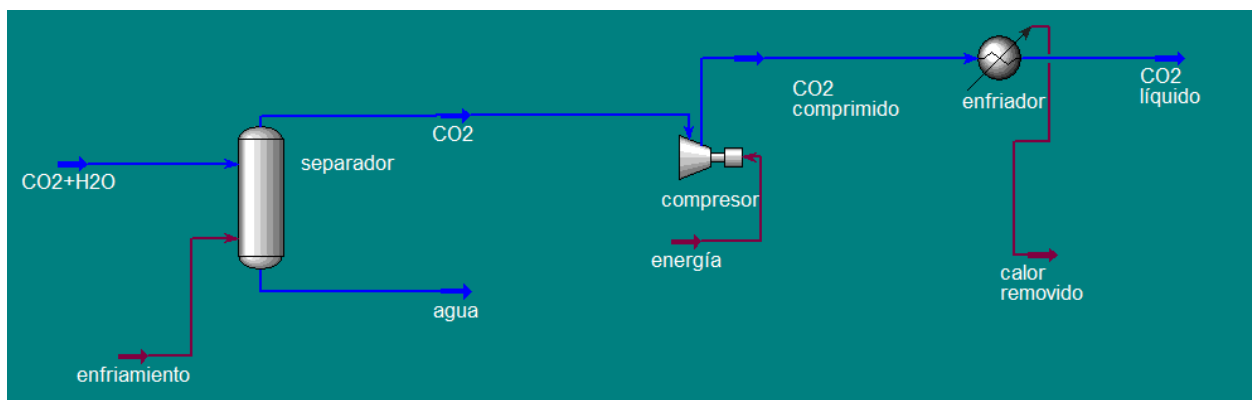


Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención del CO₂ líquido

Las características de la corriente de alimentación (CO₂+H₂O) se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Características de la corriente de alimentación al separador

Nombre de la corriente	CO ₂ +H ₂ O
Fracción de la corriente en fase vapor	1
Temperatura (°C)	70
Presión (kPa)	121,59
Flujo molar (mol/h)	182,32
Flujo másico (kg/h)	3634,3

El separador será un tanque cilíndrico, con un volumen de 0,959 m³.

Una vez que el CO₂ se comprime y se enfría, se obtiene una corriente de CO₂, cuyas características se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Características del producto

Nombre de la corriente	CO ₂ líquido
Fracción de la corriente en fase vapor	0
Temperatura (°C)	-23,46
Presión (kPa)	1 823,8
Flujo molar (mol/h)	182,12
Flujo másico (kg/h)	3 630,64

El CO₂ se almacenará para destinarlo a los fines que resulten más ventajosos desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

2.2 Vía para la distribución del CO₂ almacenado

El CO₂ destinado para la neutralización de las aguas residuales, se dosificará a partir de los tanques de almacenamiento, según se muestra en la figura 3. Se contará con un tanque de menor volumen dentro de la planta de tratamiento de residuales para ser manipulado por el operador de la cisterna de neutralización.

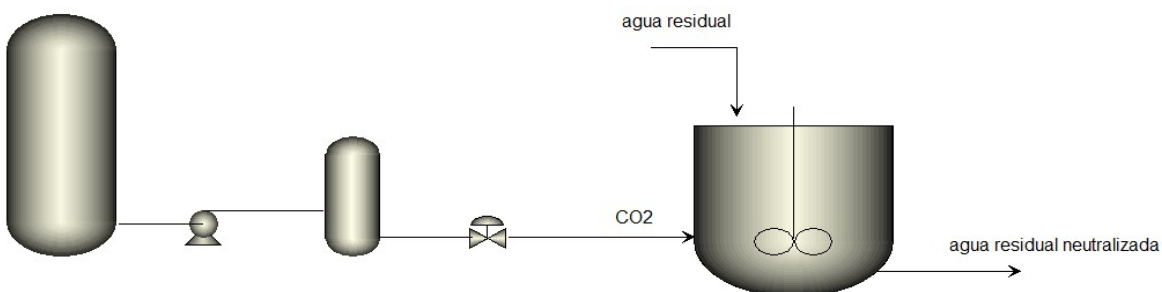


Figura 3. Representación del sistema de distribución del CO₂

Se determinó el diámetro óptimo de la tubería necesario para minimizar el costo de bombeo de CO₂, para lo cual se empleó la ecuación 2. Para ello se siguió la metodología reportada, (Peters, 1991).

Para hallar los costos fijos fue necesario emplear la ecuación 3 y linealizarla (ecuación 4).

()

()

Donde:

k y n son constantes

D nominal: diámetro nominal de la tubería

() () () ()

Se hizo uso de la figura 13-3 del Peters y se determinaron los parámetros k y n, los cuales resultaron ser de 8 y 0,321 respectivamente (Peters, 1991).

Para calcular los costos variables se usaron las ecuaciones 5, 6 y 7. Se consideró la relación , según se reporta en la literatura (Pávlov, 1981)

_____ ()

_____) (_____) Σ _____ ()

Donde:

N: potencia (kW)

ρ: densidad del fluido (kg/m³);

g: aceleración de la gravedad (9,8 m/s²)

η: eficiencia del conjunto motor bomba (0,8)

H: carga de la bomba (m);

ΔZ : diferencia de altura entre los puntos considerados (m);

$\alpha = 1$ por ser régimen turbulento;

___ : carga de velocidad (m);

___ : altura o carga estática (m);

()

Re: número de Reynolds;

μ : viscosidad del fluido (Pa*s);

d_i : diámetro interior de la tubería (m) (para ello se tuvieron en cuenta los diámetros nominales que aparecen en la tabla 3)

Los resultados del cálculo de los costos de bombeo se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Costos de bombeo

D nominal (pulgadas)	D nominal (m)	d_i (m)	Costo de bombeo fijo (\$/a)	Costo de bombeo variable (\$/a)	Costo de bombeo total (\$/a)
1	0,025	0,0243	210,34	267,12	477,46
1,25	0,032	0,0325	226,00	230,19	456,20
1,5	0,038	0,0381	239,66	224,81	464,48
2	0,051	0,0493	262,92	221,66	484,58
2,5	0,064	0,0590	282,50	220,93	503,43

Como se aprecia en la figura 4 para un diámetro de tubería de 1,25 plg (0,032 m de diámetro interno) se obtiene el valor mínimo de costo (456,2 \$/a) para el bombeo del CO₂.

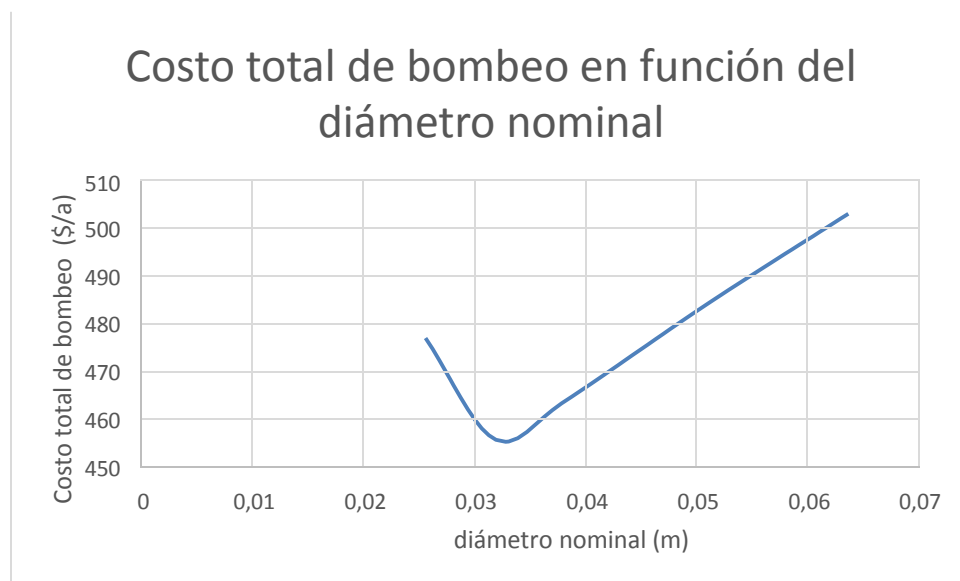


Figura 4. Determinación del diámetro óptimo de la tubería

2.3 Incorporación del CO₂ al agua residual para su neutralización

El agua residual de la textilera “Desembarco del Granma” presenta un pH superior al neutro, por lo que antes del proceso biológico al que será sometida, se precisa de un ajuste del pH mediante la adición de CO₂. Esto posibilitará un proceso tecnológico más compatible tanto desde el punto de vista técnico como ambiental, (Arbona, 2022).

En función del pH del agua residual afluyente a la planta de tratamiento de residuales líquidos es el consumo de CO₂ en la etapa de neutralización, teniendo en cuenta la siguiente reacción:

Para una mejor distribución de CO₂ en el seno del agua residual, se precisa contar con difusores adecuados, que serán instalados en el reactor existente en la etapa de neutralización de la planta de tratamiento de residuales líquidos de la textilera.

Difusores

La distribución uniforme del fluido a lo largo de las tuberías perforadas se puede lograr mediante la selección adecuada de la tubería, diámetro, tamaño de las perforaciones y espacio entre perforaciones. Mientras se evite el potencial de obstrucción, se prefieren tamaños de perforación más pequeños para una mejor distribución de fluidos. La tasa de descarga de la unidad se puede determinar en base de la presión de entrada y del tamaño de la perforación. La mayoría de los sistemas de distribución se diseñan con un razonable grado de precisión en el que se puede tolerar una mala distribución de aproximadamente $\pm 5\%$. La tendencia en la industria química, sin embargo, es reconocer la conveniencia de diseños que proporcionen una distribución esencialmente uniforme. Dicha distribución debe obtenerse sobre una base de diseño óptima, manteniendo la inversión original, como el equipo, el tamaño y los gastos operativos, como los requisitos de energía, al mínimo.

Se determinó el por ciento de mala distribución haciendo uso de la ecuación 8 según lo planteado, (Perry, 1992).

$$\left(\frac{\Delta h_{o1}}{\Delta h_p} \right) \quad (8)$$

Donde

Δh_{o1} : Diferencia de carga en la primera salida, pies de fluido que fluye.

Δh_p : pérdida neta de carga entre la entrada y el extremo cerrado de la tubería.

Para calcular Δh_{o1} se hace uso de la ecuación 9.

$$h_o = \frac{aV_i}{c} \quad (9)$$

Donde:

α : Factor de corrección (1,05)

v_i : Velocidad de entrada promedio (pies/s)

g_c : Aceleración de la gravedad

Para determinar Δh_p se utiliza la ecuación 10.

$$p = \left(\frac{\rho L}{D} \right) \frac{v^2}{c} \quad ()$$

Donde:

f : Factor de fricción

D : Diámetro de la tubería (pies)

L : Longitud del difusor (Pies)

Fue necesario hallar el número adimensional de Reynolds para lo cual se usó la ecuación 11.

$$R = \frac{\rho V D}{\mu} \quad ()$$

Donde:

ρ : Densidad del CO₂ 1,976 kg/m³

μ : Viscosidad 0,0000148 Pa*s

El valor de Reynolds fue de $8,81 \cdot 10^3$ lo que corresponde al régimen turbulento.

Para encontrar el factor de fricción se tuvo en cuenta el número de Reynolds y la relación entre rugosidad de la tubería y el diámetro (ϵ/d_i). Se consideró una tubería de

acero sin costuras y tubos soldados no corroídos que tiene una rugosidad de 0,2 según lo reportado, (Rosabal, 2006).

La diferencia de carga en la primera salida fue de 0,59 pies (0,19 m) de fluido que fluye (CO₂).

La pérdida neta de carga entre la entrada y el extremo cerrado de la tubería calculada fue de 0,04 pies (0,013 m).

El por ciento de mala distribución resultó de 3,4 %, siendo menor que el 5 % por lo que resulta adecuado según la literatura estudiada, (Farajpourlar, 2015, Perry, 1992).

Se utilizará un sistema que contará con 10 difusores en arreglo rectangular.

Entre los posibles usos del CO₂ excedente se encuentra su empleo en la industria de los alimentos, lo cual requiere un mayor grado de pureza.

2.3 Proceso de purificación CO₂ para usos de la Industria Alimentaria

Para proceder a utilizar el CO₂ capturado de las emisiones gaseosas en la industria alimentaria, se requiere eliminar de este las trazas de aceite y óxidos no deseables. El CO₂ de salida del enfriador de gas es enviado a un depurador de KMnO₄ (de alto poder oxidante), con el fin de extraer los óxidos de nitrógeno, las eventuales trazas de MEA y los productos de descomposición y aldehídos procedentes de la combustión. Posteriormente, el CO₂ se comprime hasta 21 bares, mediante la acción de un compresor, que estará equipado con un sistema de pre y post refrigeración. Un filtro de carbón activo para eliminar las partículas de aceite de los vapores hasta alcanzar un nivel mínimo que garantice la calidad alimentaria requerida para el CO₂.

Con posterioridad, un secador absorberá el agua hasta que el dióxido de carbono presente un punto de rocío de -60 °C (lo que equivale a un contenido de agua de 10

ppm). La extracción posterior del oxígeno de la mezcla asegura una pureza final del CO₂, próxima al 99,99%. En la figura 5 se muestran las principales etapas que se requieren para obtener la pureza deseada.

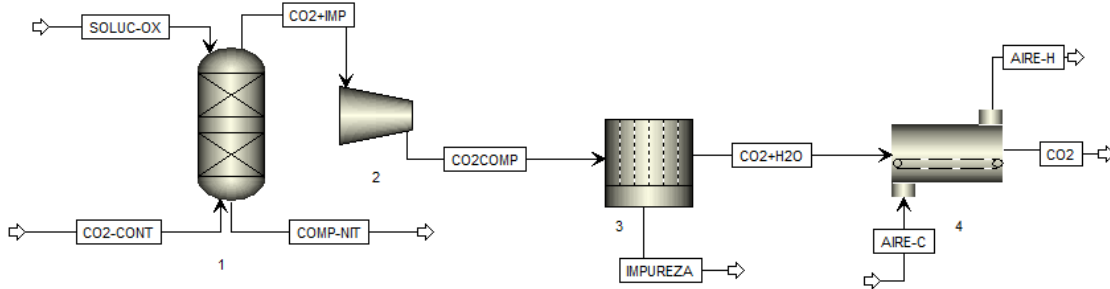


Figura 5. Diagrama de flujo para la etapa de purificación del CO₂ para alimentos

Donde:

SOLUC-OX: Solución de permanganato (MnO₄)⁻

CO2CONT: Corriente de gas a tratar

COMP-NIT: Compuestos nitrogenados

CO2+IMP: CO₂ con impurezas

CO2COMP: CO₂ Comprimido

CO2+H2O: CO₂ con Agua

IMPUREZA: Impurezas

AIRE-C: Aire caliente

AIRE-H: Aire húmedo

Para estimar el costo de inversión, considerando el proceso completo de recuperación y purificación del CO₂ se tomó como referencia una planta donde se obtiene el CO₂ grado alimento, el cual se separa de una corriente de gases por absorción con aminas y posteriormente se purifica (planta A), (Sánchez, 2006). Los índices de costo se

obtuvieron de la literatura, (Chemical-Engineering, 2019). En la tabla 4 se muestran los resultados de la actualización del costo total del equipamiento.

Tabla 4. Determinación del costo total actual del equipamiento para CO₂ grado alimento

Costo total del equipamiento en 2006 (\$)	723 018
índice de costo en 2006	499,6
índice de costo actual	708
Costo total actual del equipamiento de la planta de referencia(\$)	1 024 613,18

Para determinar la inversión de la planta de referencia se hizo uso de la metodología establecida, (Peters, 1991). Los resultados se reportan en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de la inversión de la planta de referencia

costo total del equipamiento	1 024 613,18
Costo de instalación del equipamiento	481 568,19
Costo de instrumentación y control	184 430,37
Tuberías instaladas	676 244,69
Facilidades y servicios	717 229,22
Costos totales directos de la planta	3 084 085,67
Ingeniería y supervisión	338 122,34
Costos totales indirectos de la planta	338 122,35
Contingencia	430 337,53
Capital de trabajo	881 167,33
Inversión (\$)	4 733 712,88

Se estimó el costo de inversión de la planta para la obtención del CO₂ grado alimento (planta B) con una capacidad de 3 630,64 kg/h aplicando la regla de la 0.6, (Ulrich, 1985). Se empleó la ecuación 12 y los resultados se muestran en la tabla 6.

$$C_B = C_A \left(\frac{Q_B}{Q_A} \right)^{0.6}$$

Tabla 6. Resultados de la estimación de los costos de inversión de la planta para la obtención del CO₂ grado alimento

Capacidad de B (kg de CO ₂ /h)	3 630,64
Capacidad de A (kg de CO ₂ /h)	2 800
Costo de inversión de A (\$)	4 733 712,88
Costo de inversión de B (\$)	5 532 188,98

2.4 Empleo del CO₂ para la extinción de incendios

Un extintor de incendios se puede describir como un recipiente a presión que contiene un agente que puede descargarse para apagar el fuego. El CO₂ capturado de las emisiones de las fuentes fijas de la textilera puede usarse por sus propiedades para la extinción de incendios. Las características del CO₂ que se requieren para este fin aparecen en la tabla 7 según lo especificado, (Kidde_Fire_Systems, 2021)

Tabla 7. Propiedades físicas y químicas del CO₂ empleado en la extinción de incendios

Apariencia: Estado físico	Gas licuado y presurizado
Apariencia: Color	Incoloro
Olor	De inodoro a ligeramente ácido
Gravedad específica	1,522
Punto o intervalo de ebullición (°C o F)	-56,6 °C o -69,8 F
Punto de fusión (°C o F)	-78,5 °C o 109,2 F (sublimación)
Punto de inflamación (PMCC) (°C o F)	No inflamable
Presión de vapor	838 psig a 70 F y 1 atm
Solubilidad en agua	Soluble
Densidad del vapor (aire=1)	Más pesado que el aire

En dependencia del pH del agua residual habrá una disponibilidad de CO₂ excedente (que no fue empleado en el proceso de neutralización) y podrá comercializarse de acuerdo con la Empresa de Servicios de Seguridad Integral (SEISA).

2.5 Comparación de los posibles usos del CO₂ capturado de las emisiones gaseosas

Según los resultados obtenidos para la planta de captura del CO₂ se recupera este gas con un 99,9 % de pureza, lo cual posibilita que neutralice el agua residual sin que se precise ningún tratamiento adicional. A esto se le añade la ventaja que representa la sustitución de un ácido fuerte (ácido sulfúrico) que impacta negativamente sobre la salud y el ecosistema, así como en el incremento de los costos operacionales. Además el empleo del CO₂ en la neutralización del agua residual textil tributa a un cambio de paradigma en función de lograr la economía circular.

Si el CO₂ se usara en la industria alimentaria conllevaría a la necesidad de lograr una purificación grado alimento por lo que se deberán instalar nuevos equipos y se estimó que la inversión de la planta total alcance un valor de \$ 5 532 188,98, presupuesto que en la actualidad la textilera no puede destinar para ese fin. La industria alimentaria ya tiene proveedores cuya calidad ha sido manifestada durante determinado período de tiempo por lo que para imponerse en este mercado el CO₂ recuperado en la textilera tendría que ofertarse a menor precio y con calidad competitiva.

En el caso del uso para reponer el CO₂ de los extintores el gas recuperado en la textilera también cumple con los criterios de calidad pero tendría que llevarse a cabo su transportación, aunque esta podría ser una alternativa para el uso del CO₂ excedente después de haber sido satisfecho el proceso de neutralización.

2.6 Conclusiones parciales

- 1) Se obtuvieron 3 630,64 kg/h de CO₂ líquido cuya temperatura fue de -23,46 °C y una presión de 1 823,8 kPa, mediante el uso del HYSYS.
- 2) Con un diámetro de tubería 0,032 m se garantiza el valor mínimo de costo de 456,2 \$/a para el bombeo del CO₂ en la sección de distribución.
- 3) De las tres variantes consideradas para el uso del CO₂ recuperado se seleccionó el empleo en la neutralización de las aguas residuales de la textilera “Desembarco del Granma” porque la entidad no puede asumir la inversión adicional que se requiere para el grado alimento.
- 4) Se propone que el CO₂ no empleado en la neutralización se comercialice con la Empresa de Servicios de Seguridad Integral.

Capítulo 3 Evaluación económica y ambiental del empleo del CO₂ como agente neutralizante

En este capítulo se realiza la evaluación económica del uso del CO₂ recuperado de las corrientes gaseosas para el tratamiento de las aguas residuales. Teniendo en cuenta que los daños evitados expresan una medida del ahorro que pueda tener la entidad se requiere una cuantificación de la magnitud en la cual se reducen los impactos medioambientales.

Para la evaluación del impacto ambiental que provoca la sustitución del ácido sulfúrico por el dióxido de carbono (generado por las fuentes fijas) en el proceso de neutralización de las aguas residuales de la textilera se empleó el software Sima Pro 9.0.0.49. Como metodología utilizada se consideró la referida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

3.1 Las externalidades

Como una vía para incentivar la reducción de los gases de efecto invernadero, se hace necesario determinar el importe a aportar por emisiones de CO₂ (bonos de CO₂). Para ello se utilizó el método de transferencia y se consideraron los datos que aparecen en la tabla 8. El país de referencia fue México.

Tabla 8. Datos necesarios para el cálculo de los bonos de CO₂

\$/t CO ₂ emitida en México	43	(Russell, 2023)
PIB México (€)	$1,343 * 10^{12}$	(Datosmacro, 2021)
t de Emisiones CO ₂ México	$4,183 * 10^{11}$	(Orbyt_Ediciones, 2021)
PIB Cuba (€)	2053000	(Swissinfo, 2021)
t de Emisiones CO ₂ Cuba	4722300	(ONEI, 2019)

El costo de los bonos de emisiones de CO₂ determinado fue de 39 \$/t CO₂ emitida.

El régimen de derechos de emisiones de CO₂ se fundamenta en el principio de limitación y comercio. Esto significa que se establece un límite máximo a la cantidad de gases de efecto invernadero que pueden emitir las instalaciones afectadas por el régimen. Dicho límite baja poco a poco para lograr una disminución de las emisiones totales.

Siempre que se mantengan por debajo del límite (de acuerdo a lo que establezca cada país), las instalaciones pueden comprar derechos de emisión, pudiendo comercializar con estos según sus necesidades. El número total de derechos disponibles garantizan que estos puedan tener un determinado valor económico.

En caso de incumplir estos derechos, la Comisión impone fuertes sanciones a las empresas. De hecho, como incentivo, si la instalación reduce sus emisiones, puede conservar su excedente de derechos para cubrir futuras necesidades o venderlos a una instalación que los necesite.

Por otro lado, ante la posibilidad de poder vender estos derechos de emisiones, muchas empresas apuestan por invertir en tecnologías verdes para reducir sus

emisiones. Esto les permite entrar en un mercado en el que se pueden ver muy beneficiados económicamente.

3.2 Tasa de circularidad

Entre los indicadores de circularidad se encuentra el medioambiental que relacionado con el impacto directo en el ecosistema, tales como emisiones, proceso material de salida, producción y consumo. El CO₂ evitado como consecuencia de recuperación y reutilización de materiales es un ejemplo.

Para determinar el indicador de la circularidad se utiliza la ecuación 13, en este caso se entiende como residuo generado las emisiones de CO₂ en las fuentes fijas de la textilera “Desembarco de Granma”, (Arbona, 2019).

$$\frac{\text{Residuo generado}}{\text{Residuo generado} + \text{Material recuperado}} \quad ()$$

El indicador de Circularidad es de 80,3 siendo mayor de un 25 % comportándose de una manera adecuada según lo reportado en la literatura, (Van, 2022).

3.3 Evaluación ambiental de la sustitución del ácido sulfúrico por CO₂

La metodología de evaluación de impacto seleccionada para el presente estudio es la ReCiPe, creada por RIVM, CML, PRé Consultants, Radboud Universiteit, Nijmegen y CE Delft. ReCiPe se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicator 99 es su facilidad de interpretación.

La evaluación del impacto ambiental se realiza por la metodología ReCiPe mediante el uso del software Sima Pro 9.0.0.49. La unidad funcional fue el tratamiento de 27 m³/h

de agua residual. Se consideraron dos escenarios. El escenario 1 se refiere a la situación actual donde todos los gases emitidos por las fuentes fijas son expulsados a la atmósfera y el agua residual se neutraliza con ácido sulfúrico y el escenario 2 considera que el dióxido de carbono es separado de las emisiones gaseosas y se emplea en la neutralización del agua residual en sustitución del ácido sulfúrico.

Los límites del sistema se representan en las figuras 6 y 7 para el proceso actual y el proceso propuesto respectivamente.

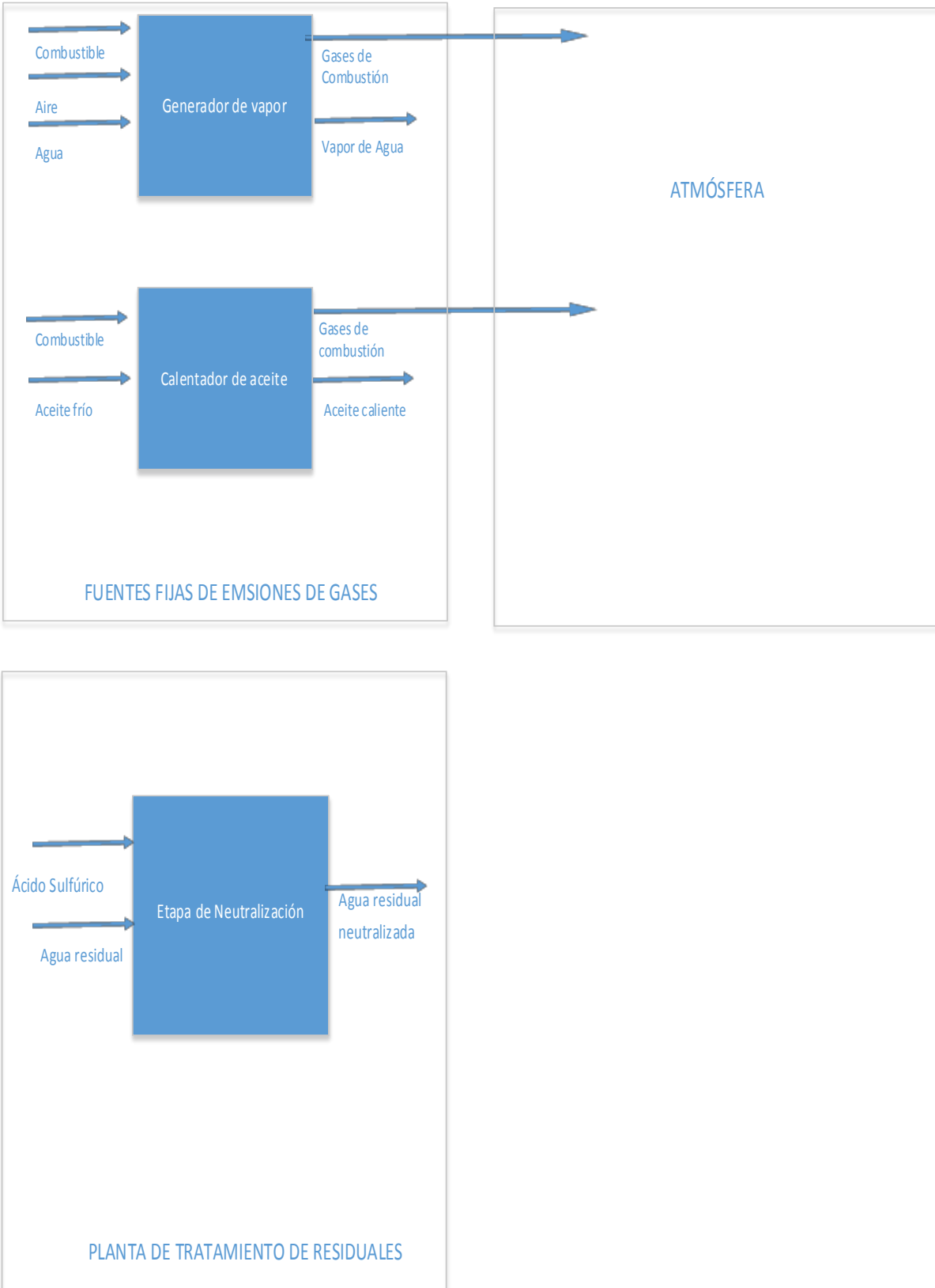


Figura 6. Representación de los Límites del Sistema para el escenario actual.

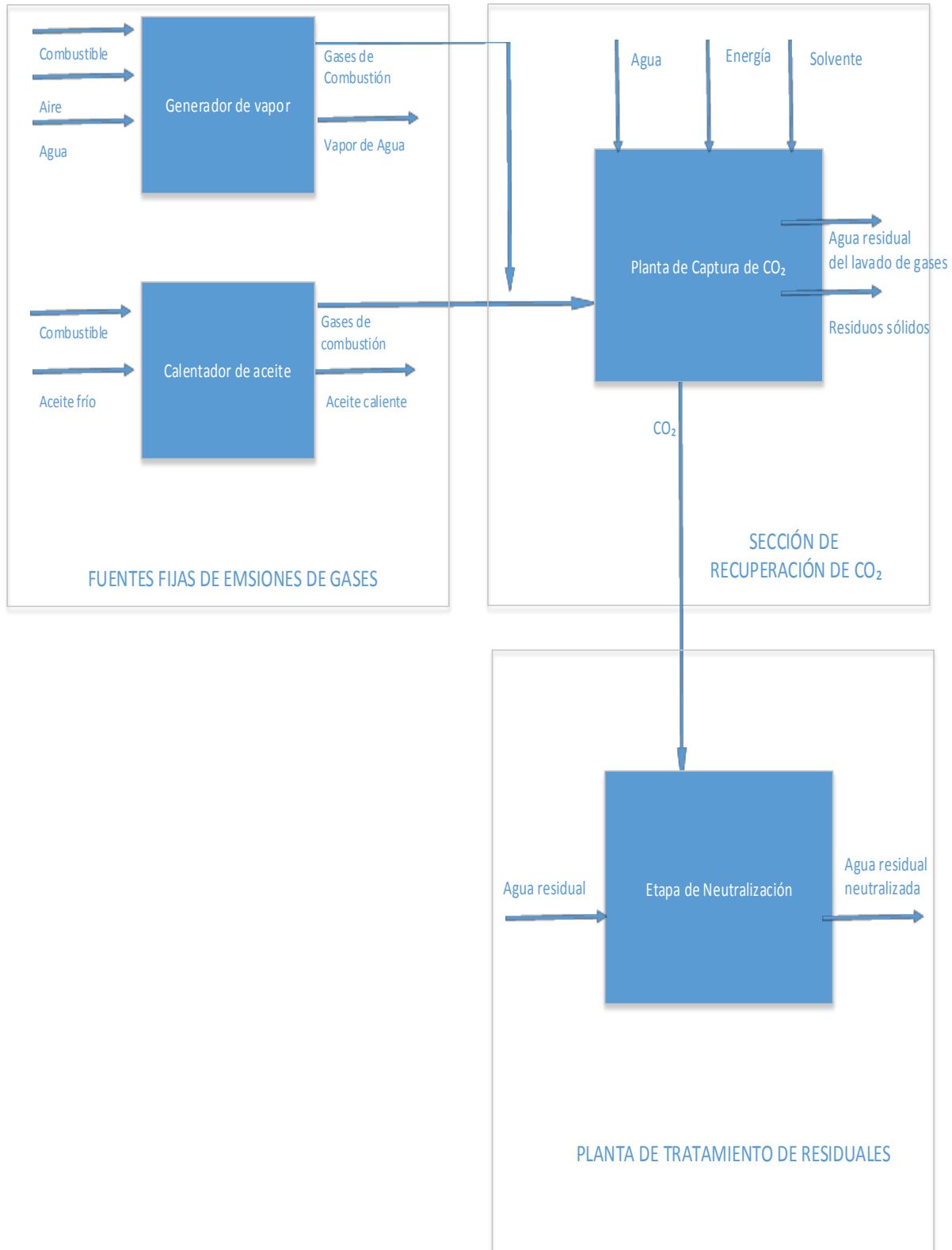


Figura 7. Representación de los Límites del Sistema para el proceso propuesto.

Se llevaron a cabo los inventarios del proceso; para ello se realizaron los balances de masa y energía y se recopilaron los datos suministrados por expertos de la entidad.

Determinación del consumo de H_2SO_4

Las aguas residuales de la textilera han mantenido valores de pH igual a 9 en los últimos cuatro años. El sistema de tratamiento está concebido con una etapa de neutralización, pues es necesario obtener un agua residual con un pH neutro para que la misma pueda ser sometida a un proceso biológico. El pH del agua afluyente a la planta de tratamiento fue 9. Para determinar la cantidad estequiométrica de ácido sulfúrico (ácido fuerte soluble) requerida para la neutralización se consideró la reacción siguiente:

La base de cálculo considerada fue una hora de operación. De acuerdo al pH del agua residual se obtiene una concentración de 10^{-5} mol/L de iones hidroxilos de acuerdo con las ecuaciones 14 y 15 y su cantidad de sustancia se despeja de la ecuación 16, fue de 0,27 mol. Al aplicar las leyes de los cálculos químicos según la ecuación 17 se obtiene una relación de combinación teórica de 0,5.

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{r}
 (\quad) \\
 (\quad) \\
 \hline
 (\quad)
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 (\quad) \\
 (\quad) \\
 \hline
 (\quad)
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 (\quad) \\
 (\quad) \\
 \hline
 (\quad)
 \end{array}
 \end{array}$$

Por lo tanto la cantidad de sustancia de ácido sulfúrico requerida es 0,135 mol, resultado de igualar la relación de combinación teórica con la relación de combinación experimental.

Determinación del consumo de CO₂

Se hace necesario cuantificar la cantidad de CO₂ requerida para neutralizar el residual bajo las mismas condiciones de operación de la etapa de neutralización (flujo de 27 m³/h y pH de 9), por lo que la cantidad de sustancia de iones hidroxilo fue 0,27 mol. La reacción considerada fue:

Para determinar la cantidad de sustancia estequiométrica de dióxido de carbono para la neutralización se igualan la relación de combinación teórica con la relación de combinación experimental. Para el pH de 9 se requieren 220,96 kg.

Balance de energía en el generador de vapor

Para determinar el consumo de combustible y el agua de reposición a la caldera se llevó a cabo un balance de energía en el generador de vapor utilizando el método directo y se tuvieron en cuenta los datos reportados por la textilera. La eficiencia del generador de vapor, desde el punto de vista de la economía es el parámetro más importante, pues caracteriza con qué efectividad el equipo capta el calor liberado por el combustible para la generación de vapor, para ello se necesita obtener la información requerida, (Pons, 1987). Los resultados aparecen en la tabla 9. Se emplearon las ecuaciones 18, 19 y 20.

—

()

$$\frac{Q_1}{m_c (Q_i^y + h_c)} = \eta \quad (9)$$

Eficiencia η

Q_1 : calor útil (kJ/kg)

W_v : cantidad de vapor producido

h_v : entalpía del vapor producido (kJ/kg) evaluada a T y P

h_{aa} : entalpía del agua de alimentación (kJ/kg) evaluada a Temperatura del agua de alimentación y P

m_c : flujo másico del combustible quemado (kg/h)

M_e : flujo másico de extracciones continuas (kg/h)

h_f : entalpía del agua saturada evaluada a la presión de trabajo del generador de vapor (kJ/kg)

Q_d : calor del combustible (kJ/kg)

Q_i^y ; calor específico inferior de combustión

h_c y h_a : entalpías de precalentamiento y atomización

En la figura 8 se representa el esquema termoenergético de la UB “Desembarco del Granma”. El agua de reposición al generador de vapor debe pasar a través del sistema de tratamiento en la planta de servicios de ingeniería para que la misma tenga la calidad requerida.

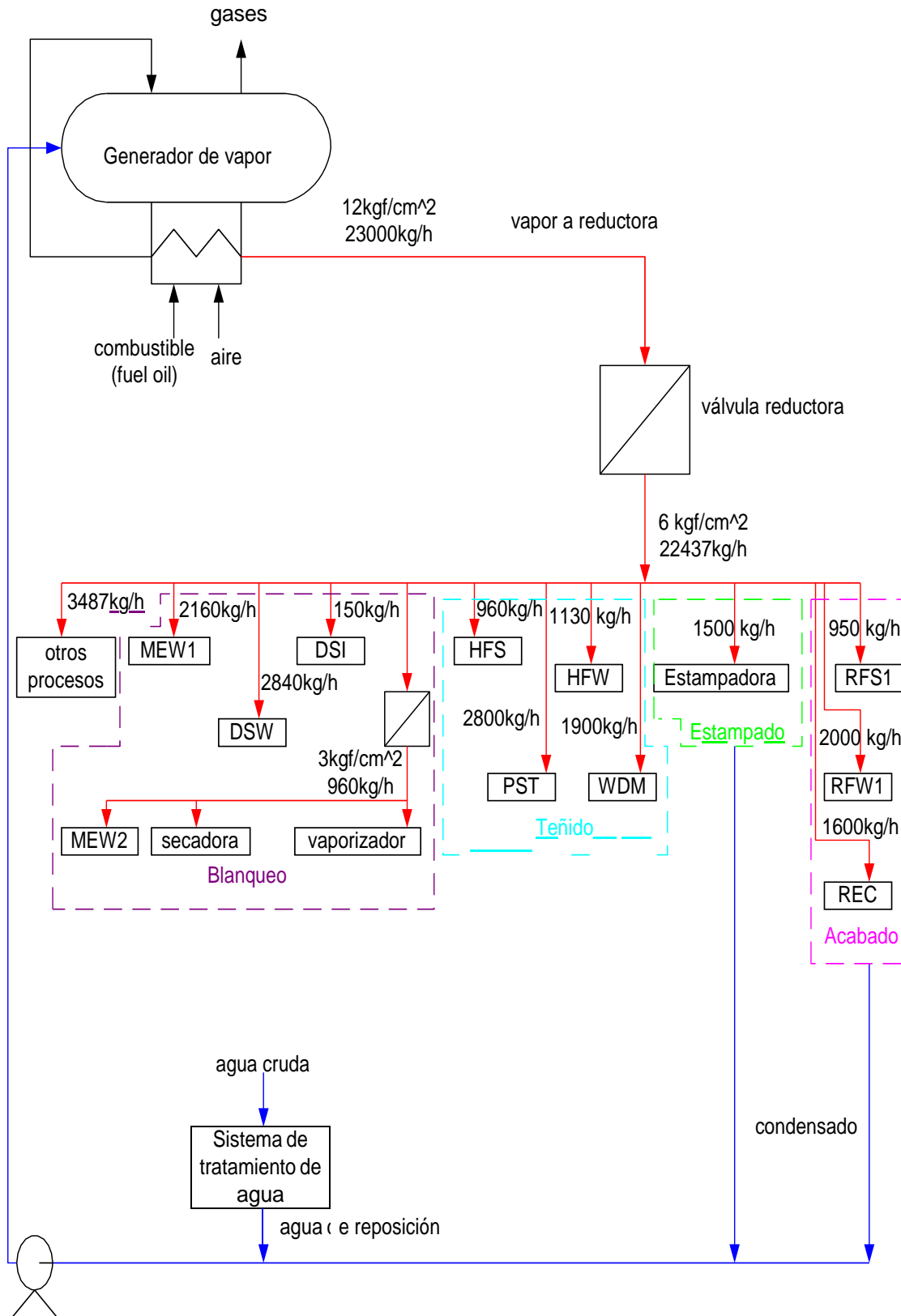


Figura 8 Esquema termoenergético de la UB "Desembarco del Granma"

Tabla 9 Resultados de aplicar los balances en el generador de vapor.

P trabajo de la caldera(kgf/cm ²)	12
P trabajo de la caldera(MPa)	1,176798
T de trabajo de la caldera(°C)	191,5
h _v (kJ/kg) (Keenan, 1988)	2795,56
m _c (kg/h)	1530
W _v (kg/h)	23000
M _e (kg/h)	0,6434
T _{aa} (°C)	90
h _{aa} (kJ/kg)	293,78
h _f (kJ/kg)	794,732
Q ₁ (kJ/kg)	37608,646
Q _i ^γ (kJ/kg)	39386
Entalpía del combustible, h _c (kJ/kg)	176,86
Q _d (kJ/kg)	39562,86
Eficiencia %	95,06

Se realizó un balance de agua según la ecuación 21. Se determinó el % de agua de reposición. Los resultados se muestran en la tabla 10.

()

Tabla 10. Determinación del por ciento de agua de reposición

Gagua(kg/h)	23000
G condensado recuperado (kg/h)	5100

G agua de reposición(kg/h)	17900
% de agua de reposición	77,8

Una vez cuantificados los valores de las corrientes del proceso a través de los balances de masa y energía se empleó el programa Sima Pro para comparar el escenario actual con el proceso propuesto.

En la figura 9 se relacionan los puntos y las categorías de daño. El punto representa la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo. Si se comparan las tres categorías de daños, la salud humana resulta la más beneficiada ya que se logra una mejora ambiental que repercute en una disminución de 62,8 puntos de la afectación a esta categoría. También los daños al ecosistema se mitigarán en 6,27 puntos. Sin embargo, el impacto sobre los recursos solo disminuye en 0,005 puntos pues en ambos escenarios ocurren procesos de combustión donde el combustible empleado es fuel oil.

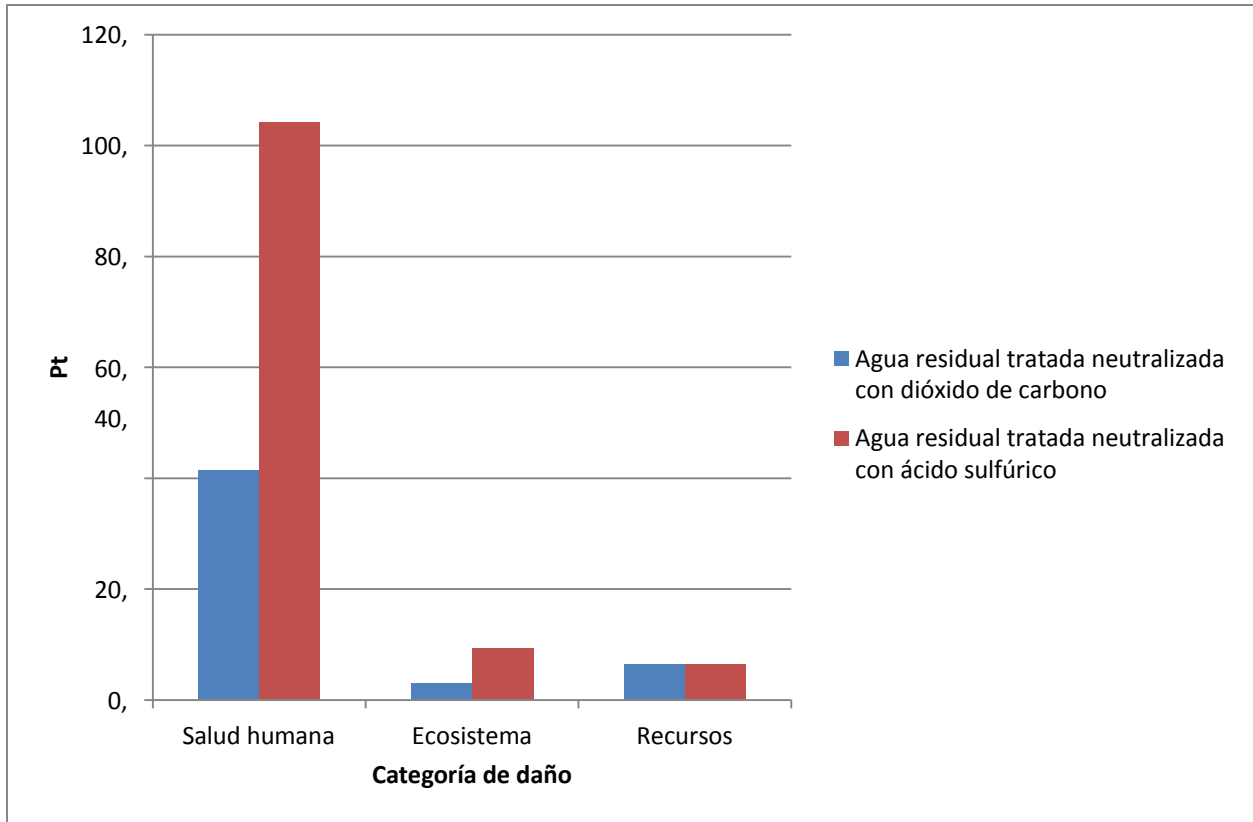


Figura 9. Comparación en categorías de daños del proceso de neutralización de aguas residuales antes y después de la sustitución del ácido sulfúrico por CO₂ (Método: *ReCiPe Endpoint*)

3.4 Análisis económico del empleo del CO₂ para neutralizar aguas residuales

Es factible neutralizar el agua residual de la textilera “Desembarco del Granma” con CO₂ según se ha estudiado, (Arbona, 2022). Se procedió a evaluar desde el punto de vista económico esta variante pues también tiene una repercusión ambiental significativa como se ha visto anteriormente.

Para actualizar los costos se empleó la ecuación 22. El índice de costo actual (2021) es de 708 según (Chemical Engineering, 2022).

Se determinó el costo total del equipamiento y los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Determinación del costo total del equipamiento

Equipo	Costo (\$)	Cantidad	Costo Total (\$)	Costo Total actualizado (\$)
Ciclón	11 000	1	11 000	24 723,81
Soplador	1 266	1	1 266	1 266,00
Intercambiador de calor enfriador de gases	6 000	1	6 000	13 485,71
Columna rellena	8 000	1	8 000	8 000,00
Venturi	4 500	1	4 500	10 114,29
Bombas	4 822	4	19 288	42 260,22
Intercambiador de calor para recuperación del solvente	32 480	1	32 480	73 002,67
Desorbedor	7000	1	7000	7000,00
Tuberías (230 m)	2,8	230 m	601,21	1 317,26
Tanques de almacenamiento de CO ₂	15 000	2	30 000	65 730,34
Tanques de almacenamiento de MEA	10 000	1	10 000	21 910,11
Filtro	3000	1	3000	3 000,00
Costo total del equipamiento (\$)				271 810,41

Se determinó la inversión. Los resultados aparecen en la tabla 12.

Tabla 12. Cálculo de la inversión

costo total del equipamiento	271 810,41
Costo de instalación del equipamiento	127 750,89
Costo de instrumentación y control	48 925,87
Tuberías instaladas	179 394,87
Facilidades y servicios	190 267,28
Costos totales directos de la planta	818 149,34
Ingeniería y supervisión	89 697,43
Costos totales indirectos de la planta	89 697,43
Contingencia	114 160,37
Capital de trabajo	233 756,95
Inversión	1 255 764,11

Se determinó el costo total de producción, utilizando la ecuación 23, el cual se refleja en la tabla 13.

Tabla 13. Determinación del costo total de producción

()

Componente	Costo (\$)/año
materia prima	604 898,81
mano de obra	180 000,00
supervisión	48 000,00

requerimientos	400 000,00
mantenimiento y reparación	3 767,29
Costos directos de producción	1 236 666,10
Depreciación	125 576,41
Cargos fijos	125 576,41
Costos fabricación	1 362 242,51
administrativos	40 000,00
distribución y ventas	40 000,00
investigación y desarrollo	100 000,00
Gastos generales	180 000,00
CTP(\$/año)	1 542 242,51

Se determinaron indicadores dinámicos tales como el VAN, TIR y PRD que resultaron ser de \$ 2 445 376,8; 38% y 2,82 años respectivamente. El perfil del VAN se muestra en la figura 10.

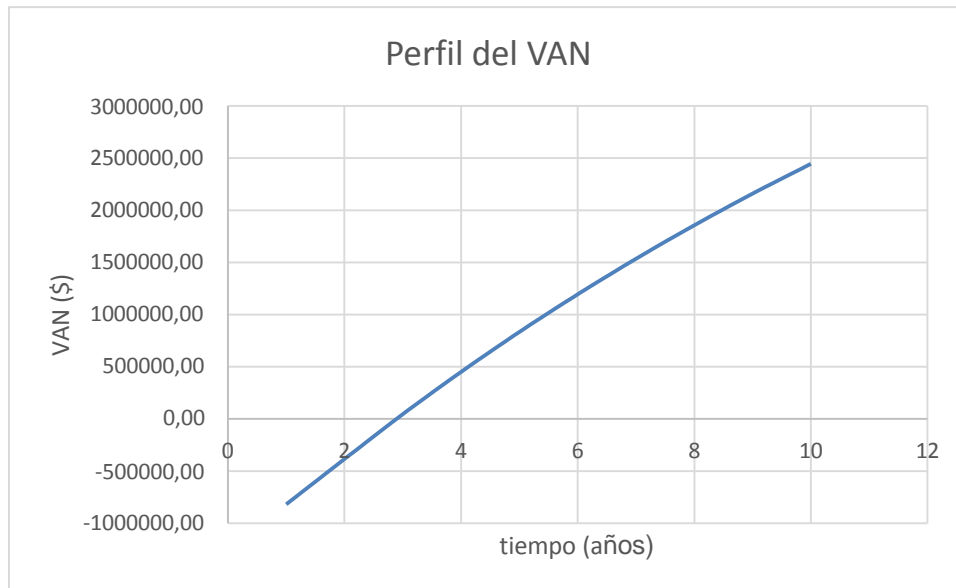


Figura 10. Perfil del VAN

Los indicadores dinámicos evaluados presentan valores satisfactorios por lo cual es factible desde el punto de vista económico realizar esta inversión.

3.5 Conclusiones parciales

- 1) Se determinó el costo de los bonos de emisiones de CO₂ en Cuba el cual fue de 39 \$/t CO₂ emitida.
- 2) El indicador de circularidad calculado fue de 80,3 %, teniendo en cuenta que se recuperan 3,6 t/h de CO₂ de las 4,4 t/h producidas.
- 3) La categoría de daño salud humana resulta la más beneficiada al emplear el CO₂ en lugar de H₂SO₄ en el proceso de neutralización, lo que constató con el empleo del Sima Pro.
- 4) Se determinó que la inversión para recuperar el CO₂ de la corriente de gases y emplearlo en la neutralización fue de \$ 1 255 764,11, el costo de producción fue de 1 542 242,51 \$/año y que se recuperará en 2,82 años la inversión.

Conclusiones

- 1) El CO₂ capturado en la textilera “Desembarco del Granma” tiene propiedades que propician su uso en sectores tales como: la neutralización de aguas residuales textiles, la industria de alimentos y la extinción de incendios.
- 2) En las condiciones actuales el empleo del CO₂ en la neutralización de las aguas residuales de la textilera “Desembarco del Granma” resulta la vía más adecuada en comparación con las otras variantes y no requiere de gastos de transportación adicionales.
- 3) Se obtuvo un indicador de circularidad de 80,3 %, lo que propicia un modelo que permite un cierre del ciclo del CO₂.
- 4) La categoría de daño salud humana resultó la más beneficiada al emplear el CO₂ en el proceso de neutralización ya que se disminuyen 62,8 puntos de la afectación a esta categoría.
- 5) Los indicadores dinámicos VAN, TIR y PRD para la planta de recuperación del CO₂ fueron \$ 2 445 376,8; 38 % y 2,82 años respectivamente.
- 6) El empleo del CO₂ generado en la textilera “Desembarco del Granma” en la neutralización de las aguas residuales de la propia industria contribuye a la mejora ambiental y al cambio de paradigma hacia una economía circular.

Recomendaciones

- 1) Emplear el CO₂ capturado de las fuentes fijas en el proceso de neutralización del agua residual de la textilera “Desembarco del Granma”.
- 2) Utilizar el CO₂ excedente con fines comerciales.

Bibliografía

- AIRLIQUIDE.COM. 2022. *Tratamiento de aguas residuales industriales* [Online]. Available: https://es.airliquide.com/statics/2022-05/ebook_tratamiento_de_aguas_residuales_industriales_revamping.pdf?VersionId=Rd6AtBewKcHyGgojzNKFP2sMJ9jyMec [Accessed].
- ARBONA, M. 2019. *Propuesta tecnológica para reducir el impacto sobre la calidad del aire de los procesos auxiliares de combustión en la UB "Desembarco del Granma"*. Tesis presentada en opción al grado de máster en Ingeniería Química, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ARBONA, M., CABRERA, I., FABELO, J., O' FARRILL, M., GARCÍA, M. 2022. Definición de la ley de velocidad para la reacción entre las aguas residuales textiles y dióxido de carbono. *Centro Azúcar*, Vol. 49, pp. 91-101.
- BARTOSIK, R., MALINARICH, H., EXILART, E. 2006. *Almacenaje de Granos en Bolsas Plásticas: Sistema Silobag* [Online]. Available: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/almacenaje-de-granos-en-bolsas-plasticas-t26448.htm> [Accessed].
- CAMPOS, M. 2022. *Estudio de Métricas para la Economía Circular. Análisis de Proyecto y Posible Aplicación a una Línea de Transporte Urbano*. Tesis presentada en opción al grado de Máster, Universidad Politécnica de Madrid.
- CAPTURE-PROJECT. 2008. *Three basic methods to separate gases* [Online]. Available: www.CO2captureproject.com [Accessed].
- CITMA, M. D. C., TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE. 2022. *Cuba, urge avanzar en economía circular*. [Online]. La Habana, Cuba. Available: <https://www.citma.gob.cu/cuba-urge-avanzar-en-economia-circular/> [Accessed].
- CORREA, J. 2023. La Economía Circular un modelo para la desarrollo sostenible en Cuba. In: CENTRO DE ESTUDIOS DE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE, C. (ed.). Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos.
- CHEMICAL-ENGINEERING 2019. *Economics Indicators*. Vol. 126, pp.151-152.
- DATOSMACRO. 2021. *Mejora el PIB en México* [Online]. Available: <https://datosmacro.expansion.com/pib/mexico?anio=2021#:~:text=En%202021%20la%20cifra%20del,M%E2%82%AC%20respecto%20a%202020>. [Accessed].
- DE LA COBA, M. 2022. *Diseño de una planta para la recuperación de CO₂ de la corriente de gases emitidas por fuentes fijas de la UB "Desembarco del Granma"*. Tesis presentada en opción al grado de Ingeniero Químico, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- DÍAZ-CANEL, M. 2022. *El apasionante, necesario y estratégico tema de la economía circular* [Online]. La Habana, Cuba. Available: <https://www.presidencia.gob.cu/es/noticias/el-apasionante-necesario-y-estrategico-tema-de-la-economia-circular/> [Accessed].
- DOTRAINING 4 FUTURE, S. L., CON CIF. B-56.130.875 2023. *¿Cómo reducir emisiones y la huella de carbono en la Industria alimentaria? DOTRAINING 4 FUTURE, S.L., con CIF. B-56.130.875*.
- ESPÍNDOLA, C., VALDERRAMA 2012. Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. *Información Tecnológica*, Vol. 23, pp.163-176.
- ESPÍRITU, R. 2012. *Grado de absorción del dióxido de carbono por los absorbentes químicos, hidróxido de sodio y monoetanolamina, en una columna de relleno en el laboratorio de operaciones y procesos unitarios de la FIQ-UNCP*. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional Del Centro Del Perú.
- EXTINTORES-CARLISA. 2022. *Qué es un extintor de CO₂ o dióxido de carbono, características y usos*. [Online]. Available: <https://extintorescarlisa.es/tipos-de-extintores/extintor-de-co2/> [Accessed].
- FARAJPOURLAR, M., JANAUN, J., KARIMAN, A. 2015. Gas flow through vertical pipe and perforated vertical pipe. *International Journal of ChemTech Research*, Vol.7.

- INDUSTRIAL.AIRLIQUIDE.ES. 2021. *INYECTOR-POROXYAL* [Online]. España. Available: https://es.airliquide.com/statics/2021-09/nexelia_wt_inyector_poroxal_es_1.pdf?VersionId=qRtB0kw5muLi9FJPGoG1pPEwbd3Zu. [Accessed].
- JAIME, A., TINOCO-LÓPEZ, O. 2006. Métodos de valuación de externalidades ambientales provocadas por obras de ingeniería. *INGENIERÍA Investigación y Tecnología*, Vol. VII, pp. 105-119.
- KEENAN, J. 1988. *Thermodynamic Properties of water including vapor, liquid and solid phases*.
- KIDDE_FIRE_SYSTEMS 2021. Hoja de datos de seguridad.
- LEVENSPIEL, O. 2004. Ingeniería de las reacciones químicas. In: LIMUSAWILEY (ed.). México.
- LIU, Q., WU, L., JACKSTELL, R., BELLER, M. 2015. Using carbon dioxide as a building block in organic synthesis. *Nature Communications*, Vol. 6, pp. 1-15.
- LÓPEZ, A. 2013. *Absorción de dióxido de carbono, a elevadas presiones parciales, por disoluciones acuosas de mezclas binarias de alcanolaminas*. Tesis doctoral, Universidad de Jaén.
- MACARTHUR, E. 2022. Índice de circularidad. Fundación Vida Sostenible.
- MARCOS, L. 2023. Las siete "R" básicas de la Economía Circular: rediseñar, reducir, reutilizar, reparar, renovar, recuperar y reciclar. *Conferencia Ambiental presencial y online*. Universidad de Burgos.
- MARTÍNEZ, P. 2018. *Estudio en planta piloto de la captura e hidrogenación a combustibles de CO₂ promovidas electroquímicamente*. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias, Universidad Complutense de Madrid.
- MCNUTT, M., RAMAKRISHNAN, V. 2020. Climate Change Evidence & Causes.
- MOHAMED, N., KHEIREDDINE, M, HUSSIN, F Y TI, L. 2022. A Systematic Review of Amino Acid-Based Adsorbents for CO₂ Capture. *Energies*, Vol. 15, pp. 1-34.
- MORENO, S. 2019. *Estudio de sistemas de captura de CO₂ y métodos de concentración de CO₂ en corrientes gaseosas aplicados a ciclos combinados*. Proyecto Fin de Grado Ingeniería Química, Universidad de Sevilla.
- ONEI 2019. Anuario Estadístico de Cuba 2019. Cuba.
- ORBYT_EDICIONES. 2021. *Emisiones de CO₂* [Online]. México. Available: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/mexico> [Accessed].
- PALLÉ, C. 2018. El dióxido de carbono como forma sostenible de reducir el pH del agua. *Tecnoagua*, 34, pp 84-88.
- PÁVLOV, K. R., P., NOSKOV. A. 1981. *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*.
- PÉREZ, L. 2020. *Determinación de la influencia de variables de operación en el proceso de neutralización de aguas residuales textiles*. Tesis presentada en opción al grado de ingeniero químico, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- PERRY, C. 1992. Manual del ingeniero químico. *Sección 10 Transferencia de calor. Sección 11 Equipos de transferencia de calor*. 6ta edición. Nueva York: Mc Graw Hill.
- PETERS, M. 1991. Plant design and economics for chemical engineers. Mc Graw -Hill.
- PONS, A. 1987. *Termodinámica térmica para ingenieros químicos*, La Habana, Cuba, Editorial pueblo y Educación.
- QUEIJO, A. 2017. *Sistemas de captura de CO₂*. Tesis presentada en opción al grado de máster, Universidad de Coruña.
- RAMOS, R. 2016. *Análisis comparativo de compresores transcíticos para CO₂*. Universidad de Sevilla.
- ROSABAL, J. Y. V., M. 2006. *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas* La Habana.
- RUSSELL, B. 2023. *Impuesto a la Emisión de Gases Contaminantes a la Atmósfera (Estado de México)* [Online]. Available: <https://www.russellbedford.mx/sp/publicaciones/posts/2023/january/impuesto-a-la->

[emisi%C3%B3n-de-gases-contaminantes-a-la-atm%C3%B3sfera-estado-de-m%C3%A9xico/#:~:text=Este%20impuesto%20se%20paga%20de,dentro%20del%20territorio%20del%20Estado">emisi%C3%B3n-de-gases-contaminantes-a-la-atm%C3%B3sfera-estado-de-m%C3%A9xico/#:~:text=Este%20impuesto%20se%20paga%20de,dentro%20del%20territorio%20del%20Estado](#) [Accessed].

- SÁNCHEZ, A., OLIVER, R. , ESTRANY, F. 2006. Planta para la recuperación del dióxido de carbono de los gases de combustión. *Técnica Industrial*, Vol. 261, pp. 35-41.
- SINFOROSO, S., RICARDEZ, J., PELEGRÍN, A. 2019. Externalidades ambientales desde el enfoque del costo para la toma de decisiones en materia ambiental. Caso de una empresa cafetalera. *Retos de la Dirección*, Vol. 13, pp. 170-187.
- SOSA, C., Y BOLUFÉ, J. 2019. Inventario Nacional de Gases de Efecto de Invernadero. *Serie Entendiendo el Cambio Climático*.
- SWISSINFO. 2021. *Cuba creció un 1,3 % en 2021, según cifras oficiales* [Online]. Available: https://www.swissinfo.ch/spa/cuba-econom%C3%ADa_cuba-creci%C3%B3-un-1-3---en-2021--seg%C3%BAn-cifras-oficiales/47771236#:~:text=El%20PIB%20cubano%20en%20el,de%202.053%20millones%20de%20d%C3%B3lares. [Accessed].
- TAMAJÓN, F. 2015. *Tratamiento de Corrientes Gaseosas mediante Absorción en Disoluciones Organo-Acuosas de N-Metildietanolamina*. Tesis presentada en opción al grado de doctor, Universidad de Vigo.
- TAVAN, Y., HOSSEIN, S. 2017. A novel rate of the reaction between NaOH with CO₂ at low temperature in spray dryer. *Petroleum*, Vol. 3, pp. 51-55.
- TEXVI 2015. Fichas tecnológicas para el teñido a la continua de tejidos de pe/vi, pe/co y co. Santa Clara, Cuba: UB textil "Desembarco del Granma".
- TOPHAM, S., BAZZANELLA, A., SCHIEBAHN, S. 2014. Carbon Dioxide. *Enciclopedia Ullmann's*. Wiley-VCH.
- TREYBAL, R. 1985. Operaciones con Transferencia de Masa. Edición Revolucionaria, La Habana.
- ULRICH, G. 1985. Diseño y economía de los procesos de ingeniería química.
- VAN, B., NÚÑEZ, G. 2022. Metodología para la evaluación de avances en la economía circular en los sectores productivos de América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Anexos

Anexo I

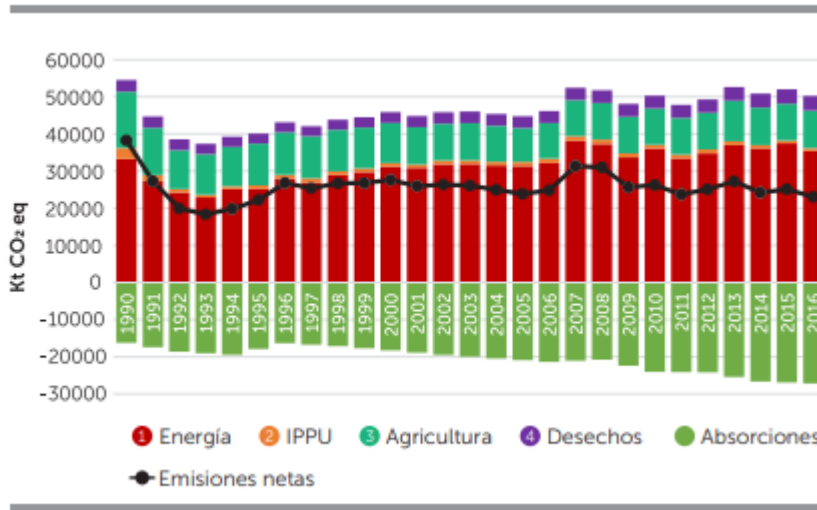
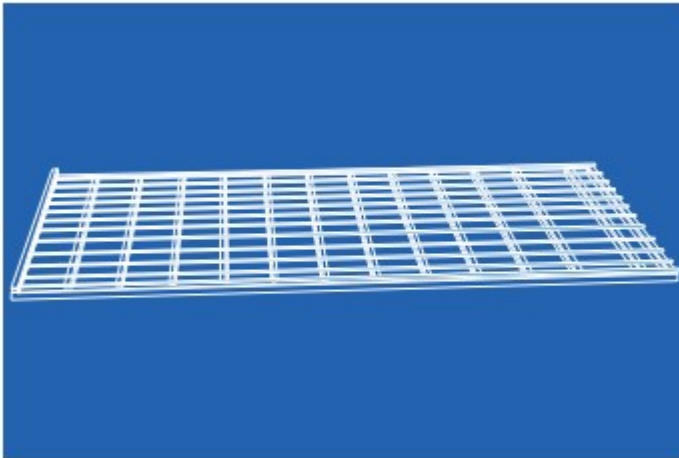


Figura 1 Balance de emisiones y absorciones de GEI en kt de CO₂ equivalentes por sectores, para el período 1990-2016.

Fuente: Equipo Técnico de Inventario de GEI, (Sosa, 2019)

Anexo II Representación del INYECTOR-POROXYAL



Anexo III Vista de una planta que utiliza CO₂ para la neutralización de las aguas residuales

