



**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y  
URBANISMO**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
INDUSTRIAL**

**TESIS**

**SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y USO DE CO<sub>2</sub> DE  
LA PLANTA ALCOHOLERA INDUSTRIAL PUCALÁ  
PARA MITIGAR LOS GASES DE EFECTO  
INVERNADERO 2017**

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
INDUSTRIAL**

**Autor (es):**

**Esquives Santillán Angie Liseth**

**Saavedra Montenegro Flavio Cesar**

**Asesor:**

**Dr. Vásquez Coronado Manuel Humberto**

**Línea de investigación:**

**Gestión de operaciones y logística**

**Pimentel – Perú**

**2017**

**SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y USO DE CO2 DE LA PLANTA ALCOHOLERA  
INDUSTRIAL PUCALÁ PARA MITIGAR LOS GASES DE EFECTO  
INVERNADERO 2017**

**Aprobación del jurado**

---

Dr. Vásquez Coronado Manuel Humberto  
**Asesor**

---

Mg. Arrascue Becerra Manuel Alberto  
**Presidente del Jurado de Tesis**

---

Mg. Larrea Colchado Luis Roberto  
**Secretario del Jurado de tesis**

---

Dr. Vásquez Coronado Manuel Humberto  
**Vocal del Jurado de tesis**

## **Dedicatoria**

A mis padres, quienes me apoyan en cada etapa de mi vida, a mi novio Oscar quien me brinda su apoyo incondicionalmente y a Dios por guiarme en cada paso que doy.

Angie Esquives

A Dios, quien me da la vida y las fuerzas para seguir siempre con mis sueños y metas, a mis padres que siempre están a mi lado apoyándome y cuidándome.

Flavio Saavedra

## **Agradecimiento**

Quiero agradecer principalmente a Dios porque me da la fortaleza para seguir adelante, a mis padres porque siempre me dan la fuerza necesaria y el apoyo para lograr mis metas y a mis docentes que me apoyaron para lograr culminar mi etapa universitaria.

Angie Esquivés

Agradezco primero a Dios porque es él quien me da la fortaleza para seguir cumpliendo mis metas, a mis padres y su apoyo incondicional, a mi tía Carmencita Peña por su apoyo total en toda mi vida profesional y personal, a toda mi familia y docentes que ayudaron en mi formación como profesional inculcando siempre los valores.

Flavio Saavedra

# SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y USO DE CO<sub>2</sub> DE LA PLANTA ALCOHOLERA INDUSTRIAL PUCALÁ PARA MITIGAR LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO 2017

Angie Liseth Esquivas Santillan<sup>1</sup>

Flavio Cesar Saavedra Montenegro<sup>2</sup>

## Resumen

*La presente investigación tuvo como objetivo diseñar un sistema de recuperación y uso del CO<sub>2</sub> para mitigar los gases de efecto invernadero de la planta alcoholera Industrial Pucalá, utilizando tecnologías recientes que han venido aportando en el desarrollo de otras investigaciones. Este sistema de recuperación se desarrolló para ser aplicado en la producción de alcohol etílico, con la finalidad de evitar las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por la planta, específicamente el CO<sub>2</sub> que es uno de los gases más contaminantes que son emitidos al medio ambiente. Se diagnosticó el estado actual de estas emisiones de CO<sub>2</sub> que son emitidas por la planta. Obteniendo como resultado 6446.2 T CO<sub>2</sub>/Año, siendo esta una fuente inaprovechable y más aún contaminante. Después de evaluar entre varias tecnologías, se seleccionó la tecnología Haffmans con un proceso de recuperación y purificación de CO<sub>2</sub> que permite obtener este gas con una pureza de 99.998%. Además se identificaron otras aplicaciones que se le puede dar a este gas (CO<sub>2</sub>), a los cuales se consideraron el consumo de bebidas carbonatadas, liquido de refrigeración, en la mezcla con Argón (soldadura), en la mezcla con Helio y con la mezcla con Hidrogeno para el gas de síntesis. Se concluyó con una evaluación económica el cual permitió ver que esta investigación es muy rentable en su aplicación. La inversión total será de 2'814,206 nuevos soles, el costo de fabricación será de 1.084 nuevos soles/kg. Tendrá una Tasa Interna de Rentabilidad Económica de 217%, y un Valor Actual Neto (VAN) >0. El tiempo de retorno sobre la inversión es de 1 año.*

**Palabras claves:** CO<sub>2</sub>, recuperación, mitigación, planta alcoholera

---

<sup>1</sup> Adscrita a la Escuela Académica de Ingeniería Industrial Pregrado, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, email: [esantillanangie@crece.uss.edu.pe](mailto:esantillanangie@crece.uss.edu.pe) Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9469-2401>

<sup>2</sup> Adscrito a la Escuela Académica de Ingeniería Industrial Pregrado, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, email: [smontenegroflav@crece.uss.edu.pe](mailto:smontenegroflav@crece.uss.edu.pe) Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6887-1043>

# SYSTEM OF RECOVERY AND USE OF CO<sub>2</sub> FROM THE PUCALÁ INDUSTRIAL ALCOHOL INDUSTRY PLANT TO MITIGATE THE GREENHOUSE GASES 2017

## Abstract

*The objective of this research was the recovery system and the use of CO<sub>2</sub> to mitigate the greenhouse gases of the Industrial Pucalá alcohol plant, in order to contribute to the development of other investigations. This recovery system was redefined to be applied in the production of ethyl alcohol, with the purpose of avoiding the emission of gases emits the greenhouse effect emitted in the plant, the CO<sub>2</sub> that is one of the most polluting gases that are emitted to the environment. The current status of these CO<sub>2</sub> emissions that are emitted by the plant is diagnosed. Obtaining as a result 6446.2 TN CO<sub>2</sub> / Year, being this an invaluable and even more contaminating source. After evaluating between several technologies, Haffmans technology can be selected with a process of recovery and purification of CO<sub>2</sub> that allows to obtain this gas with a purity of 99.998%. In addition, you can identify other applications that can be given to this gas (CO<sub>2</sub>), as well as consider the consumption of carbonated beverages, the cooling liquid, the mixture with argon (welding), the mixture with helium and the mixture with hydrogen for the synthesis gas. It was concluded with an economic evaluation. The total investment will be 2'814,206 nuevos soles, the manufacturing cost will be 1.0848 nuevos soles / kg. It will have an Internal Economic Profitability Rate of 217%, and a Net Present Value (NPV) > 0. The return time on the investment is 1 year.*

**Keyword:** CO<sub>2</sub>, recovery, mitigation, alcohol plant

## ÍNDICE GENERAL

<b>Dedicatoria</b> .....	3
<b>Agradecimiento</b> .....	4
<b>Resumen</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	6
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
1.1. <b>Realidad problemática</b> .....	13
1.2. <b>Trabajos previos</b> .....	15
1.3. <b>Teorías relacionadas al tema</b> .....	18
1.3.1. <b>Mitigación de los gases de efecto invernadero</b> .....	18
1.3.2. <b>Selección de un proceso industrial de captura y purificación de CO<sub>2</sub></b> .....	24
1.3.3. <b>Tecnologías para la recuperación de co<sub>2</sub></b> .....	27
1.4. <b>Formulación del problema</b> .....	38
1.5. <b>Justificación e importancia del estudio</b> .....	38
1.6. <b>Hipótesis</b> .....	39
1.7. <b>Objetivos</b> .....	39
1.7.1. <b>Objetivo general</b> .....	39
1.7.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	39
<b>II. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	41
2.1. <b>Tipo y diseño de investigación</b> .....	41
2.2. <b>Población y muestra</b> .....	42
2.3. <b>Variables y operacionalización</b> .....	42
2.4. <b>Técnicas e instrumentos de recolección de información</b> .....	44
2.5. <b>Procedimiento de análisis de datos</b> .....	45
2.6. <b>Aspectos éticos</b> .....	45
2.7. <b>Criterios de rigor científico</b> .....	46
<b>III. RESULTADOS</b> .....	48
3.1. <b>Diagnóstico de la empresa</b> .....	48
3.1.1. <b>Información general</b> .....	48
3.1.2. <b>Descripción del proceso fermentativo</b> .....	51
3.1.3. <b>Análisis de la problemática</b> .....	53
3.1.3.2. <b>Herramientas de diagnóstico</b> .....	58
3.1.4. <b>Situación actual de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la fermentación</b> .....	59
3.2. <b>Selección de tecnología para recuperar y purificar co<sub>2</sub> obtenido de los fermentadores</b> .....	61

3.2.1.	Fundamentación .....	63
3.2.2.	Objetivos de la propuesta. ....	64
3.2.3.	Tecnología propuesta para recuperación y purificación de CO2 .....	65
3.2.4	Mitigación de CO2 en los gases de efecto invernadero con la propuesta. ....	93
3.2.5	Evaluación Económica para instalar planta de recuperación y purificación del CO2 Haffmans en la Planta alcoholera Pucalá.....	94
3.2.5.1	Beneficio/costo .....	94
3.2.5.2	Inversión total del proyecto .....	95
3.2.5.3	Costo de producción de co2 purificado .....	96
3.2.5.4	Análisis de rentabilidad. ....	97
3.2.5.5	Financiamiento de la inversión .....	98
3.2.5.7	Análisis de rentabilidad .....	100
3.2.5.8	Tiempo de recuperación del dinero .....	100
3.2.5.9	Tiempo de retorno sobre la inversión (tri).....	100
3.3.	Discusión de resultados.....	101
IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	104
4.1.	Conclusiones. ....	104
4.2.	Recomendaciones .....	105
	REFERENCIAS .....	106
	ANEXO .....	109

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1</b> GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	21
<b>TABLA 2</b> OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE DEPENDIENTE E INDEPENDIENTE. ....	43
<b>TABLA 3</b> GUÍA DE OBSERVACIÓN. ....	53
<b>TABLA 4</b> PRODUCCIÓN MENSUAL DE ALCOHOL ETÍLICO. ....	54
<b>TABLA 5</b> PRODUCCIÓN DIARIA DE ALCOHOL ETÍLICO. ....	55
<b>TABLA 6</b> MÉTODO DE CRITERIO TÉCNICO PARA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE CO <sub>2</sub> .....	62
<b>TABLA 7</b> ESPECIFICACIONES DEL SEPARADOR DE ESPUMA .....	67
<b>TABLA 8</b> HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL TANQUE DE PRESURIZADO .....	71
<b>TABLA 9</b> ESPECIFICACIONES DEL SCRUBBER. ....	73
<b>TABLA 10</b> ESPECIFICACIONES DEL COMPRESOR. (SEGÚN PROVEEDOR) .....	76
<b>TABLA 11</b> ESPECIFICACIONES DEL FILTRO DE CARBÓN ACTIVO. ....	78
<b>TABLA 12</b> ESPECIFICACIONES DEL SECADOR. ....	80
<b>TABLA 13</b> ESPECIFICACIONES DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO. ....	83
<b>TABLA 14</b> ESPECIFICACIONES DE LA TAPA DEL FERMENTADOR. ....	87
<b>TABLA 15</b> ESPECIFICACIONES DE TUBERÍAS. ....	87
<b>TABLA 16</b> BALANCE DE MATERIALES DEL PROCESO HAFFMANS PARA UNA PRODUCCIÓN DE 805.78 KG/HR DE CO <sub>2</sub> PURIFICADO (*).....	92
<b>TABLA 17</b> BENEFICIO/COSTO.....	94
<b>TABLA 18</b> INVERSIÓN TOTAL PARA INSTALACIÓN DE LA PLANTA DE TECNOLOGÍA HAFFMANS. ....	95
<b>TABLA 19</b> PRECIO DE PLANTAS DE RECUPERACIÓN Y PURIFICACIÓN DE CO <sub>2</sub> .CAP. 1000 KG/HR. ....	96
<b>TABLA 20</b> COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN Y COSTO UNITARIO DE CO <sub>2</sub> EN LA PLANTA A INSTALAR .....	96
<b>TABLA 21</b> DATA PARA EVALUACIÓN ECONÓMICO-FINANCIERO DEL PROYECTO HAFFMANS. .....	97
<b>TABLA 22</b> FINANCIAMIENTO DE LA INVERSIÓN DEL PROYECTO CON TECNOLOGÍA HAFFMANS .....	98
<b>TABLA 23</b> FLUJO DE CAJA ECONÓMICO-FINANCIERO DEL PROYECTO CON TECNOLOGÍA HAFFMANS .....	99
<b>TABLA 24</b> ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL PROYECTO DE TECNOLOGÍA HAFFMANS .....	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> PORCENTAJE DE CO <sub>2</sub> ANTE OTROS GASES.....	22
<b>FIGURA 2.</b> DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE TECNOLOGÍA HAFFMAN. ....	29
<b>FIGURA 3.</b> PLANTA DE RECUPERACIÓN DE CO <sub>2</sub> DE TECNOLOGÍA TECHNO ENGINEERING. ....	33
<b>FIGURA 4.</b> DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE CO <sub>2</sub> DE TECNOLOGÍA GULATI. ....	34
<b>FIGURA 5.</b> DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE CO <sub>2</sub> DE TECNOLOGÍA UNIÓN .....	36
<b>FIGURA 6.</b> EJEMPLOS DE APLICACIONES TECNOLÓGICAS EN LAS QUE SE USA EL CO <sub>2</sub> JUNTO CON EL PRODUCTO AL QUE SUSTITUYE EN DICHA APLICACIÓN. ....	37
<b>FIGURA 7.</b> LOCALIZACIÓN DE LA EMPRESA PUCALÁ. ....	49
<b>FIGURA 8.</b> ORGANIGRAMA DEL ÁREA DE PLANTA DE ALCOHOL. ....	50
<b>FIGURA 9.</b> DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN EN LA PLANTA INDUSTRIAL PUCALÁ.....	51
<b>FIGURA 10.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE ALCOHOL ETÍLICO. .....	52
<b>FIGURA 11.</b> ANÁLISIS FODA .....	58
<b>FIGURA 12.</b> TANQUES FERMENTADORES FUENTE: PLANTA INDUSTRIAL ALCOHOLERA PUCALA.....	59
<b>FIGURA 13.</b> SEPARADOR DE ESPUMA.....	66
<b>FIGURA 14.</b> TABLA DE ACEROS DE ALTA ALEACIÓN. ....	68
<b>FIGURA 15.</b> TABLA DE FÓRMULAS PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES BAJO PRESIÓN INTERNA. .....	69
<b>FIGURA 16.</b> SOPLADOR A PRESIÓN O BALÓN PRESURIZADO .....	70
<b>FIGURA 17.</b> SCRUBBER O LAVADOR DE GASES. ....	72
<b>FIGURA 18.</b> TABLA DE FÓRMULAS PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES BAJO PRESIÓN INTERNA .....	74
<b>FIGURA 19.</b> COMPRESOR RECIPROCANTE DE PISTONES.....	76
<b>FIGURA 20.</b> FILTRO DE CARBÓN ACTIVO. ....	77
<b>FIGURA 21.</b> TABLA DE FÓRMULAS PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES BAJO PRESIÓN INTERNA. .....	79
<b>FIGURA 22.</b> SECADOR. ....	80

<b>FIGURA 23.</b> TABLA DE FÓRMULAS PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES BAJO PRESIÓN INTERNA. .....	81
<b>FIGURA 24.</b> TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CO <sub>2</sub> COMPRIMIDO. ....	82
<b>FIGURA 25.</b> TABLA DE ACEROS DE ALTA ALEACIÓN. ....	85
<b>FIGURA 26.</b> TABLA DE FÓRMULAS PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES BAJO PRESIÓN INTERNA. .....	86
<b>FIGURA 27.</b> DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DEL CO <sub>2</sub> . ....	88
<b>FIGURA 28.</b> DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CAPTURA Y PURIFICACIÓN DE CO <sub>2</sub> DE TECNOLOGÍA HAFMANS. ....	90
<b>FIGURA 29.</b> BALANCE DE MATERIALES DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CO <sub>2</sub> . ....	91

**CAPÍTULO I.**  
**INTRODUCCIÓN**

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática.

Como bien se sabe, el CO<sub>2</sub> constituye el 63% de los gases de efecto invernadero, eso significa que es el mayor contaminante y causante del cambio climático en la tierra, en tal sentido esto ha motivado a realizar un trabajo de investigación orientado al diseño de un sistema de recuperación y uso del CO<sub>2</sub> para mitigar este problema, lo cual no solo es en el Perú sino a nivel mundial como se muestra en los antecedentes (Romero, et al., 2010).

Es cierto que a nivel mundial la contaminación del CO<sub>2</sub> es un grave problema, no es un tema reciente pero no se ha venido tomando medidas para un mejor control de este gas de efecto invernadero que a medidas aceleradas ha ido incrementando desde la revolución industrial. Es por eso que el estudio generado en Murcia - España por Mota, Alcaraz, Iglesias, Martínez y Carvajal aseguran que este daño que se le hace a la superficie terrestre es generado por la contaminación de los gases de efecto invernadero, donde evalúan los diferentes factores influyentes en la acumulación de estos gases; siendo uno de ellos la deforestación de árboles y quema de material vegetal en el trabajo de conversión de bosques a tierras agrícolas o ganaderas.

En muchos países el tema de contaminación es un problema que la mayoría quieren solucionarlo debido a que está causando cada vez más el desgaste de la capa de ozono y entre otros problemas, la mayoría de países está realizando un plan para mitigar este gran problema. Según el diario Español ABC (2015) China es uno de los principales países en generar CO<sub>2</sub> aproximadamente 1000 millones de toneladas al año debido al quemado de carbón, es por ello que el gobierno ha tomado medidas para reducir este gas (dióxido de carbono) ya que tiene el mayor porcentaje en los gases de efecto invernadero.

La contaminación ambiental es causada por diversos factores como industrias automovilísticas, manufactureras, por la quema de desechos inorgánicos y entre otros. Según el diario matutino "Ecuatoriano" El comercio (2015) Quito emite anualmente 5.1 millones de gases de efecto invernadero los cuales son generadas por el transporte, industrias, entre

otros. También nos menciona que el transporte público y particular solamente emite 2.8 millones de toneladas de dióxido, es por ello que se deben tomar medidas preventivas para que los gases de efecto invernadero no sigan aumentando día a día ya que como se sabe esto está causando problemas a nivel mundial.

Las emisiones de dióxido de carbono en el Perú son de 380 mil toneladas diarias, lo que equivale anualmente a 138 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> lo cual contribuye a un aumento del calentamiento global y tiene como consecuencia la reducción de los glaciares, elevamiento del nivel del mar, frecuencia de eventos climáticos como el niño y entre otros sucesos. (El Comercio, 2014).

Un estudio realizado en la ciudad de Lima explica el gran crecimiento que ha tenido el Perú en el sector industrial en los últimos años y también hace referencia que las empresas industriales por falta de planeamiento energético adecuado no han invertido en asegurar su suministro de energía en base al uso del gas natural(GN), lo que está causando es que están utilizando otras fuentes energéticas como diésel, gas licuado entre otros para así poder satisfacer su demanda siendo mucho más costosas que el gas natural y sobre todo el que genera mayor cantidad de GEI siendo este actualmente un problema que la sociedad quiere mitigar debido a las consecuencias que trae a nuestro planeta.(Yábar, 2016).

En el 2013 Exebio y Prieto realizaron una investigación en Chiclayo referente al impacto económico de los gases de efecto invernadero de las centrales térmicas del Perú donde dan a conocer que las centrales térmicas representan un porcentaje sobresaliente en la producción de energía siendo así un gran problema ambiental debido a las emisiones de gases como dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre, entre otros. También se considera que nuestro país ha ido incrementando económicamente y por ende el consumo de energía, esto tiene como consecuencia el incremento de los gases de efecto invernadero que hoy por hoy es una preocupación a resolver.

La planta alcoholera Industrial Pucalá es una empresa dedicada a la producción de alcohol de 96° y de 93° de pureza.

El desarrollo de esta investigación se centra en el problema de la contaminación que genera los pres fermentadores y fermentadores, ya que por su misma combinación con

componentes químicos como la levadura, urea, antibióticos generan gases de efecto invernadero que van directo al medio ambiente. Estos gases contaminan de una forma directa ya que las dornas no cuentan con una cubierta para que no se escape los gases en especial el CO<sub>2</sub> debido a su mismo proceso de fermentación; teniendo en consideración también el daño que se le hace al operador de las dornas al estar en contacto con estos gases emitido ya que podría causarles algunos daños.

## 1.2. Trabajos previos.

En Gran Bretaña, "Más cerveza, menos agua" fue la estrategia global perseguido por SABMiller en Pilsen desde finales de los años noventa. Anteriormente, la cervecería necesitaba 10 hectolitros (hl) de agua por cada hl de cerveza, el consumo de agua ahora está alrededor de 4.1 hl / hl de cerveza (Pentair, 2012).|| Las ambiciones para otras áreas de la sostenibilidad apuntan a un nivel similar. Entre otros aspectos, el foco está en reducir las huellas de energía y CO<sub>2</sub>. Este último se redujo en 20 por ciento en los últimos cinco años.

Para SABMiller, la dependencia constante en sus procesos de producción de CO<sub>2</sub> de fermentación representa un componente estratégico. Es interesante observar que la recuperación de CO<sub>2</sub> ha estado en vigor desde 1993, antes de que SABMiller se involucrara. En ese año, la recuperación de CO<sub>2</sub> se estableció por primera vez en la fábrica de cerveza Pilsner Urquell. Sin embargo, esta instalación no generó los resultados deseados tanto en cantidad como en calidad. Grandes cantidades de CO<sub>2</sub> aún tenían que subcontratarse. En 2002, la planta de CO<sub>2</sub> existente fue mejorada por Pentair Haffmans con el objetivo de elevar los estándares de calidad y rendimiento al nivel deseado altamente sofisticado por medio de tecnología de punta.

Según Jan Sik, gerente de desarrollo sostenible en Prazdroj, la decisión de confiar a Pentair Haffmans con este trabajo se basó en experiencias positivas anteriores. SABMiller había construido previamente varias de sus plantas en todo el mundo en cooperación con Pentair Haffmans, y era muy consciente de su conocimiento y fiabilidad.

Una ventaja adicional fueron los productos convincentes de Pentair Haffmans, incluidos sus exclusivos depuradores que incorporan un paquete especial que se caracteriza por una superficie muy extensa.

En la ciudad de Tuticorin, ubicada en la India existe una planta industrial que a simple vista es común en la infraestructura como cualquier otra planta, pero en realidad esta planta química tiene algo en específico está ahorrando 60.000 toneladas de dióxido de carbono al año y lo están convirtiendo en polvo para hornear. El método que ellos utilizan para convertir el CO<sub>2</sub> en polvo para hornear consiste en tres pasos, primero la planta cuenta con una caldera de carbón que produce vapor para sus operaciones químicas, luego las emisiones de CO<sub>2</sub> que salen de la chimenea de la caldera quedan convertidas en un fino rocío y por último una corriente de CO<sub>2</sub> introduce en la planta química como un ingrediente para el carbonato de sodio. Es así como esta planta química está contribuyendo con el medio ambiente, aunque al inicio de este proyecto ellos no tenían una visión ambientalista sino económica. Cabe recalcar que India es uno de los principales países en generar CO<sub>2</sub>. (BBC Mundo, 2017)

El Comercio (2014) manifiesta en su publicación que lleva de título el futuro brillante del mercado de bonos de carbono en el Perú, da a conocer que en la selva peruana de San Martín, el bosque de protección Alto Mayo, estuvo en peligro de deforestación por causa de los agricultores informales de café, donde la ONG Conservación Internacional inició un proyecto de reducción de emisiones derivadas de la deforestación lo que logró evitar la quema y tala de árboles en una área capaz de capturar 2.8 millones de toneladas de dióxido de carbono. El parque de diversiones Disney debido a la inauguración de dos modernos cruceros recreacionales tuvo un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a este incremento decidió comprar bonos de carbono en el Perú para así poder compensar un 50% de reducción de las emisiones causadas por sus cruceros. Así como Disney existen otras empresas como Microsoft, United Airlines y la banda Pearl Jam también están adquiriendo bonos de carbono en el Perú.

Según Amaal (2016) en Islandia se realizó un proyecto llamado Carbfix que trata sobre la conversión de dióxido de carbono en piedra caliza, este proyecto trata de solidificar el carbono no deseado para que así no pueda escapar a la atmósfera, su metodología de trabajo se realiza en una planta de energía geotérmica Hellishei, aquí los expertos combinan desechos del CO<sub>2</sub> con agua para crear un líquido un poco más ácido que después es enviado a cientos de metros bajo tierra, en el basalto volcánico de lo que está compuesto la mayor parte de la isla del Atlántico Norte. Esto ha permitido que los investigadores puedan bombear grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y almacenarlo de una forma segura, también hace

referencia que de las 220 toneladas inyectadas en el suelo el 95 % se convirtió en piedra caliza. Sin embargo, hay una desventaja en esta técnica de conversión de CO<sub>2</sub> debido a los costos que son muy elevados.

Existen varios métodos de captura y conversión de CO<sub>2</sub>, gracias a ello podemos buscar la mejor manera para utilizar este gas incoloro. Vega (2011) da a conocer en una guía, técnica de energía y medio ambiente sobre la posibilidad de utilizar el CO<sub>2</sub> en diversas aplicaciones industriales. Hoy en día es una preocupación a nivel mundial el saber controlar y disminuir las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. El uso del CO<sub>2</sub> ha sido utilizado desde años anteriores en distintos sectores. Uno de los usos del CO<sub>2</sub> es la industria de bebidas carbonatadas, esto se inicia en New York en 1832, además de ser utilizadas en gaseosas también se utilizan en bebidas alcohólicas como la cerveza y el vino; otro uso del dióxido de carbono es en el envasado de atmósfera modificada esta técnica trata de prolongar el tiempo de conservación de los alimentos y preservar la calidad sin embargo no se considera una tecnología que ayude a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además de los usos en productos industriales, el CO<sub>2</sub> también se puede convertir en usos biológicos y químicos, en el caso de conversión en usos químicos tenemos a la producción de ácido acetilsalicílico (aspirina), entre otros y por último da a conocer cómo se pueden producir combustible a base del CO<sub>2</sub> como por ejemplo fotosíntesis artificial y producción de metanol.

En el año 2009 Greg H. Rau redactó el artículo Electrochemical CO<sub>2</sub> Capture and Storage with Hydrogen Generation, donde el método de captura del CO<sub>2</sub> aplicado es la división electroquímica del carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) la cual permitirá formar soluciones de hidróxido que puede absorber, neutralizar y almacenar el dióxido de carbono del aire o de flujos de desechos, siendo así el CaCO<sub>3</sub> es disuelto con la ayuda del anolito altamente ácido de una célula de electrolisis de agua salina; donde la solución final se mantendrá con un pH entre 6 Y 9. Por lo mismo las reacciones del hidróxido con el CO<sub>2</sub> producen el bicarbonato cálcico disuelto Ca (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, es ahí donde se puede ver la captura del CO<sub>2</sub> y decir que cada molécula de CaCO<sub>3</sub> puede hacer una captura neta de hasta 1 molécula de CO<sub>2</sub>. Y el proceso de almacenamiento del carbonato cálcico disuelto Ca (HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> puede ser en el océano o en embalses en tierra o subterráneo, donde el costo neto por almacenamiento es de \$100/tonelada de CO<sub>2</sub>.

Según el diario El País (2009) una investigación realizada en el occidente de Noruega, Mongstad, titulada “Noruega se lanza a experimentar la captura de CO<sub>2</sub>”, donde da conocer que la planta que se está construyendo aplicara dos tecnologías de captura, la idea que propone es practicar dentro de los 5 años estas tecnologías para luego perfeccionarlas y hacerlas muchas más competitivas, tienen como objetivo capturar 100 000 toneladas de dióxido de carbono al año. Lo que tiene esta planta de novedosa es que ellos desean capturar el CO<sub>2</sub> después de la combustión. La primera tecnología que mencionan es ensayar esa de captura de carbono por aminas como solvente: los gases de combustión pasan por un filtro en el que las aminas se asocian al carbono; en la segunda fase del ciclo se separan de nuevo, de manera que las aminas regresan a la fase de captura para su reutilización, mientras que el CO<sub>2</sub>, que en la planta piloto se emitirá al aire, irá por conducciones a lugares de almacenamiento geológico en las futuras plantas industriales y la segunda tecnología es utilizar amoniaco helado para la captura de dióxido de carbono, esta tecnología tiene muchos efectos negativos en el medio ambiente que la tecnología 1, pero a su vez es mucho más difícil de utilizarla.

Yu (2017) manifiesta en un artículo que tiene como título “Inauguran la primera planta comercial de captura de CO<sub>2</sub> del mundo”, en el cual la institución Climeworks ubicada en Suiza decidió desarrollar la primera planta comercial de dióxido de carbono, lo cual tiene como objetivo capturar 900 toneladas de dióxido de carbono anualmente lo que equivale a una demanda de 200 carros en dicho periodo. La metodología de la planta se basa en una instalación de recuperación de calor residual que potencia el proceso donde su desarrollo será el siguiente los ventiladores empujan el aire a través de un sistema de filtros que recogen el dióxido de carbono. Cuando el filtro se satura, el CO<sub>2</sub> es separado a temperaturas superiores a los 100 grados Celsius. Los costos de estos métodos ascienden a unos 1000 dólares por tonelada de dióxido de carbono.

### **1.3. Teorías relacionadas al tema.**

#### **1.3.1. Mitigación de los gases de efecto invernadero.**

##### **Definición de mitigar.**

Según la Real Academia Española proviene del latín *mitigāre* y significa moderar, aplacar, disminuir o suavizar algo riguroso o áspero.

## **Efecto invernadero**

Según el National Geographic (2010). “El efecto invernadero es el calentamiento que se produce cuando ciertos gases de la atmósfera de la Tierra retienen el calor. Estos gases dejan pasar la luz pero mantienen el calor como las paredes de cristal de un invernadero” (p.1).

Denominado así por su analogía con un invernadero donde se cultivan plantas, es la acumulación de la energía radiante proporcionada por el sol en un recinto cerrado que permite el ingreso de la radiación pero pocas pérdidas al exterior. De este modo, la temperatura en el interior del invernadero aumenta y las plantas pueden crecer en condiciones más favorables que a la intemperie (Power, 2009, p.108).

### **Definición de gases de efecto invernadero.**

Benavides y León (2007) afirman: Los gases de efecto invernadero o gases de invernadero son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. En la atmósfera de la Tierra, los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) (p.5).

Gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano(CH<sub>4</sub>), y ozono (O<sub>3</sub>) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además, existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro. (IPPC, 200, pp 185-186).

Según Colque y Sánchez (2007) los gases de efecto invernadero son esenciales para la vida en la Tierra, pues hacen que parte del calor emitido por el sol quede atrapado manteniendo una temperatura media global de 15 C en lugar de -18 C, pues absorben el calor generado por el sol (fotones infrarrojos), teniéndolo dentro de la atmósfera, generando lo que se conoce como Calentamiento Global. (p.3).

### **Composición de los gases de efecto invernadero.**

La composición de los gases de efecto invernadero. Según Benavides y León (2007) está compuesta de vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y óxido nitroso, además de estos gases emitidos existen otros que son creados por el ser humano como halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

Los gases de efecto invernadero se componen por vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y por último clorofluorocarburos (CF<sub>x</sub> artificiales). (Portillo, 2016)

## Características de los gases de efecto invernadero.

**Tabla 1**

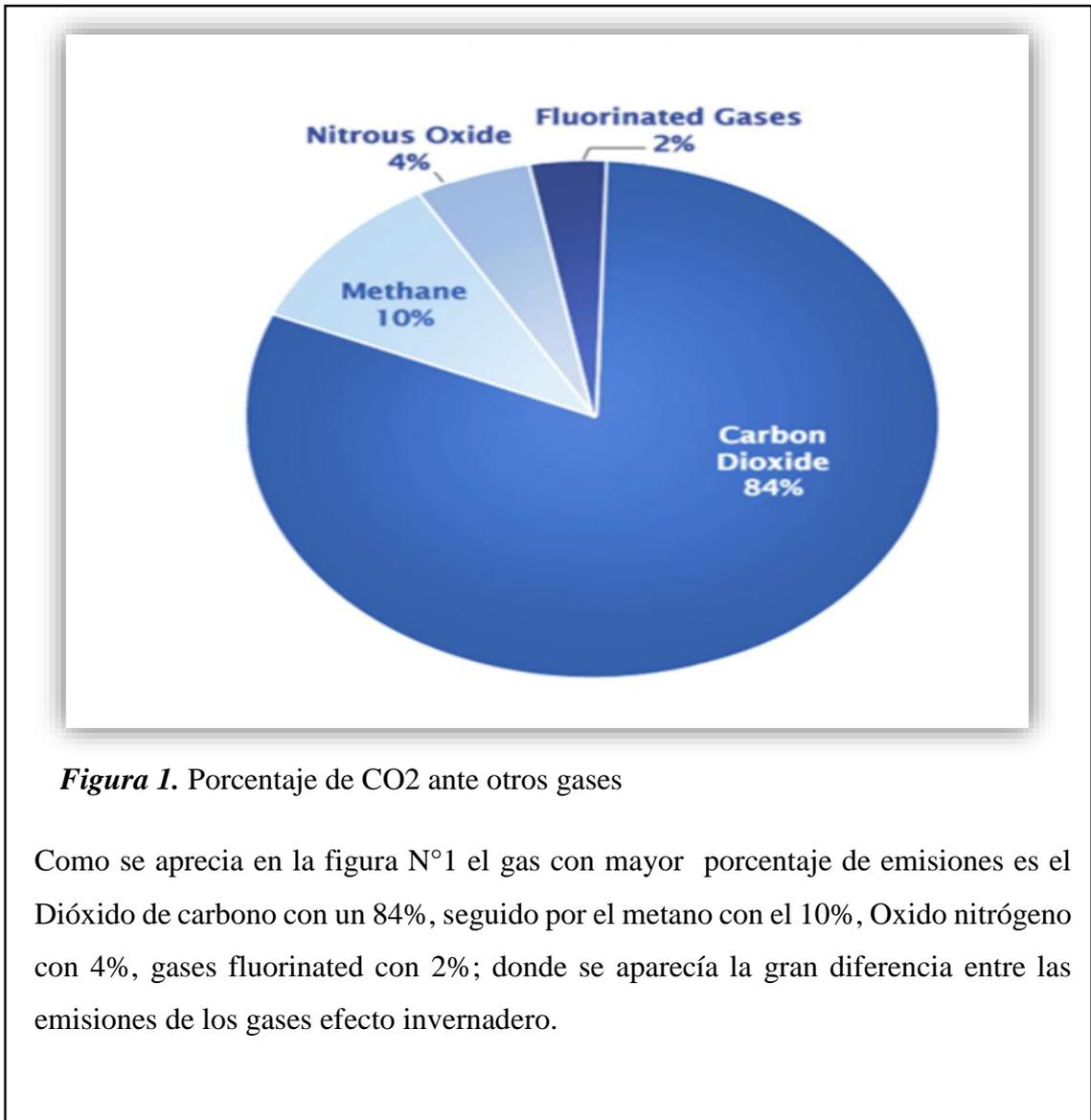
*Gases de efecto invernadero*

<b>GASES DE EFECTO INVERNADERO</b>	<b>FUENTE</b>	<b>ACTIVIDAD</b>
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural)</li> <li>- Desertificación de los bosques</li> <li>- Cambio de uso del suelo (agricultura)</li> <li>- Quema de bosques</li> <li>- Generación térmica</li> <li>- Incendios Forestales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte</li> <li>- Generación térmica eléctrica</li> <li>- Forestal</li> <li>- Agricultura</li> <li>- Incendios forestales</li> </ul>
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Botaderos de basura</li> <li>- Estiércol</li> <li>- Gas natural</li> <li>- Alteración en los desechos orgánicos</li> <li>- Extracción del petróleo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Descomposición de desechos orgánicos</li> <li>- Ganadera</li> <li>- Petrolera</li> </ul>
<b>Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ignición de automóviles</li> <li>- Abono (Fertilizantes) (Estiércol)</li> <li>- Alimentación de ganado</li> <li>- Fertilización nitrogenada</li> <li>- Residuos sólidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte</li> <li>- Agricultura</li> <li>- Quema de residuos sólidos</li> </ul>
<b>Carburos Hidrofluorados (HFC) y Carbonos Perfluorados (PFC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistemas de refrigeración</li> <li>- Industria frigorífica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industria frigorífica</li> </ul>
<b>Clorofluorocarbonos (CFC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistemas de refrigeración</li> <li>- Plástica</li> <li>- Aerosoles</li> <li>- Electrónica</li> <li>- Sector Industrial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sector Industrial</li> </ul>
<b>Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aislante eléctrico y estabilizante</li> <li>- Interruptores eléctricos (breakers)</li> <li>- Transformadores</li> <li>- Sistema interconectado de redes eléctricas</li> <li>- Extintores de incendios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema interconectado de redes eléctricas</li> <li>- Extintores de incendios</li> </ul>

*Fuente 1:* Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (2011)

### **Qué gas de efecto invernadero se emite más.**

Según Bellver (2013) el dióxido de carbono es el mayor gas que se emite en los gases de efecto invernadero. Es el que permanece mayor tiempo en el aire. Entre el 65% a 80% que se libera en el océano dura un periodo de 20 a 200 años para ser disuelto y el resto de CO<sub>2</sub> se libera lentamente a través de procesos como la formación de rocas o la meteorización química.



**Figura 1.** Porcentaje de CO<sub>2</sub> ante otros gases

Como se aprecia en la figura N°1 el gas con mayor porcentaje de emisiones es el Dióxido de carbono con un 84%, seguido por el metano con el 10%, Oxido nitrógeno con 4%, gases fluorinated con 2%; donde se aparecía la gran diferencia entre las emisiones de los gases efecto invernadero.

### **Cuál es el gas más contaminante.**

Las emisiones de dióxido de carbono son las principales responsables del calentamiento del planeta, estas emisiones proceden fundamentalmente de la utilización de energía y de la producción de combustibles fósiles. El metano es el segundo gas en orden de importancia, tras el CO<sub>2</sub>, y sus principales fuentes de emisión son: la agricultura (digestión del ganado), los residuos (vertido) y la energía (producción de carbón y distribución de gas natural). El óxido nitroso es un gas industrial generado por la producción de ácido nítrico y de ácido adípico y la utilización de abonos en la agricultura. El hidrofluorocarbono (HFC), el hidrocarburo perfluorado (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) son gases industriales cuya permanencia activa en la atmósfera es muy alta. Las emisiones de HFC han aumentado ya que dicho gas ha sustituido a los clorofluorocarbonos (CFC) prohibidos por el Protocolo de Montreal (porque empobrecen la capa de ozono). Los PFC se producen con la fusión del aluminio (concretamente por las instalaciones de incineración) y el SF<sub>6</sub> se utiliza en los equipos de alta tensión y en la producción de magnesio. (Maqueda, Carbonnell, Martínez, Flórez, 2006, p.15).

Según Eronews (2015) los principales gases del efecto invernadero son vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el más presente de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Es por definición el gas de invernadero natural. El contenido de agua en el aire depende de la temperatura. Con el aumento de las temperaturas el contenido de vapor de agua en la atmósfera aumenta y como consecuencia empeoran los efectos de otros gases de efecto invernadero, El CO<sub>2</sub> es un gas que se produce por la quema de combustibles fósiles como el carbón o el petróleo. El dióxido de carbono es la causa de la mayor parte del efecto invernadero causado por la actividad industrial. En Amazonia y el sudeste de Asia, se produce masivamente por la quema de los bosques tropicales, el Metano (CH<sub>4</sub>) las principales fuentes de metano son el material orgánico degradado que se produce en la ganadería, en el cultivo de arroz, en los vertederos y en las explotaciones petrolíferas y gasísticas, el Dióxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O) El óxido nitroso se produce y se libera principalmente en la agricultura y algunos procesos de la industria química, los gases fluorados. Se usan principalmente como propelentes y refrigerantes. Han contribuido a la destrucción de la capa de ozono y tras varias campañas de organizaciones ambientalistas su

uso se ha reducido considerablemente desde 1990 y por último el Ozono (O<sub>3</sub>) Es un contaminante muy agresivo. Sin embargo el ozono de origen natural en las capas altas de la atmósfera es beneficioso porque sirve de filtro protector de los rayos ultravioleta solares.

### **1.3.2. Selección de un proceso industrial de captura y purificación de CO<sub>2</sub>.**

#### **Qué es el CO<sub>2</sub>.**

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los compuestos más importantes en la naturaleza y es conocido desde el primer siglo de la humanidad. Los romanos descubrieron sus efectos letales cuando se presenta en altas concentraciones en lugares donde la recirculación de aire es baja. Conocieron su peligrosidad al mantener contacto con él ya que podían observar como los hombres caían muertos al mantener contacto durante largo tiempo con el gas. Debido a que el exceso de CO<sub>2</sub> en recintos cerrados se manifiesta físicamente como una nube densa, ellos pensaron que se trataba de una presencia extraña y lo llamaron espíritus letales (Belman y Pérez, 2013).

La revista Conciencia Eco (2012) define: El CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), también denominado anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Es soluble en agua cuando la presión se mantiene constante y normalmente se encuentra en la naturaleza en forma gaseosa, pero cuando se le somete a una presión y temperatura considerable baja se vuelve líquido y llega a ser sólido formando lo que se denomina hielo seco o nieve carbónica (p.1).

Según el National Geographic (2010) menciona: El dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero, es el contaminante que está causando en mayor medida el calentamiento de la Tierra. Si bien todos los seres vivos emiten dióxido de carbono al respirar, éste se considera por lo general contaminante cuando se asocia con coches, aviones, centrales eléctricas y otras actividades humanas que

requieren el uso de combustibles fósiles como la gasolina y el gas natural (p.1)

### **Selección de un proceso industrial de captura y purificación de CO<sub>2</sub>.**

La selección de un proceso industrial es una actividad que permite evaluar factores de factibilidad técnica en los procesos industriales existentes con el propósito de seleccionar el mejor proceso. En el trayecto del diseño de un proyecto es necesario determinar el proceso más conveniente para obtener un producto deseado. Varios procesos diferentes de manufactura pueden ser aprovechables para hacer el mismo producto, y estos procesos deben ser comparados en orden a seleccionar el mejor bajo las actuales condiciones (Moncada, L. 2017).

La comparación se hará con las tecnologías existentes del proceso de captura y purificación de CO<sub>2</sub>. Será necesario evaluar ciertos factores como la Calidad del producto, la disponibilidad de información, la complejidad, el rendimiento total de la materia prima, las variables de operación y la contaminación por residuos eliminados.(Angeles, P. 2018).

### **Definición de sistema.**

Alegsa (2016) afirma: “Un sistema es un conjunto de partes o elementos organizadas y relacionadas que interactúan entre sí para lograr un objetivo. Los sistemas reciben (entrada) datos, energía o materia del ambiente y proveen (salida) información, energía o materia”.

### **Definición de recuperación.**

Según la Real academia Española el término de recuperación significa acción y efecto de recuperar o recuperarse.

### **Sistema de recuperación de CO<sub>2</sub>.**

En el sistema de recuperación se visualiza el estudio de las técnicas para la captura y separación del CO<sub>2</sub>, considerando que hay tecnologías en desarrollo que podrían considerarse como tecnologías avanzadas de posible aplicación en el futuro (Sánchez, Pujol y Estrany, 2006).

Núñez, Gonzales y Saura (2015) manifiestan que los sistemas de recuperación más conocidos que se utilizan hoy en día son:

A. **Absorción química** en líquidos consiste en disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de estos en el líquido, la reacción entre el soluto absorbido y un reactivo produce dos hechos favorables a la rapidez de la absorción: el aumento de la capacidad de adsorción del líquido respecto al componente gaseoso, y el aumento de la velocidad global del proceso.

B. **Método criogénico** se refiere que el CO<sub>2</sub> puede ser condensado y separado de gases poco o menos condensables a bajas temperaturas y altas presiones. El proceso total consta de condensación y destilación criogénica (CDC). Los gases de combustión son s5+50

C. **Secados** y comprimidos a la entrada y el gas seco es refrigerado en una columna de condensación con el objetivo de recobrar el CO<sub>2</sub> condensado. El método CDC se emplea para la eliminación de CO<sub>2</sub> en mezclas de CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> y otros gases empleados en la recuperación de hidrocarburos de fuentes naturales.

D. **Adsorción física** en sólidos consiste que el CO<sub>2</sub> es retenido en el sólido debido a las interacciones con la superficie de las partículas y su porosidad. En este proceso se trabaja en condiciones casi isotérmicas, y la operación consta de dos fases: la adsorción, que se realiza a alta presión, con objeto de que la presión parcial del gas al ser capturado sea elevada, y la recuperación, que se realiza a una presión menos elevada, para liberar y recuperar el CO<sub>2</sub> adsorbido.

E. **Absorción física** en líquidos en este proceso 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 concentración en la fase líquida depende de la presión parcial del componente en la fase gaseosa.

F. **Separación** mediante membranas selectivas consiste en el siguiente proceso que las membranas para la absorción de gases constan de un líquido de absorción en contacto con una membrana semipermeable con objeto de proveer una gran superficie de contacto y evitar mezclar el gas con el líquido. La separación se basa en la distinta velocidad de difusión de diferentes gases. El CO<sub>2</sub>, siendo una molécula triatómica, puede separarse con relativa facilidad de moléculas diatómicas como O<sub>2</sub> Y N<sub>2</sub>. (pp, 29-30)

### **1.3.3. Tecnologías para la recuperación de co2.**

Se han encontrado entre varias tecnología, a tres que se consideran las más importantes en la medida que son ampliamente utilizados en la industria.

#### **Tecnología Pentair-Haffman**

En la producción de cerveza de calidad, las cervecerías dependen de muchas materias primas como agua, malta, lúpulo, levadura y el quinto más importante: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El CO<sub>2</sub> tiene una gran influencia no solo en la calidad de la cerveza, sino también en la aceptación del producto por parte del cliente. El tratamiento, el control y la dosificación de CO<sub>2</sub> son de fundamental importancia y deben considerarse como un concepto total del cual la recuperación de CO<sub>2</sub> desempeña un papel clave. Como especialista en la recuperación de CO<sub>2</sub>, Pentair Haffmans es su socio total de gestión de CO<sub>2</sub>.

Pentair Haffmans ofrece soluciones para cada situación. Esto abarca componentes individuales tales como recipientes de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, llenado de cilindros de CO<sub>2</sub> y evaporadores de CO<sub>2</sub> con un conjunto reductor, hasta completar plantas de recuperación de CO<sub>2</sub> desde 20 kg / h hasta 10.000 kg / h.

Ofrecemos un programa de entregas con una variedad de opciones desde plantas de recuperación de CO<sub>2</sub> convencionales rentables hasta plantas de última generación que incorporan las últimas tecnologías. Además, podemos actualizar las plantas existentes con estas tecnologías. En todo el mundo, un equipo de ingenieros de servicio experimentados y bien entrenados instalará y pondrá en marcha soluciones a medida en todo el mundo.

Para satisfacer la creciente demanda de CO<sub>2</sub>, el departamento de I + D de Pentair Haffmans desarrolla continuamente nuevas tecnologías para mejorar la calidad del CO<sub>2</sub>, las tasas de recuperación y la eficiencia. Nuestras plantas LO y HLP pueden producir CO<sub>2</sub> con una pureza superior al 99.998 por ciento y con menos de 5 ppm de contenido de oxígeno (O<sub>2</sub>) v / v. La planta de HLP recoge el gas crudo de una entrada de tan solo 95 v / v precentros y se recuperará económicamente, manteniendo al mismo tiempo una pureza de salida garantizada de 99.998 por ciento v/v.

Con el diseño de la planta HLP, las cervecerías ahora pueden recuperar el gas CO<sub>2</sub> de la fermentación y proporcionan CO<sub>2</sub> de grado alimenticio para satisfacer la demanda de producción de cerveza, con CO<sub>2</sub> de excelente grado alimenticio que puede usarse para producir bebidas carbonatadas. La principal ventaja es que la fermentación de CO<sub>2</sub> producido a partir de la cerveza u otros procesos de fermentación en sí garantizan que el CO<sub>2</sub> recuperado no tiene sustancias peligrosas sino que es de calidad alimentaria.

### **Gestión total del CO<sub>2</sub>**

Plantas de recuperación de CO<sub>2</sub>  
Expansión y renovación de plantas existentes  
Accesorios de plantas de recuperación de CO<sub>2</sub>  
Control de calidad de CO<sub>2</sub>  
Servicio de análisis de CO<sub>2</sub> (CAS)  
Servicio postventa  
Contratos de capacitación / mantenimiento  
Piezas de repuesto  
Auditorías de CO<sub>2</sub>, escaneos rápidos

### **Datos técnicos**

#### **Entrada de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>% vol.)**

Convencional > 99.7

LO (Bajo Oxígeno) > 99

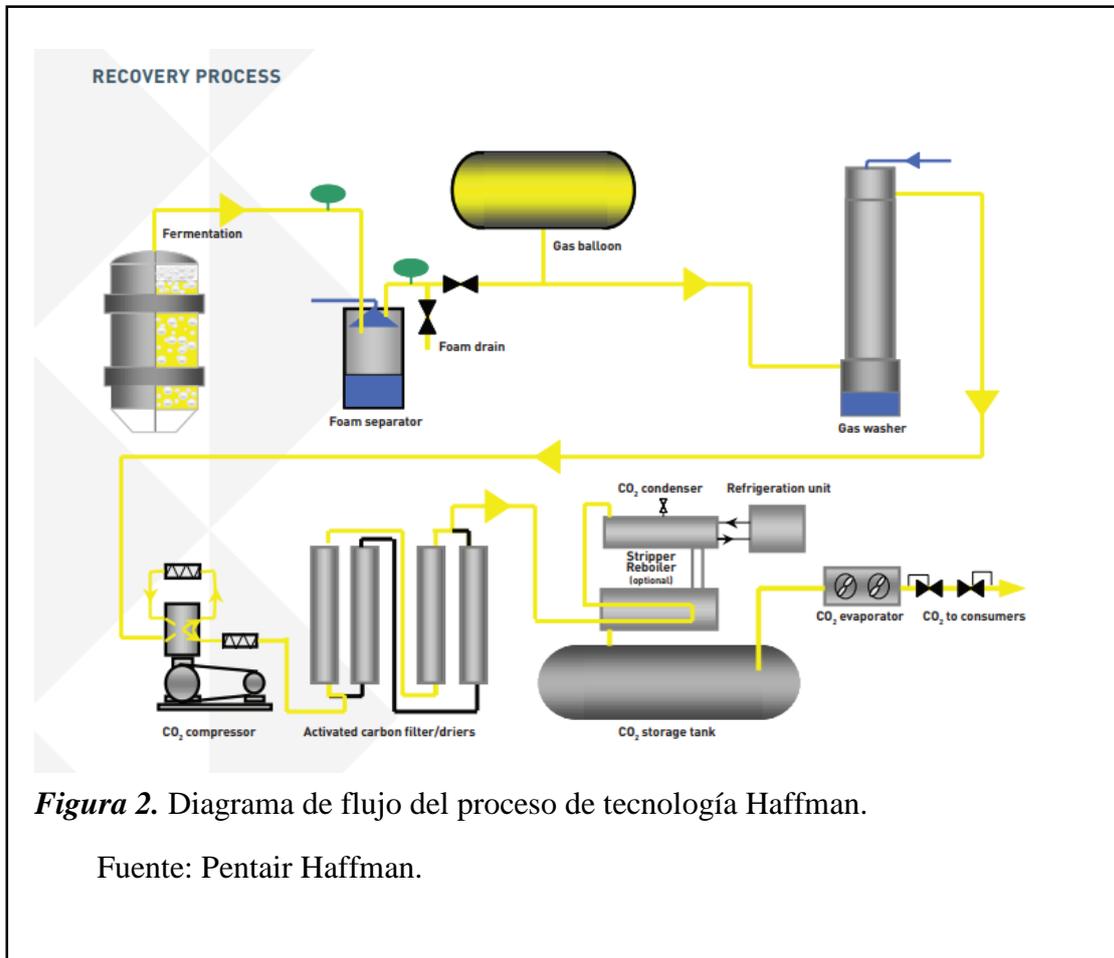
HLP (Pureza de alto nivel) > 95

#### **Salida de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>% vol.)**

Convencional > 99.97

LO (Bajo Oxígeno <5 ppm

HLP (Pureza de alto nivel) > 99.998 / O2 <5 ppm



**Figura 2.** Diagrama de flujo del proceso de tecnología Haffman.

Fuente: Pentair Haffman.

## Tecnología Puregas

### Separador de espuma de co2 / buffer vessel

La trampa de espuma de CO2 está diseñada para servir como un acumulador de espuma, lo que evita que el remanente ocasional de espuma entre y contamine el sistema de recuperación de CO2. Se recomienda que esta unidad se instale a poca altura entre los fermentadores y el sistema de recuperación de CO2.

### Construcción de acero inoxidable

Sistemas de esterilización instalados dentro del recipiente para la eliminación de espuma de Feed Gas

### **Soplador de co2 gas boosting**

El propósito del soplador de aumento de CO<sub>2</sub> con motor es proporcionar la alimentación continua necesaria al compresor de CO<sub>2</sub> para operar a una presión de succión positiva. Esto evita la formación de un vacío y la posibilidad de entrada de aire. La superficie de contacto es de acero inoxidable o forro de níquel.

El soplador de presión, con sus controles especiales, permite que la presión de fermentación permanezca constante a la presión deseada.

### **Depurador de agua de baja presión de co2**

El depurador de agua elimina las impurezas solubles en agua en una operación altamente eficiente. Esto se logra mediante la utilización de "embalaje especial" en comparación con el diseño clásico de embalaje al azar. Las características incluyen:

Construcción de acero inoxidable.

Distribuidor líquido de acero inoxidable.

Tubería, válvulas e indicador de flujo de agua de reposición.

Trampa de drenaje automática.

### **Sistema de compresión a gas co2**

CO<sub>2</sub> Gas Compresor es una máquina compacta, fácil de instalar, duradera y de funcionamiento suave. El compresor es una máquina estacionaria no lubricada (libre de aceite) de dos (2) etapas, diseñada específicamente para aplicaciones de CO<sub>2</sub> donde no se puede tolerar el lubricante de petróleo más leve.

### **Desodorizado de carbono activado**

Este sistema consiste en un sistema de dos torres con válvulas para cambio y regeneración por vapor.

Hace un uso liberal de carbón activado de alta eficiencia adecuado para los gases del proceso de fermentación y por lo tanto es muy efectivo en la purificación de gas CO<sub>2</sub> debido a la eliminación de subproductos de la fermentación no hidrosolubles (orgánicos) y olorosos. Eliminación de olores (hidrofóbica componentes de sabor). Este

sistema se regenera 2-3 veces a la semana con vapor y esto permitirá que las torres permanezcan en línea.

Se proporciona un filtro de polvo de carbón altamente eficiente en la salida para detener el arrastre de las partículas de carbón con la corriente de gas.

### **Deshidratador de CO<sub>2</sub> gas**

El deshidratador de CO<sub>2</sub> está diseñado para eliminar el vapor de agua y las impurezas que causan olores en una operación eficiente.

La regeneración se completa a través de un elemento eléctrico interno instalado en cada torre. Punto de rocío máximo de salida -60°C a 17.2 Bar g

El paquete del sistema de licuefacción de CO<sub>2</sub> está diseñado para licuar el vapor de CO<sub>2</sub> a 17,2 Bar g. enfriando el vapor a -27°C, a esa temperatura cambia a CO<sub>2</sub> líquido. El equipo de licuefacción es del tipo pesado y está diseñado para una operación continua.

El sistema consiste en lo siguiente:

Compresores refrigerantes tipo de tornillo / tipo alternativo / basado en amoníaco, arranque sin carga y 50% de reducción de capacidad, controles automáticos

Condensador / receptor de refrigerante refrigerado por agua y tipo de tubo / intercambiador de calor tipo PHE. Completo con las válvulas necesarias, válvula de agua de regulación de presión y válvulas de seguridad. Se suministra como un paquete integral

Condensador de CO<sub>2</sub> Tipo de expansión - condensador de carcasa y tubo, Unidad que se empacará montada sobre el deslizador de CO<sub>2</sub> líquido para permitir la alimentación por gravedad del CO<sub>2</sub> líquido al separador de CO<sub>2</sub> líquido.

Pelacables líquidos CO<sub>2</sub> con rebobinador y reflujo condenser Especificaciones del diseño Pureza CO<sub>2</sub>: - Líquido @ Salida de la torre del extractor:> 99.99 vol. % Contenido de O<sub>2</sub>: <5 ppmv El separador se monta entre el condensador de CO<sub>2</sub> y el

tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub> líquido. El stripper imprueba la calidad del CO<sub>2</sub> producido al reducir el contenido de O<sub>2</sub> al eliminar el CO<sub>2</sub> líquido con vapor puro de CO<sub>2</sub>. La caldera es de tipo carcasa y tubo. Este re-caldera tendrá una carcasa de acero carbonatado con tubos de acero al carbono. El CO<sub>2</sub> líquido fluye a través de la caldera y se vaporiza a través del uso de refrigerante caliente del sistema de refrigeración incluido. El vapor de CO<sub>2</sub> entra en el stripperand y se eleva a través del lecho empacado, eliminando los gases no condensables de la alimentación de líquido "impuro". Los gases no condensables se expulsan luego a la atmósfera después de la condensación de CO<sub>2</sub> adicional.

### **Tanque de almacenamiento 30 mtd**

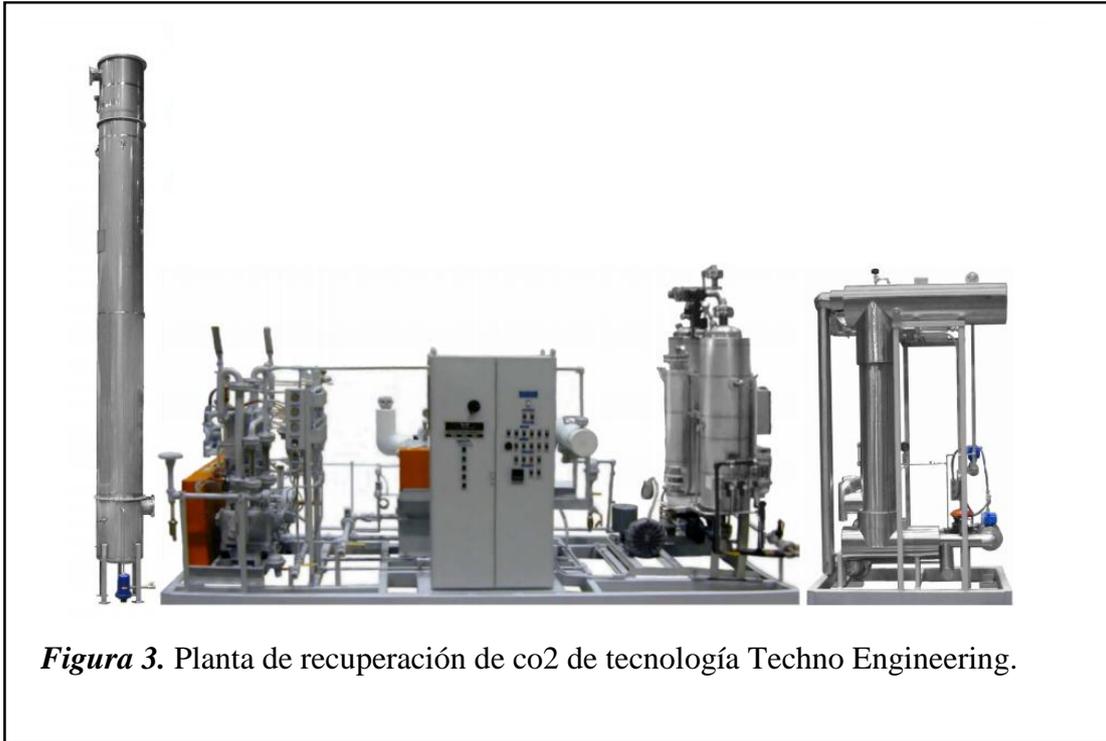
Capacidad: 30 M3, Presión de diseño: 24 Bar (G). Temperatura de diseño: - (-) 40, presión de trabajo: - 21 Bar (G), el tanque se debe suministrar debidamente aislado con válvulas, GPD, medidores y accesorios.

### **Tecnología Techno Engineering**

La tecnología más avanzada proporciona la mejor eliminación de impurezas y eficiencia de recolección. Los bajos costos de operación se logran al utilizar tecnologías nuevas y comprobadas en el área de purificación, compresión y licuefacción. El sistema puede diseñarse para recuperar CO<sub>2</sub> de fuentes con una pureza de entrada entre 90% y 99,9%. Proporciona CO<sub>2</sub> líquido con una pureza de hasta 99.95% en el sistema de separación de CO<sub>2</sub>.

La operación completamente automática proporciona una mínima intervención del operador y control de capacidad. El diseño del sistema, la selección de materiales y la técnica de fabricación proporcionan requisitos y costos de mantenimiento fáciles y reducidos.

La alta recuperación de CO<sub>2</sub> y la eficiencia producen más producción de CO<sub>2</sub>, que luego pueden utilizarse para mejorar la calidad y aumentar los ingresos con la venta del mismo.



**Figura 3.** Planta de recuperación de co2 de tecnología Techno Engineering.

El sistema está diseñado para recuperar CO<sub>2</sub> de varias fuentes de fermentación. Los procesos para la recuperación de CO<sub>2</sub> de las fuentes son esencialmente el mismo en ambos fabricantes de tecnología. La diferencia está solamente en la calidad del producto purificado.

A continuación se describe el proceso que utilizan ambas tecnologías, que tienen las mismas operaciones u etapas para obtener CO<sub>2</sub> purificado.

#### **Descripción del proceso de la tecnología Techno Engineering:**

- Trampa de espuma (Separador): para eliminar el remanente ocasional de espuma de la fermentación.
- Compresor Booster de CO<sub>2</sub>: mantiene la presión del fermentador y proporciona una presión positiva para la purificación y la compresión.
- Depurador de CO<sub>2</sub>: proporciona la eliminación masiva de impurezas solubles en agua (como alcoholes, cetonas, etc.) de manera eficiente utilizando agua potable como medio de lavado (consumo mínimo de agua).
- Permanganato de potasio / depurador de agua (opcional): este paso se utiliza cuando el CO<sub>2</sub> está destinado a la reventa o para la carbonatación de agua /

refrescos. Garantiza la oxidación y la eliminación de impurezas que no se eliminan completamente en el lavado con agua.

- Compresor de CO<sub>2</sub>: eleva la presión del gas de CO<sub>2</sub> para permitir una purificación, deshidratación y licuefacción eficientes.

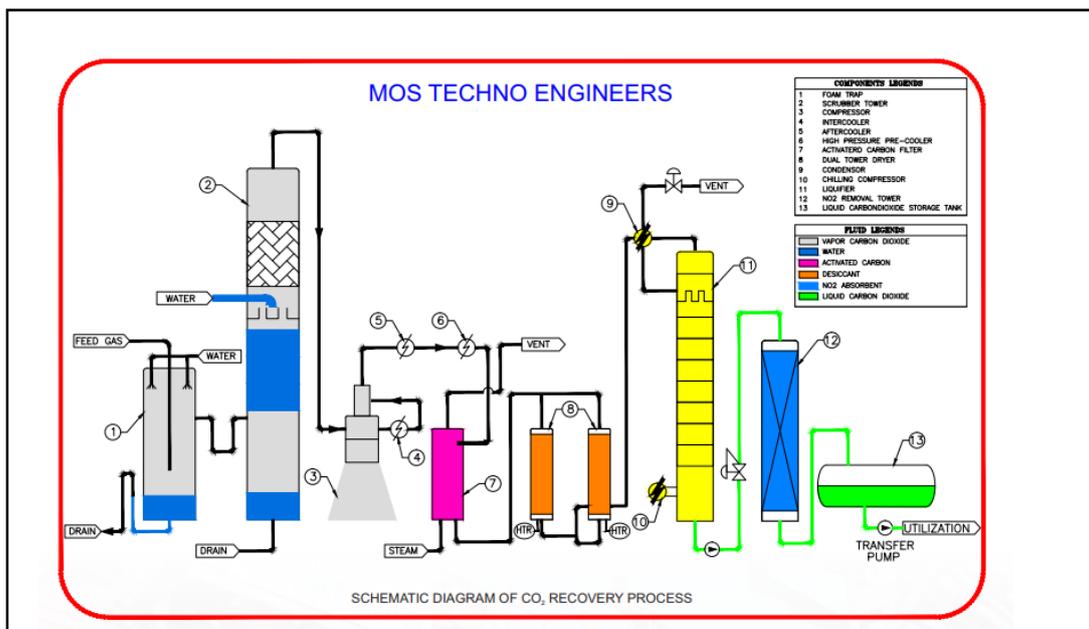
- Refrigerador/pre-enfriador de CO<sub>2</sub>: reduce la temperatura del gas para condensar y eliminar una cantidad significativa de agua contenida en el gas. Esto maximiza el desempeño y la eficiencia del equipo aguas abajo.

- Desodorizador/Secador de CO<sub>2</sub>: Elimina trazas de impurezas (como compuestos orgánicos y de azufre) y vapor de agua (humedad).

- Sistema de licuefacción de CO<sub>2</sub>: convierte el gas CO<sub>2</sub> en una forma líquida mediante el uso de refrigeración (R-22, R-404A, NH<sub>3</sub>, etc.). Esto permite el almacenamiento del producto líquido de CO<sub>2</sub> y proporciona una purificación del CO<sub>2</sub> mediante la eliminación parcial de gases no condensables (O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>).

- Limpiador de CO<sub>2</sub> líquido: diseñado para proporcionar una pureza de CO<sub>2</sub> líquido de hasta <5 ppmv O<sub>2</sub>. También permite una recolección más temprana de la fermentación, aumentando así el CO<sub>2</sub> recuperado.

- Tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub> líquido: recibe y almacena el CO<sub>2</sub> líquido para su reutilización o reventa.



**Figura 4.** Diagrama de flujo del proceso de recuperación de CO<sub>2</sub> de Tecnología Gulati.

## **Tecnología unión**

Las plantas de recuperación (RBU) están especialmente diseñadas para recuperar el CO<sub>2</sub> de los procesos de fermentación en las cervecerías. A través de la tecnología adecuada de depuración, filtración y separación, el CO<sub>2</sub> recuperado se purifica para cumplir con los requisitos de calidad más exigentes del mercado.

El uso de material de embalaje estructurado de última generación en el depurador de agua reduce el consumo de agua a 0,25 kg de agua / kg de CO<sub>2</sub>, lo que equivale a una reducción de hasta el 75% en comparación con las plantas tradicionales.

La tecnología PUR-D es la etapa de purificación final, que consiste en una columna de destilación que permite la separación / expulsión de gases no condensables, reduciendo el contenido de O<sub>2</sub> en el producto final <5 ppm (v / v) y obteniendo la pureza de CO<sub>2</sub> correspondiente de min. 99.998% (v / v).

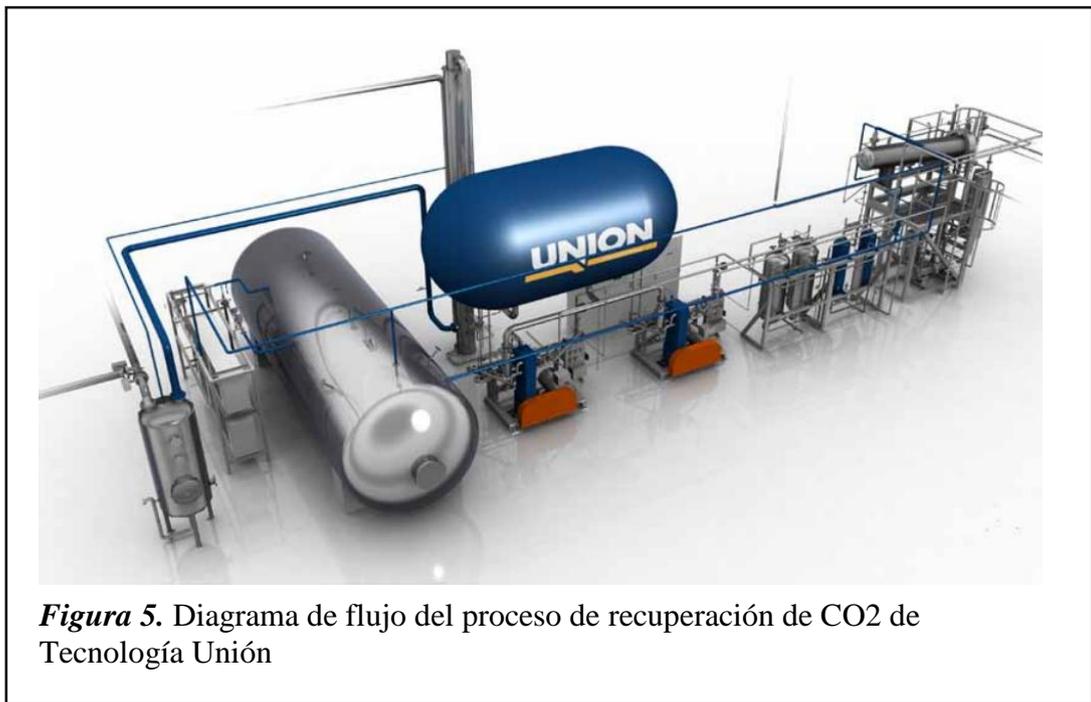
El sistema eléctrico para la planta de recuperación de CO<sub>2</sub> consiste en un panel de control local y un panel MCC LV (bajo voltaje).

Desde el panel de control, que comprende la última tecnología de PLC, la planta se opera y supervisa en una pantalla TFT táctil, lo que garantiza un funcionamiento fácil y continuo sin problemas.

La planta se inicia mediante una secuencia de inicio automático y la operación es completamente automática. Todo el proceso se puede examinar fácilmente en el panel del operador, mostrando el estado de todas las unidades, las lecturas de todos los transmisores y las advertencias de alarma, que también se indicarán mediante una alarma sonora.

Todos los instrumentos instalados en los patines se conectan a uniones o cajas de E / S remotas antes del envío, lo que reduce el tiempo de instalación y puesta en marcha en el sitio.

Las plantas están diseñadas para una alta eficiencia, disponibilidad y confiabilidad a través de componentes seleccionados para una larga vida útil y operación 24/7.



**Figura 5.** Diagrama de flujo del proceso de recuperación de CO2 de Tecnología Unión

### **Uso del CO2.**

Mitsubishi Heavy Industries (2010) afirma que el de CO2 puede utilizarse para bebidas carbonatadas, cervezas y vinos; el de dióxido de carbono sólido, en forma de hielo seco se utiliza para la refrigeración de productos alimenticios por ejemplo helados, productos de carne y productos congelados. También el de CO2 solido (hielo seco) se utiliza para enfriar los remaches de aluminio, los cuales se endurecen rápidamente a temperatura de ambiente, pero permanecen suaves si se mantienen fríos con hielo seco.

El siguiente cuadro presenta ejemplos de las aplicaciones del CO2.

Ejemplo de aplicación	Producto sustituido	Ejemplo de aplicación	Producto sustituido	Ejemplo de aplicación	Producto sustituido
Limpieza en seco	Compuestos clorados	Extintor de incendios	Retardadores de llamas	Extracción de cafeína	Hexano
Tratamiento de aguas	Ácido sulfúrico	Limpieza de piezas electrónicas	Compuestos fluorados	Disolvente para reacción	Compuestos orgánicos volátiles
Aire acondicionado	Compuestos fluorados	Industria mecánica	Fluidos con mayor capacidad de impacto en el cambio climático	Producción de nanomateriales	Solventes orgánicos
Antibacterias	Complejos farmacéuticos	Extracción de fragancias	Hexano	Solvente en polimerización	Solventes orgánicos volátiles

**Figura 6.** Ejemplos de aplicaciones tecnológicas en las que se usa el CO<sub>2</sub> junto con el producto al que sustituye en dicha aplicación.

El dióxido de carbono se puede utilizar en diferentes campos. En las industrias alimentarias se utiliza para congelar los alimentos y mantenerlos fríos durante el transporte (hielo seco), además de ellos también se utiliza en las bebidas carbonatadas. En la industria química el CO<sub>2</sub> se utiliza para producir fertilizantes, plásticos y polímeros. Otro uso que le dan al dióxido de carbono es en las plantas de tratamiento de agua debido a que el CO<sub>2</sub> es más seguro de manejar que los ácidos minerales para el control de pH, además de ser utilizado en lo anteriormente mencionado también lo podemos encontrar en extintores y además de ello se utiliza en incendios de combustible o electrónico. (Air Products, 2009).

Global CCS Institute & Brinckerhoff (2011) sostiene que el CO<sub>2</sub> se puede utilizar en bebidas carbonatadas, en la vinificación es decir se utiliza como gas sellador para evitar la oxidación del vino durante la maduración, en el procesamiento, conservación y envasado de alimentos; en el tratamiento de aguas es decir se utiliza para la re mineralización del agua después de la ósmosis inversa y para controlar mejor el pH. El dióxido de carbono también se utiliza para horticultura donde se proporciona CO<sub>2</sub> para ayudar a mantener una concentración óptima de CO<sub>2</sub> y así permitir un mejor crecimiento de las plantas. Además de ello se puede utilizar como fluido de trabajo en la planta de refrigeración, en particular para los grandes sistemas industriales de aire acondicionado y

refrigeración. Esto ayuda a reemplazar los gases refrigerantes más tóxicos que existen para el ser humano y también para el medio ambiente.

### **Huella de carbono.**

Según el Eco Foro (2011) la huella de carbono es un instrumento que se utiliza para cuantificar la cantidad y el origen de las emisiones de gases de efecto invernadero ya sea efecto directo o indirecto en todas las etapas del ciclo de vida de un producto, servicio etc. Este indicador ambiental considera las emisiones de todos los gases de efecto invernadero del protocolo de kyoto. Las emisiones de gases se convierten mediante factores de misiona equivalente de CO<sub>2</sub>, que es la unidad de medida de la huella de carbono.

La huella de carbono se conoce un indicador capaz de sintetizar los impactos provocados por las actividades del hombre en el entorno, medido en términos de emisiones de los gases de efecto invernadero. Por consiguiente, la huella de carbono representa una poderosa herramienta de gestión y un estímulo para adoptar una estrategia para el logro de la sustentabilidad de las organizaciones. Sobre los valores de factores que debemos utilizar para la conversión y equivalencia, no hay un consenso específico aun en instituciones, empresas, por lo tanto, aún no existe un método específico para determinar y comprar la huella de carbono de productos, servicios, viviendas y empresas. (Espíndola y Valderrama, 2012).

#### **1.4. Formulación del problema.**

¿Cómo es el sistema de recuperación y qué uso se le dará al CO<sub>2</sub> de la planta alcoholera Industrial Pucalá, para mitigar los gases de efecto invernadero?

#### **1.5. Justificación e importancia del estudio**

La contaminación con CO<sub>2</sub> en el Perú y en todo el mundo está siendo un problema que alarma a todos por el fuerte impacto ambiental que puede generar este gas de efecto invernadero; una de las industrias que emite este tipo de gas son las alcoholeras por su mismo proceso de fermentación donde todo es emitido de forma directa al medio ambiente.

Pero hay que tener en claro que las emisiones de este gas muy poco se han podido controlar a nivel nacional es por eso que con esta investigación se plantea un

aporte de tanto científico como tecnológico por el hecho de calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y con ello plantear un proceso de aprovechamiento de este gas.

Es por eso que esta investigación es de suma importancia porque va a permitir reducir los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera con métodos y tecnologías de captación para darle un mejor uso a este y con ello generar una fuente de ingresos.

Siendo así este diseño tendrá un impacto de tal forma que incentive a las industrias alcoholeras a tomar conciencia del daño que ocasiona diariamente sus empresas, sabiendo que esta mejoría no solo será para cuidar el medio ambiente, sino que, también ayudará a generar ingresos con su aplicación y con ello generará más puestos de trabajo para su localidad.

#### 1.6. **Hipótesis**

El sistema de recuperación de CO<sub>2</sub> en la planta alcoholera Pucalá si permitirá mitigar los gases de efecto invernadero.

#### 1.7. **Objetivos**

##### 1.7.1. **Objetivo general**

Seleccionar un sistema para recuperación de CO<sub>2</sub> en la planta alcoholera Industrial Pucalá y darle uso en la industria de bebidas, y así mitigar los gases de efecto invernadero.

##### 1.7.2. **Objetivos específicos**

Precisar la producción de CO<sub>2</sub> en la planta alcoholera Industria Pucalá.

Identificar las tecnologías existentes para recuperar el CO<sub>2</sub> de los procesos fermentativos y seleccionar la mejor tecnología para recuperar y darle uso al CO<sub>2</sub> de los procesos fermentativos.

Describir el proceso seleccionado para la conversión y uso del CO<sub>2</sub>.

Realizar una evaluación económica del sistema de recuperación y uso del CO<sub>2</sub>.

Estimar la reducción en la emisión de CO<sub>2</sub> en la planta alcoholera Industrial Pucalá con el sistema seleccionado.

**CAPÍTULO II**

**MATERIAL Y MÉTODOS**

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Tipo y diseño de investigación.

#### Tipo de investigación.

La siguiente investigación es de tipo aplicada.

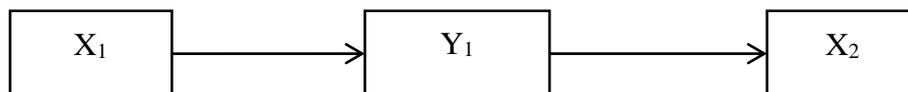
El estudio será descriptivo porque según Arias (1999).” Consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o suceso con establecer su estructura o comportamiento. Los estudios descriptivos miden de forma independiente las variables, y aun cuando no se formulen hipótesis, las primeras aparecerán enunciadas en los objetivos de investigación” (p.20). En esta investigación se describe el proceso desde que se recupera el CO<sub>2</sub> hasta la obtención con alta pureza para ser utilizada en la industria de bebidas.

Vargas citado(Murillo,2008) manifiesta que una investigación aplicada también recibe el nombre de practica o empírica ya que se caracteriza por poner todos los conocimientos adquiridos y a la vez se adquieren otros, después de implementar la práctica basada en investigación.

#### Diseño de investigación.

El diseño de investigación será No experimental. Según Sampieri et al. (2010) podría definirse como la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios donde no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables. Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para posteriormente analizarlos. (p.149).

Es un tipo de diseño clásico analítico, sintético, inductivo y deductivo con el siguiente modelo:



X<sub>1</sub> = CO<sub>2</sub> de 99.5-99.7% v/v

Y1 = Planta de purificación

X<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub> de 99.998% v/v

## **2.2.Población y muestra.**

### **Población.**

La población estará conformada por todas 10 plantas alcoholeras del departamento de Lambayeque.

### **Muestra.**

La muestra con la que se estudiará esta investigación será una muestra seleccionada por conveniencia, siendo así el objeto, la investigación la planta alcoholera industrial Pucalá.

## **2.3.VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN.**

### **Variable dependiente.**

Los gases de efecto invernadero

### **Variable independiente.**

Sistema de recuperación y uso del CO<sub>2</sub>

**Tabla 2***Operacionalización de la variable dependiente e independiente.*

Variables	Dimensiones	Indicadores	Índice	Técnica e instrumento de recolección de datos	
				Técnicas	Instrumentos
INDEPENDIENTE	Equipo de lavado	N° de separadores de espuma	1	Análisis documentario	Ficha técnica
Sistema de recuperación de CO2	Equipo de Absorción de CO2	N° de Scrubber	1	Análisis documentario	Ficha técnica
	Equipo de Compresión	N° y tipo de compresor	1	Análisis documentario	Ficha técnica
	Equipo de Filtración y secado	N° de equipos de filtración y secado	2	Análisis documentario	Ficha técnica
	Equipo de Almacenamiento	N° de equipo de almacenamiento	1	Análisis documentario	Ficha técnica
Uso del CO2	Aplicación que se le dará al CO2	Uso en bebidas T de uso de CO2 para bebidas		Análisis técnico	Guía de análisis documentario
DEPENDIENTE	Reducir la emisión de CO2	Capacidad de recuperación del CO2	Índice de recuperación de CO2= $T \text{ CO2 recuperada} / T \text{ CO2 producidas}$	Análisis documentario Entrevista Observación directa	Guía de análisis documentario Cuestionario Ficha técnica

Fuente: Elaboración propia

## **2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información.**

### **Técnicas de recolección de información.**

Para que el proyecto de investigación se desarrolle con credibilidad y realista tiene que ver una relación entre el investigador y el objeto de estudio para que así se pueda dar solución al problema. Las técnicas a utilizar son:

#### **Observación directa.**

Esta técnica es importante porque nos ayudó a conectarnos con el objeto de estudio, a visualizarla de manera directa y con ello tener un plano más abierto de la empresa para el buen desarrollo de la investigación.

#### **Análisis documentario.**

Esta técnica es importante porque ayudó a encontrar la mejor tecnología en la transformación y uso del CO<sub>2</sub>, y también para tener información directa sobre la producción mensual de CO<sub>2</sub> en la planta de producción de etanol de Pucalá.

#### **Análisis técnico**

Técnica utilizada en las plantas industriales que utiliza los conocimientos de ingeniería para evaluar aspectos técnicos del proceso, en este caso de las tecnologías disponibles.

#### **Revisión bibliográfica.**

La revisión bibliográfica nos permitió recopilar toda la información para poder escoger la mejor tecnología y aplicación del CO<sub>2</sub>.

#### **Entrevista.**

Nos permitió la obtención de información detallada de la empresa y con ellos saber si conocían el daño del CO<sub>2</sub> hacia el medio ambiente y la pérdida de ese gas que se puede utilizar y generar una fuente de ingresos.

## **2.5.Procedimiento de análisis de datos**

Para realizar el diagnóstico de la situación actual de la empresa Industrial Pucala S.A.C en las emisiones de CO2 de los fermentadores de la planta alcoholera, se realizó el siguiente procedimiento.

- Se realizó una observación directa no estructurada, para tener un plano más abierto de la empresa y del problema en sí; para tener en cuenta los puntos a trabajar en esta investigación.
  
- Se diseñó y aplicó una entrevista, conformada por 6 preguntas a la supervisora de planta de alcohol.
  
- Se aplicaron formatos de análisis documental y análisis documental de la producción, para hacer una evaluación actual de la producción de la empresa Industrial Pucala S.A.C.

## **2.6.Aspectos éticos**

En este proyecto se tendrán en cuenta los siguientes criterios éticos:

**Confidencialidad:** Se garantiza el cuidado y protección de la identidad de los trabajadores que participan en la investigación.

**Veracidad:** La información utilizada en esta investigación es verdadera, cuidando la privacidad.

**Objetividad:** El análisis de la situación encontrada (actual) se basará en criterios técnicos e imparciales.

**Originalidad:** Las fuentes bibliográficas serán citadas, con la finalidad de demostrar la inexistencia de plagio en esta investigación.

## **2.7.Criterios de rigor científico**

Los criterios de rigor científico que se trabajar en esta investigación son:

**Confiabilidad:** se hará evaluaciones con otros instrumentos de recolección de datos de otras investigaciones para determinar el grado de consistencia interna de los instrumentos.

**Validación:** Los instrumentos de recolección de datos serán validados por expertos en el tema de investigación; estos pueden ser docentes e investigadores en el tema de la ingeniería industrial.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS**

### **III. RESULTADOS**

#### **3.1. Diagnóstico de la empresa.**

##### **3.1.1. Información general.**

RUC: 20113657872

Razón social: AGROPUCALA S.A.A.

Página web: <http://www.agropucala.com>

Nombre comercial: Agro Pucalá

Tipo empresa: Sociedad Anónima Abierta

Condición: Activo

Fecha inicio actividades: 03 / Octubre / 1970

Actividad comercial: Cultivos de Cereales.

CIU: 01110

Dirección Legal: Av. Pioneros de Rochdale Nro. Sn (Costado de la Municipalidad de Pucalá)

Distrito / Ciudad: Pucalá

Provincia: Chiclayo

Departamento: Lambayeque, Perú



**Figura 7.** Localización de la empresa Pucalá.

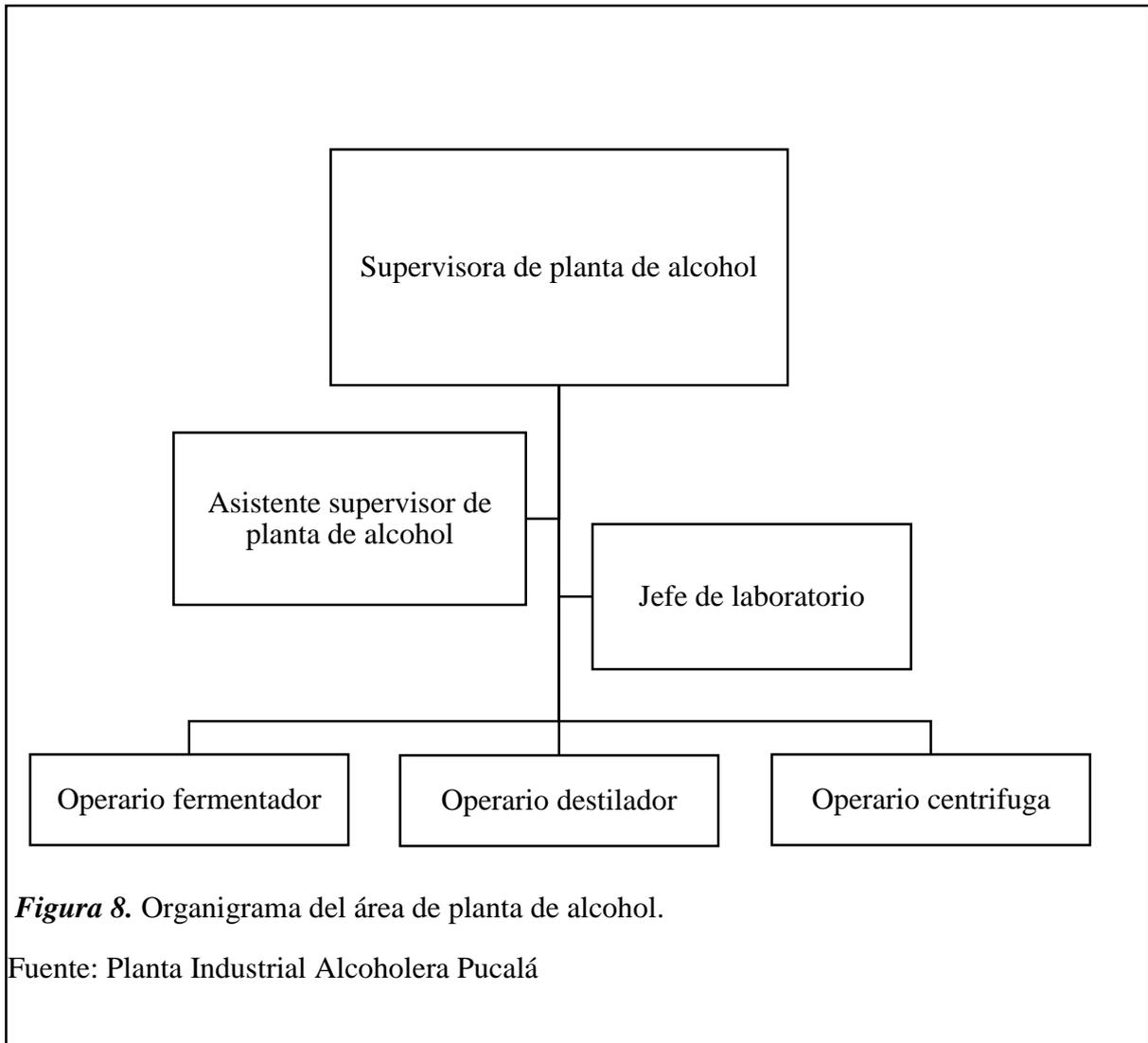
### **Misión.**

Constituir una organización socio-económica responsable, que permita alcanzar no sólo el desarrollo empresarial, sino también el bienestar social de sus trabajadores, para lo cual implementará una serie de planes y estrategias de trabajo, tendientes a lograr los objetivos y metas a corto, mediano y largo plazo; utilizando sistemas, procesos y tecnología adecuada, que satisfagan los estándares requeridos por nuestros clientes.

### **Visión.**

Ser una empresa líder en el sector azucarero nacional, utilizando sistemas, procesos y tecnología adecuada, para brindar productos que garanticen las expectativas de calidad, higiene y atención oportuna de nuestros clientes; manteniendo con ellos relaciones comerciales de largo plazo. Asimismo, actuar con responsabilidad social y ambiental, desarrollando las mejores prácticas agrícolas para el cuidado del ecosistema.

## Organigrama.



**Figura 8.** Organigrama del área de planta de alcohol.

Fuente: Planta Industrial Alcoholera Pucalá

Este organigrama es del área donde se realizó la investigación el cual cuenta con una supervisora de planta, asistente supervisor y jefe de laboratorio, este personal se repite en los tres turnos existentes por día.

### **Personal.**

La planta de alcohol de Pucalá cuenta con tres turnos de trabajo de ocho horas al día los cuales se dividen en un horario de: primer turno de cuatro de la mañana hasta las doce del mediodía, el segundo turno es desde las doce del mediodía hasta las ocho de la noche y por último es desde las ocho de la noche hasta las cuatro de la mañana.

Cada turno de trabajo cuenta con tres operadores en planta y el jefe de laboratorio los cuales se desempeñan en sus diferentes funciones como son los pre-fermentadores, fermentadores, destilación y laboratorio.

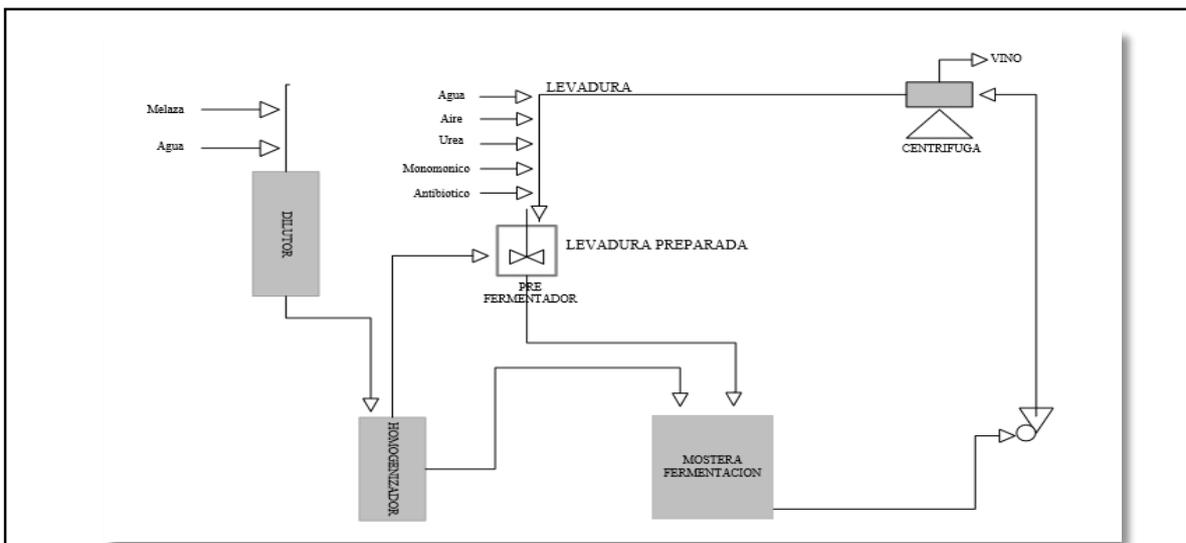
### Productos.

La destiladora de Pucalá tiene como producto de fabricación dos tipos de alcohol rectificado los cuales se dividen en:

Alcohol rectificado de primera que sale con un grado de alcohol de 96.3, el cual tiene un aspecto claro libre de partículas es vendido a dos clientes Alkohler y Santa Ana.

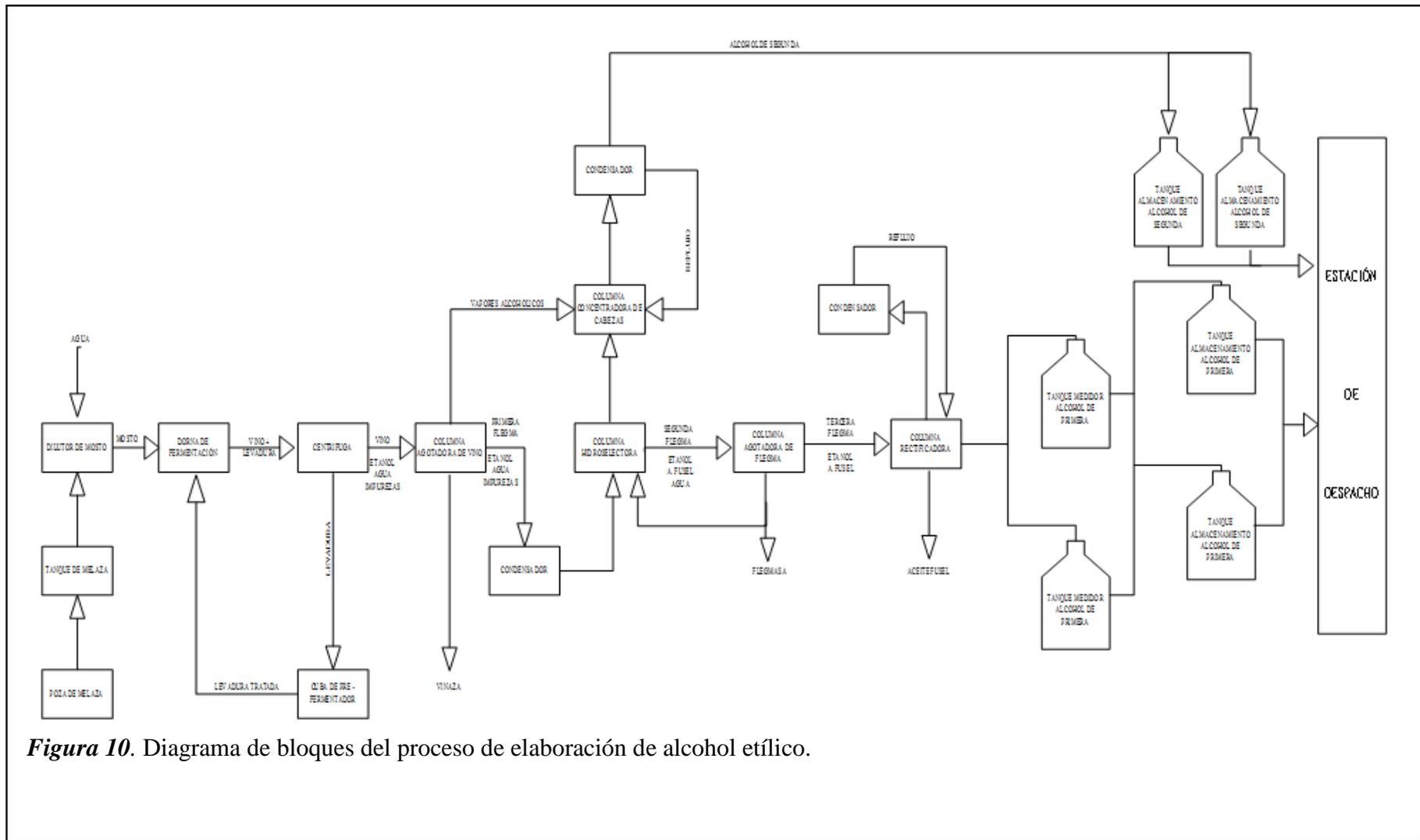
Alcohol rectificado de segunda que sale con un grado de alcohol de 92.4, el cual tiene un aspecto verde libre de partículas es vendido a dos clientes Alkohler y Santa Ana.

### 3.1.2. Descripción del proceso fermentativo.



**Figura 9.** Diagrama de flujo del proceso de fermentación en la planta industrial Pucalá

En este diagrama se puede observar el proceso de la fermentación desde su inicio que es el dilutor de melaza hasta las mosteras de fermentación que es donde termina el proceso para darle paso a la destilación.



**Figura 10.** Diagrama de bloques del proceso de elaboración de alcohol étílico.

### 3.1.3. Análisis de la problemática.

#### 3.1.3.1. Resultados de la aplicación de instrumentos.

Se presenta a continuación los resultados obtenidos en la aplicación de las técnicas de recolección de información: observación, análisis documental y entrevista.

#### Resultados de la observación

En esta guía de observación se puede apreciar las cosas con las que cumple y con las que no la planta alcoholera Industrial Pucalá, las cuales nos van a permitir saber cómo es que se encuentra la planta, sus deficiencias.

**Tabla 3**  
*Guía de observación.*

ÍTEMS	SI	NO	OBSERVACIÓN
Cuenta con producción diaria	X		
Los fermentadores cuenta con cubierta (tapa)		X	
Los pre fermentadores cuenta con cubierta (tapa)		X	
Los fermentadores tienen un buen sistema de enfriamiento		X	
Los fermentadores son de acero inoxidable		X	
Llevan control de producción	X		
Llevan control de insumos	X		
La producción es constante		X	

Al realizar la guía de observación se observan muchas ineficiencias en la planta alcoholera teniendo como problemas principales, el material de construcción de los

fermentadores, el sistemas de enfriamiento, y sobre todo el más importante, la falta de cubiertas en los fermentadores, que deja escapar libremente al CO2 que es producto de la fermentación.

### **Producción de etanol en la Planta Industrial Alcohólica Pucalá**

En la guía de análisis documentaria hemos analizado solo la producción de alcohol en la cual se expresa en litros/mes.

**Tabla 4**  
Producción mensual de alcohol etílico.

<b>PRODUCCIÓN MENSUAL DE ALCOHOL</b>		
<b>MES</b>	<b>LITROS</b>	
<b>2016</b>	Enero	437,146
	Febrero	528,469
	Marzo	143,921
	Abril	0
	Mayo	662,812
	Junio	724,575
	Julio	753,005
	Agosto	604,924
	Septiembre	449,156
	Octubre	437,378
	Noviembre	283,593
	Diciembre	451,790
<b>2017</b>	Enero	512,289
	Febrero	261,282
	Marzo	19,449
	Abril	0
	Mayo	625,721
	Junio	685,127
	Julio	1,068,308.000
	Agosto	569,118
	Septiembre	535,508

En la producción total de todos los meses mostrados en la tabla N° 4 está la suma del alcohol de primera y de segunda.

**Tabla 5**  
Producción diaria de alcohol etílico.

<b>PRODUCCIÓN DE ALCOHOL JULIO 2017</b>			
<b>DIA/MES/AÑO</b>	<b>ALCOHOL 1°</b>	<b>ALCOHOL 2°</b>	<b>PRODUCCION TOTAL</b>
<b>01/07/2017</b>	33,809	2,916	36,725
<b>02/07/2017</b>	35,549	3,726	39,275
<b>03/07/2017</b>	40,773	3,289	44,062
<b>04/07/2017</b>	5,305	648	5,953
<b>05/07/2017</b>	5,305	648	5,953
<b>06/07/2017</b>	35,604	2,592	38,196
<b>07/07/2017</b>	32,361	3,240	35,601
<b>08/07/2017</b>	33,997	2,916	36,913
<b>09/07/2017</b>	37,320	3,078	40,398
<b>10/07/2017</b>	31,905	2,946	34,851
<b>11/07/2017</b>	40,225	4,212	44,437
<b>12/07/2017</b>	38,553	5,022	43,575
<b>13/07/2017</b>	37,794	4,374	42,168
<b>14/07/2017</b>	51,872	5,508	57,380
<b>15/07/2017</b>	40,564	4,753	45,317
<b>16/07/2017</b>	29,482	3,888	33,370
<b>17/07/2017</b>	23,182	2,268	25,450
<b>18/07/2017</b>	39,103	4,682	43,785
<b>19/07/2017</b>	38,938	5,508	44,446
<b>20/07/2017</b>	32,352	3,888	36,240
<b>21/07/2017</b>	23,661	2,924	26,585
<b>22/07/2017</b>	28,313	3,323	31,636
<b>23/07/2017</b>	34,330	4,536	38,866
<b>24/07/2017</b>	24,580	2,706	27,286
<b>25/07/2017</b>	25,111	2,916	28,027
<b>26/07/2017</b>	32,244	3,078	35,322
<b>27/07/2017</b>	41,581	5,346	46,927
<b>28/07/2017</b>	19,634	3,240	22,874
<b>29/07/2017</b>	22,634	5,276	27,910
<b>30/07/2017</b>	21,634	4,262	25,896
<b>31/07/2017</b>	19,634	3,250	22,884

Fuente: Planta Industrial alcoholera Pucalá

Alcohol 1° sale con un grado de alcohol de 96.3, el cual tiene un aspecto claro libre de partículas y alcohol 2° que sale con un grado de alcohol de 92.4, el cual tiene un aspecto verde libre de partículas.

Conocida la producción, se calculó la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite del proceso de fermentación, y se consideró la producción del mes de Julio del 2017 por ser donde se encuentra la producción mayor con 1, 068,308 litros/mes, pero para la investigación se tomó la producción estimada en 30000 litros/día de etanol rectificado de 96°GL.

## **Resultados de la entrevista**

### **Entrevista realizada a la supervisora de planta**

#### **(Cuestionario)**

Tenga usted un saludo cordial, somos estudiantes de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad Señor de Sipán, y estamos realizando un proyecto de investigación, por tal motivo le agradeceríamos que nos respondan a las siguientes preguntas.

1. ¿Por qué no capturan el CO<sub>2</sub> que escapa de los fermentados de su planta?, considera que es importante capturar el CO<sub>2</sub>

Porque la empresa está pasando por un problema económico que hasta la actualidad no se restablece. Pero si pienso capturarlos más adelante ya que todas las plantas alcohólicas tienen que tener ese sistema de recuperación.

Si considero que es importante capturar el CO<sub>2</sub> que se emiten en la planta porque de lo contrario estaría contaminando el ambiente.

2. ¿Considera usted que la captura del CO<sub>2</sub> puede ser útil para la empresa? ¿Por qué?

Si es útil, porque ese CO<sub>2</sub> se puede utilizar para hacer otros productos como agua y gaseosa obteniendo así más utilidades para la empresa.

3. ¿Conoce usted si en la producción de alcohol se emite gases de efecto invernadero (contaminantes)?

Sí, pero el único gas que se emite es el CO<sub>2</sub> por los mismos componentes químicos que utilizamos que es la urea.

4. ¿Tiene usted información sobre la conversión del CO<sub>2</sub> en productos no contaminantes?

Muy poca, solo sé que se puede utilizar para hacer gaseosas y agua con gas

5. ¿Cómo califica usted el nivel de CO<sub>2</sub> que escapa de los fermentados de la planta de alcohol?:

- a) Muy alto
- b) Alto
- c) Medio
- d) Bajo
- e) Muy bajo

6. ¿Estaría de acuerdo en instalar una planta de recuperación y tratamiento de CO<sub>2</sub>? ¿Porque?

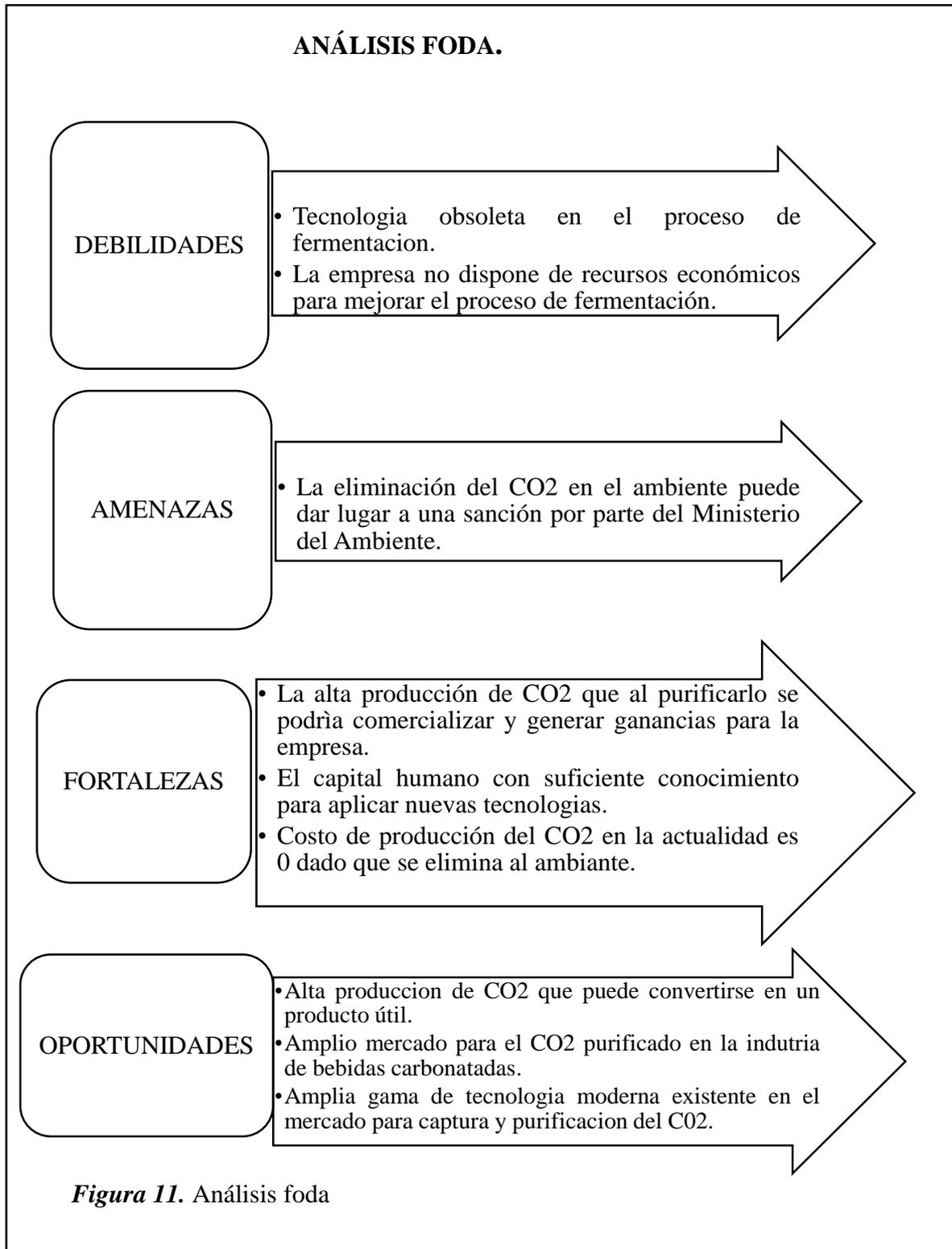
Si estoy de acuerdo porque si se captura ese CO<sub>2</sub> se puede utilizar para otros productos y como aquí en Pucalá hay un proyecto por hacer de una planta de agua sería muy beneficioso tener ese CO<sub>2</sub>.

En la entrevista realizada a la supervisora de planta de alcohol hemos podido observar que por su parte es consciente de la contaminación que produce el proceso de fermentación de la planta alcoholera pero que actualmente no le es importante y útil el CO<sub>2</sub> emitido para ella como para el gerente de fábrica por el simple hecho de que desconocen parcialmente la utilización del CO<sub>2</sub>.

El conocimiento parcial del uso del CO<sub>2</sub> se basa solo en las bebidas carbonatadas como las gaseosas y aguas, siendo la poca información y el desconocimiento del uso y transformación del CO<sub>2</sub> lo que le impiden realizar la captura de dicho gas.

Al estar conscientes de que el CO<sub>2</sub> es un gas contaminante y que afecta al cambio climático ellos estarían de acuerdo en instalar una planta recuperadora de CO<sub>2</sub> además que les serian un producto comercial adicional y con ello estarían generando un ingreso para la empresa.

### 3.1.3.2. Herramientas de diagnóstico.



### 3.1.4. Situación actual de las emisiones de CO2 en la fermentación

La empresa Industrial Pucalá en la actualidad cuenta con una planta de alcohol etílico rectificado, la misma que comprende dos procesos importantes para la obtención del alcohol etílico: el proceso de fermentación a base de levadura *saccharomyces* y el proceso de la destilación.

El problema que origina esta investigación se centra en el proceso de fermentación anaeróbica de esta planta ya que por su diseño actual esta genera una contaminación directa al medio ambiente y también a los trabajadores, esta contaminación se produce por la emisión del CO<sub>2</sub>.

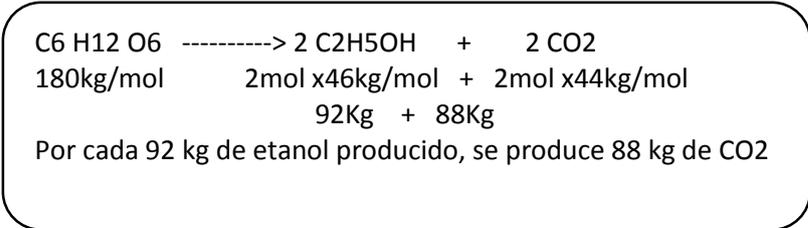
Este gas que es un componente de los gases de efecto invernadero no está siendo recuperado por la planta en la actualidad, a pesar que estas emisiones son considerablemente perjudiciales para el cuidado del medio ambiente y también para los mismos trabajadores. Las emisiones de CO<sub>2</sub> que la empresa produce por año es de 6446.19 T.



**Figura 12.** Tanques fermentadores  
Fuente: Planta Industrial Alcohólica Pucalá.

La cantidad de CO2 en relación al alcohol rectificado que produce la empresa es de 1 mol CO2 por c/mol de Etanol, lo que hace en total 6446.19 T/año de CO2 crudo como se muestra en el siguiente cálculo, con pequeñas impurezas de espuma, aire y olores.

### **Balance de CO2 producido en la fermentación**



La transformación de la glucosa en alcohol se genera por la descomposición de un rendimiento teórico en un rendimiento limitante. La descomposición de una molécula de glucosa (rendimiento teórico) genera una molécula de alcohol y una molécula de CO2 (rendimiento limitante) y estos se dan en kg/mol

Por cada 92 Kg de etanol puro se produce 88 kg de CO2.

### **Impurezas en el CO2 que sale de la fermentación.**

- 0.020% espuma
- 0.005% aire
- 0.005% impurezas que dan olor al CO2.

### **Producción Etanol 96° GL (96%)**

- 30000 Litros/día
- 28800 Litros de etanol puro
- 0.78 densidad del etanol al 96% (96° GL)
- 22464 Kg etanol puro

**22.464 T/día de etanol puro**

### **Producción de CO2 en la producción de Etanol de 96°**

- 21487.30 Kg de CO2/ día
- 21.49 T/ día de CO2
- 300 días de producción por año
- 6446.19 T CO2/ año crudo

**6446.19 T CO2 crudo/ año**

### **3.2. Selección de tecnología para recuperar y purificar co2 obtenido de los fermentadores**

Se dispone de tres tecnologías de amplia experiencia en el mundo de las industrias de fermentación y destilación de etanol, así como de las industrias cerveceras que recuperan el CO<sub>2</sub> para purificarlo y comercializarlo. Estas tecnologías son:

1. Pentair Haffmans Inc.
2. Puregas Carbonics Private Limited.
3. Techno Engineers

Las tres tecnologías utilizan el mismo proceso para recuperar y purificar el CO<sub>2</sub>, diferenciándose solamente en detalles de disposición y calidad de equipos, y calidad de producto final.

El proceso comprende los siguientes equipos principales:

- Separador de espuma (1)
- Balón de gas comprimido (1)
- Lavador de gas o scrubber (1)
- Compresor de CO<sub>2</sub> (1)
- Filtros de carbón activado (2)
- Secadores (2)
- Unidad de condensación y refrigeración (OPCIONAL)
- Tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub> (1)

Cuando existen procesos diferentes para recuperar y purificar el CO<sub>2</sub>, el procedimiento es seleccionar el proceso más adecuado para utilizar, sin embargo siendo un solo proceso, lo que cambia son las tecnologías que ofrecen los proveedores de la planta industrial para recuperar el CO<sub>2</sub> y purificarlo. Esta es una técnica de ingeniería que permite seleccionar un proceso industrial entre varios existentes para lograr el mismo objetivo. En un proceso industrial se puede aplicar el método de criterio técnico (Moncada, L. 2017), en el que se evalúan variables como Calidad de producto, Disponibilidad de Información, Complejidad, Condiciones de operación, Inversión Total.

Para seleccionar la tecnología a utilizar, no se consideró la tecnología UNION, debido a que no se recibió cotización de precio de la planta.

La evaluación de inversión total se realizó en base al costo de la planta puesta en puerto peruano (CIF). La calidad está referida a la pureza del CO2 al final del proceso según la información de cada fabricante. La disponibilidad de información responde a datos del fabricante de capacidad de la planta, capacidad de cada equipo, especificaciones del equipo, y variables de operación. La complejidad se refiere a cuán difícil resultaría la instalación y manejo del proceso. Siendo el proceso nada complejo para todos los fabricantes, se obvió este factor.

El valor ponderado para evaluar cada parámetro se tomó entre 0 y 10. Siendo cero la calificación más baja o de valor cero, y 10 la máxima calificación para cada parámetro según su importancia y a criterio del diseñador.

La calidad de CO2 es de 99.998%, 99.998% y 99.99% para Haffmans, Puresgas y Techno Engineering respectivamente. Los costos son de: \$450000, \$451500 y \$570000 dólares para Haffmans, Puresgas y Techno Engineering respectivamente. (Ver Anexos, cotizaciones).

**Tabla 6**

*Método de Criterio técnico para selección de tecnología de CO2*

FACTOR	Valor Ponderado	TECNOLOGIAS DE CO2		
		HAFFMANS	PUREGAS	TECHNO E.
<b>Calidad</b>	10	10	9	10
<b>Disp.Inform</b>	5	5	3	3
<b>Cond.Oper.</b>	5	5	5	5
<b>Costo Total</b>	10	10	9	7
<b>TOTAL</b>		30	26	25

Se concluye que la tecnología que ofrece mejores ventajas es HAFFMANS.

## **Sistema Haffman seleccionado (propuesto) para recuperación y purificación de co2 en la planta de alcohol rectificado de la empresa industrial Pucalá.**

### **3.2.1. Fundamentación**

Uno de los problemas más críticos que enfrenta la humanidad actualmente es el calentamiento global de nuestro planeta tierra que está dando lugar indirectamente al cambio climático y por ende a fenómenos climatológicos como lluvias, inundaciones, sequías, ciclones, huracanes, con la consecuente pérdida de vidas, viviendas, y bienes.

Un factor clave en estos fenómenos son los gases de efecto invernadero que han formado en la atmósfera una capa formada por varios gases que se emiten desde nuestro planeta, como son el metano, vapor de agua, dióxido de carbono, óxido nitroso, ozono y clorofluorocarbonos que no dejan escapar los rayos solares, que en parte se quedan en la superficie terrestre generando de esta manera un incremento de la temperatura.

El CO<sub>2</sub> forma parte de más del 60% de estos gases de efecto invernadero, por ende, su presencia es el de mayor interés para los ambientalistas. Este gas carbónico o anhídrido carbónico se encuentra presente en los gases residuales de combustión de los combustibles fósiles que salen de los hornos y calderos, así como de algunos procesos industriales, principalmente de fermentación alcohólica.

El presente estudio está orientado al estudio del gas carbónico que se obtiene como subproducto en la fermentación alcohólica de la empresa Industrial Pucalá. A nivel mundial las emisiones de CO<sub>2</sub> ha sido una gran preocupación desde algunos años después de la segunda guerra mundial con el crecimiento de la industria química de producción continua y paralelamente el incremento de la temperatura de planeta. Inicialmente los científicos orientaron sus investigaciones hacia la captura del CO<sub>2</sub>, pero esto quedó allí, posteriormente la tendencia se amplió a no solo capturar sino almacenar. Actualmente el enfoque de los estudios

de investigación se orienta a convertir el CO<sub>2</sub> en productos químicos de gran demanda y utilidad.

El estudio se fundamenta ahora en darle un valor a este gas y de esta manera mitigar la contaminación que está ocasionando en la atmósfera terrestre. Por lo tanto, el propósito es capturar el CO<sub>2</sub> que sale de los fermentadores y purificarlo dejando apto para su utilización como insumo en las industrias de bebidas carbonatadas, combustibles como metano, gas de síntesis junto al hidrógeno, producción de productos químicos como metanol, carbonatos, entre otros.

Solamente en la industria de bebidas carbonatadas este tiene una gran demanda, por lo tanto, se propone el diseño y la instalación de un sistema de captura y purificación de este gas para convertirse en un insumo para la empresa Industrial Pucalá, que reportará ingresos económicos como producto de su venta y contribución a la investigación de la contaminación ambiental a través de los Gases de Efecto Invernadero, generando de esta manera bonos de carbono que bien pueden ser comercializados.

### **3.2.2. Objetivos de la propuesta.**

Aplicar el sistema de recuperación de CO<sub>2</sub> de tecnología Haffman, en el área de fermentación de la planta alcoholera Industrial Pucalá

Plantear la comercialización del CO<sub>2</sub> purificado como subproducto de la empresa, y para uso en la industria de bebidas carbonatadas debido a su alta pureza.

Mitigar la contaminación ambiental reflejada en los gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Realizar una evaluación económica de la aplicación de la propuesta y mostrar su rentabilidad para la empresa Industrial Pucala SAC.

### **3.2.3. Tecnología propuesta para recuperación y purificación de CO<sub>2</sub>**

La presente propuesta consiste en aplicar el Sistema de recuperación y purificación de CO<sub>2</sub> con Tecnología Haffman, que comprende equipos industriales que permitan el lavado, secado, purificación y compresión del CO<sub>2</sub> para su disponibilidad como insumo en otras industrias, principalmente para la industria de bebidas carbonatadas.

Esta tecnología de recuperación de CO<sub>2</sub> está conformada por los siguientes equipos: separador de espuma, tanque de balón presurizado, scrubber o lavador de gas, compresor, filtros carbón activado, secador y tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

#### **Capacidad del sistema de CO<sub>2</sub> requerida**

La planta de producción de alcohol rectificado de la empresa Alcoholera Pucalá produce 6446.2 T/año de CO<sub>2</sub>, lo que equivale a 806 kg/hr. Por esta razón se solicitó cotizaciones de plantas con capacidad de 1000 Kg/hr de capacidad que es ligeramente mayor a lo necesario, como estrategia de proyección a pesar que se estima que la producción se mantendrá constante en los siguientes 5 años.

Para solicitar cotizaciones se diseñaron cada uno de los equipos necesarios con el propósito de conocer la capacidad y característica de cada equipo y compararlo con las cotizaciones que se reciban.

#### **Separador de espuma.**

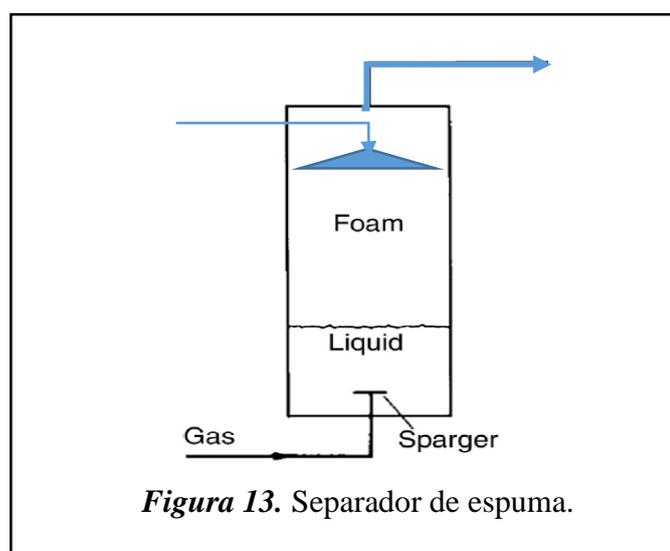
El objetivo principal de esta primera etapa es la eliminación de espuma con partículas sólidas y levaduras que puedan ser arrastradas. El CO<sub>2</sub> gaseoso que se produce durante el proceso de fermentación alcohólica en tanques de fermentación suelen arrastrar levaduras que se

fijan en la superficie de las burbujas de gas carbónico y son arrastrados en forma de espuma.

La planta de la recuperación del CO<sub>2</sub> toma el gas que viene del proceso de la fermentación y lo hace pasar primero a través de una trampa de espuma del CO<sub>2</sub> del acero inoxidable para realizar una separación previa de espuma que pudo haber sido arrastrada con el gas.

El separador de espuma consiste de un recipiente cilíndrico vertical que contiene en 1/3 de su volumen una solución de antiespumante. El gas carbónico que sale por el tope de los fermentadores es conducido a través de un conducto hacia el separador de espuma y es ingresado por la parte inferior con el propósito de retener la espuma que haya podido ser arrastrada en la solución de antiespumante. El CO<sub>2</sub> se libera libre de espuma por la parte superior del separador.

El tanque de separación de espuma (Wang & Sinkey, 1970) es de tipo cilíndrico vertical de acero inoxidable 304. El tanque dispone de agua con antiespumante que ocupa la tercera parte del volumen del tanque. El gas ingresa por la parte inferior del tanque a través de un aspersor, burbujea en la solución acuosa y asciende para salir por la parte superior. El tanque dispone de una campana en la parte superior ante de la salida del gas para atrapar las partículas de espuma que puedan aun escapar con el CO<sub>2</sub>



**Figura 13.** Separador de espuma.

Para calcular dimensión típica, la dimensión del separador de espuma se considera primero que  $h = 3D$  luego en la siguiente formula se reemplaza.

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * h$$

Dónde: V = volumen, D = diámetro, H = altura

Donde el volumen del tanque es de  $0.06m^3$ ,  $\pi$  es 3.1416 y la altura es tres veces el diámetro

$$0.06 m^3 = \frac{3.1416 * D^2}{4} * 3D$$

$$\frac{0.06 m^3 * 4}{3.1416 * 3} = D^3$$

$$D = 30 cm$$

**Tabla 7**

*Especificaciones del separador de espuma*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Forma	Cilíndrico vertical
Diámetro	0.3 m
Altura	0.90 m
Materiales construcción	Acero 304
Espesor del cilindro	1/8"
Acoplamiento para entrada de CO2	2"
Acoplamiento para salida de CO2	2"
Acoplamiento Entrada de agua-antiespumante	1"
Acoplamiento Descarga de agua-antiespumante	1"
Presión de operación	14.7 psi
Presión de diseño	29.4 psi
Temperatura de operación	80°F
Temperatura de diseño	130°F

Fuente: Elaborado por los autores

Entonces el resultado del diámetro del separador de espuma es de 30 cm, por lo tanto, la altura es igual a 90 cm ( $h = 3D$ )

También se calculó el espesor de la pared del separador de espuma, para ello se tiene presente que el separador operará en condiciones atmosférica y estará fabricado de acero inoxidable 304.

Para este cálculo se necesita primero calcular la presión de operación y de diseño (separador de espuma), teniendo como dato la presión atmosférica de 1 atm y convertida a psi es de 14.7 psi. La presión del diseño es igual al 20% de la presión de operación. De acuerdo a las normas internacionales ASME, las condiciones de operación serían:

$$P_{operación} = 1 \text{ atm} * 14.7 = 14.7 \text{ psi}$$

$$P_{diseño} = 1.2 \times P_{oper} = 1.2 \times (14.7) = 29.4 \text{ psi}$$

Teniendo ya las presiones se calcula también la temperatura de diseño:

$$T = \text{Temperatura de diseño} = T_{op} + 50^\circ\text{F} = 80 + 50 = 130^\circ\text{F}.$$

Para calcular el grosor del separador de espuma se contará con el diámetro (D) que es 0.8m, el radio (R) que es 0.4, la altura (H) que es 1.6m y el esfuerzo máximo permisible (S) que es 18700. Este dato se calculó con ayuda de la figura 18.4 b de Chemical Process Equipment Selection and Desing (Stanley & Walas)

(b) High Alloy Steels

A.S.M.E. Specification No.	Grade	Nominal composition	Specified minimum tensile strength	For temperatures not exceeding °F.											
				-20 to 100	200	400	700	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	
SA-240	304	18 Cr-8 Ni	75,000	18,700	15,600	12,900	11,000	10,100	9,700	8,800	6,000	3,700	2,300	1,400	
SA-240	304L†	18 Cr-8 Ni	70,000	15,600	13,300	10,000	9,300								
SA-240	310s	25 Cr-20 Ni	75,000	18,700	16,900	14,900	12,700	11,600	9,800	5,000	2,500	700	300	200	
SA-240	316	16 Cr-12 Ni-2 Mo	75,000	18,700	16,100	13,300	11,300	10,800	10,600	10,300	7,400	4,100	2,200	1,700	
SA-240	410	13 Cr	65,000	16,200	15,400	14,400	13,100	10,400	6,400	2,900	1,000				

(ASME Publications).

**Figura 14.** Tabla de aceros de alta aleación.

Para hallar las pulgadas de grosor que debe de tener el tanque se tomó como referencia la fórmula para el diseño de recipientes bajo presión interna del libro Chemical Process Equipment Selection and Design (Stanley & Walas) que dispone de ecuaciones para calcular el espesor de las paredes, del cabezal, la presión internas de diferentes tipos de recipientes, tanto para presión atmosférica como para presiones mayores a 1 atmósfera, con diferentes tipos de cabezales.

**TABLE 18.3. Formulas for Design of Vessels under Internal Pressure\***

Item	Thickness t(in.)	Pressure P(psi)	Stress S(psi)	Notes
Cylindrical shell	$\frac{PR}{SE - 0.6P}$	$\frac{SEt}{R + 0.6t}$	$\frac{P(R + 0.6t)}{t}$	$t \leq 0.250, P \leq 0.385SE$
Flat flanged head (a)	$D\sqrt{0.3P/S}$	$t^2 S / 0.3D^2$	$0.3D^2 P / t^2$	
Torispherical head (b)	$\frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$\frac{SEt}{0.885L + 0.12t}$	$\frac{P(0.885L + 0.12t)}{t}$	$r/L = 0.06, L \leq D + 2t$
Torispherical head (b)	$\frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	$\frac{P(LM + 0.2t)}{2t}$	$M = \frac{3 + (L/r)^{1/2}}{4}$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{D + 0.2t}$	$\frac{P(D + 0.2t)}{2t}$	$h/D = 4$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PRK}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{DK + 0.2t}$	$\frac{P(DK + 0.2t)}{2Et}$	$K = [2 + (D/2h)^2]/6, 2 \leq D/h \leq 6$
Hemispherical head (d) or shell	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{R + 0.2t}$	$\frac{P(R + 0.2t)}{2t}$	$t \leq 0.178D, P \leq 0.685SE$
Toriconical head (e)	$\frac{PR}{2(SE - 0.6P) \cos \alpha}$	$\frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha}$	$\frac{P(D + 1.2t \cos \alpha)}{2t \cos \alpha}$	$\alpha \leq 30^\circ$

**Figura 15.** Tabla de fórmulas para el diseño de recipientes bajo presión interna.  
Fuente: Walas, 2010

En este caso la forma del separador de espuma es cilíndrico es así que se tomará la siguiente fórmula.

$$e = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} + C$$

Donde P = presión, R = radio, S = esfuerzo máximo permisible, E = eficiencia

$$e = \frac{29.4 \frac{lb}{pulg^2} * 5.9 pulg}{18700 * 0.8 - 0.6 * 29.4 \frac{lb}{pulg^2}} + \frac{1}{16} pulg$$

$$e = 0.064 pul = 1/8 pulg \text{ (espesor nominal)}$$

Entonces el grosor del separador de espuma tendrá un espesor de 1/8 pulg.

### **Tanque de presurización o balón gasométrico.**

Es un sistema de ventilación a presión que ayuda a proporcionar presión al sistema de transporte del gas. El objetivo del balón de amortiguación de gas CO<sub>2</sub>, que está hecho de caucho especial, es proporcionar la alimentación continua necesaria para que el compresor de CO<sub>2</sub> funcione a una presión de succión positiva. Esto evita la formación de un vacío y la posibilidad de ingesta de aire. Este tanque permite que la presión de fermentación permanezca constante a la presión deseada y que va hacia el absorbedor. (Figura 16).



**Figura 16.** Soplador a presión o balón presurizado

**Tabla 8**  
*Hoja de especificaciones del Tanque de Presurizado*

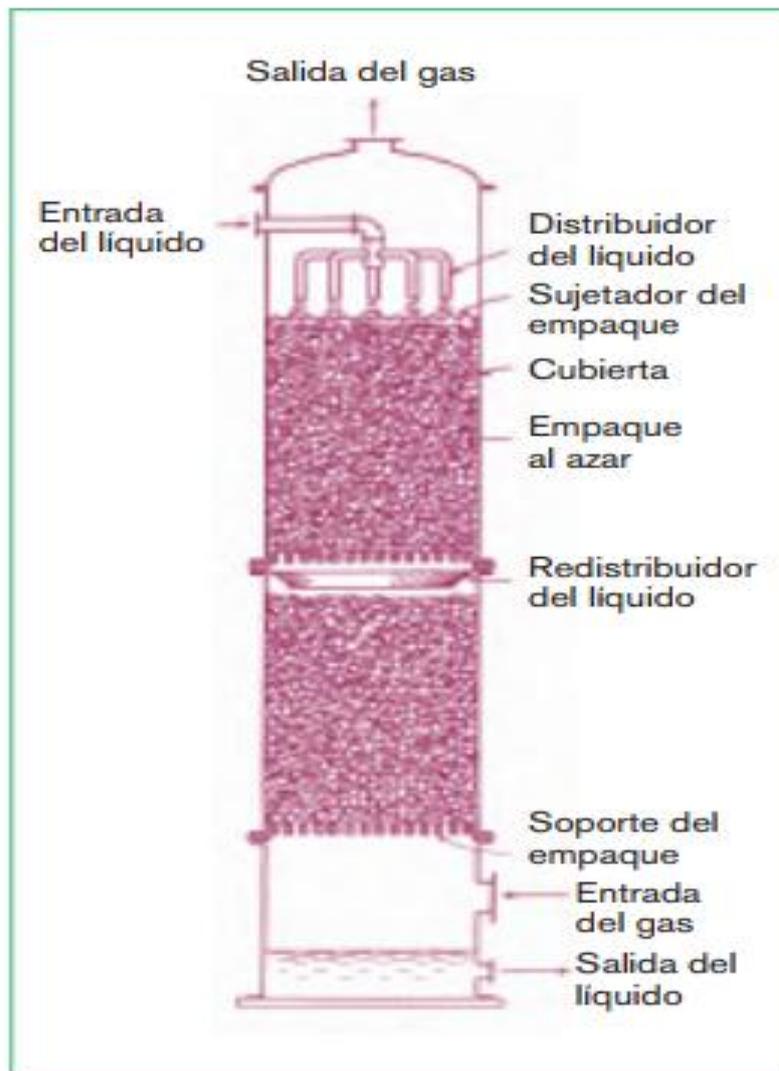
<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Presurizado	Aquapak PRES-APSX-24L
Forma	Cilíndrico-horizontal
Dimensiones	1.60 x 2.40 m
Motor de compresión	2½ HP. 115V.
Capacidad	240L
Material de construcción	Acero inoxidable 304
Espesor del material de construcción	1/8 pulg
Presión de operación, bar	1.0
Presión de diseño, bar	1.2
Temperatura de operación, °C	25
Temperatura de diseño, °C	25

### **Scrubber o lavador de gas.**

Es un equipo de separación y lavado tipo torre cilíndrico vertical de acero inoxidable 304. Dispone de accesorios internos denominados relleno y que consiste en anillos rashing dispuestos al azar para lograr un buen contacto entre el líquido y el gas. El gas ingresa por la parte inferior del equipo y asciende mientras que una corriente de agua ingresa por la parte superior de la torre y cae en contracorriente. En la etapa de relleno se lleva a cabo el contacto liquido-gas, donde el agua disuelve las partículas de etanol y levaduras que pudieron ser arrastradas por el gas, y las arrastra al fondo de la torre dejando al CO<sub>2</sub> libre de impurezas. El agua que ingresa por el tope de la torre se distribuye a través de rociadores que a manera de ducha dejan caer el agua en forma de lluvia.

El scrubber será construido de acero inoxidable 304 con espesor de 1/8" en las paredes del cilindro, en el cabezal y en el fondo. Dispondrá de cuatro acoplamientos, el primero es de 1" ubicado en la parte superior lateral de la torre para la entrada del agua, y otro en la parte inferior lateral para la salida del agua con residuos de etanol, O<sub>2</sub> y levaduras que fueron arrastrados por el CO<sub>2</sub>, también de 1" de diámetro. Para el CO<sub>2</sub> que viene del separador de espuma el ingreso es con

un acoplamiento de 2" ubicado en la parte inferior ligeramente por encima del acoplamiento del agua de descarga, y la salida es un acoplamiento de 2" ubicado por la parte superior de la torre, como se observa en la figura 13.



**Figura 17.** Scrubber o lavador de gases.

Fuente: Elaborado por los autores.

**Tabla 9**  
*Especificaciones del scrubber.*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Forma	Cilíndrico vertical
Diámetro	0.5 m
Altura	3m
Relleno	Intallox Saddles
HETP	0.660 m
Materiales de la columna	Acero 304
Materiales de los rellenos	Ceramica
Acoplamiento para entrada de CO2	2"
Acoplamiento para salida de CO2	2"
Acoplamiento para Entrada de agua	1"
Acoplamiento para salida de agua	1"
Manhole para mantenimiento interno	50"

Para calcular el diámetro de la columna del scrubber se tiene que tener en consideración las cantidades de flujo que se encuentran en la parte superior o el fondo del tanque ya que es ahí donde el flujo es el más grande, para eso se calcula primero el flujo del gas el cual será calculado en kg/s y  $m^3/s$ . teniendo como dato adicional el peso molecular del CO2 que es de 44kg/kmol.

Si el flujo del gas esta dado en kg/s:

Primero se calcula la entrada del gas donde se hace una división entre la velocidad de flujo del CO2 en  $m^3/s$  que es igual 0.2737 y el peso molecular promedio en kg/kmol que es igual a 44, siendo el resultado de 0.00622 kmol/s.

Calculado la entrada del gas en kmol/s se hace una conversión para convertirla a  $m^3/s$  donde:

$$0.00622 \frac{kmol}{s} * \frac{303^\circ Kelvin}{273} * \frac{1.0 atm}{1 atm} * \frac{22.4}{1} = 0.1546 \text{ kg/s}$$

Si el flujo del gas esta dado en  $m^3/s$ :

Primero se calcula la entrada del gas donde se hace una división entre la velocidad de flujo del CO2 en kg/s que es igual  $148.6 m^3/s$  y el peso molecular promedio en kg/kmol que es igual a 44, siendo el resultado de  $3.3772 m^3/s$ .

Calculado la entrada del gas en  $m^3/s$  se hace una conversión para convertirla a kg/s donde:

$$0.00622 \frac{\text{kmol}}{\text{s}} * \frac{T, \text{Kelvin}}{273} * \frac{1.0 \text{ atm}}{P, \text{atm}} * \frac{22.4}{1} = 0.1546 m^3/s$$

También se calcula el flujo volumétrico y el flujo másico el cual sirven para ver el fluido que pasa por la columna en un determinado tiempo y la variación de masa con respecto al tiempo en un área específica (columna).

El flujo másico es igual a la velocidad del flujo del CO2 en kg/s y el flujo volumétrico es igual a la velocidad del flujo del CO2 en  $m^3/s$ , siendo respectivamente  $0.2737 \text{kg/s}$  y  $148.6 m^3/s$ . se considera también el flujo molar seleccionado que es igual a la producción de CO2 crudo  $0.00572 \text{ kmol/s}$  y también la densidad del CO2 que es igual  $1.842 \text{kg/m}^3$ .

Para hallar las pulgadas de grosor que debe de tener el scrubber se tomó como fuente la fórmula para el diseño de recipientes bajo presión interna del libro Chemical Process Equipment Selection and Desing (Stanley & Walas).

TABLE 18.3. Formulas for Design of Vessels under Internal Pressure'

Item	Thickness $t$ (in.)	Pressure $P$ (psi)	Stress $S$ (psi)	Notes
Cylindrical shell	$\frac{PR}{SE - 0.6P}$	$\frac{SEt}{R + 0.6t}$	$\frac{P(R + 0.6t)}{t}$	$t \leq 0.250, P \leq 0.385SE$
Flat flanged head (a)	$D\sqrt{0.3P/S}$	$t^2 S / 0.3D^2$	$0.3D^2 P / t^2$	
Torispherical head (b)	$\frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$\frac{SEt}{0.885L + 0.12t}$	$\frac{P(0.885L + 0.1t)}{t}$	$r/L = 0.06, L \leq D + 2t$
Torispherical head (b)	$\frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	$\frac{P(LM + 0.2t)}{2t}$	$M = \frac{3 + (L/r)^{1/2}}{4}$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{R + 0.2t}$	$\frac{P(D + 0.2t)}{2t}$	$h/D = 4$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PRK}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{DK + 0.2t}$	$\frac{P(DK + 0.2t)}{2t}$	$K = [2 + (D/2h)^2]^{1/2}, 2 \leq D/h \leq 6$
Hemispherical head (d) or shell	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{R + 0.2t}$	$\frac{P(R + 0.2t)}{2t}$	$t \leq 0.178D, P \leq 0.685SE$
Toriconical head (e)	$\frac{PR}{2(SE - 0.6P) \cos \alpha}$	$\frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha}$	$\frac{P(D + 1.2t \cos \alpha)}{2t \cos \alpha}$	$\alpha \leq 30^\circ$

Figura 18. Tabla de fórmulas para el diseño de recipientes bajo presión interna

En este caso la forma del scrubber es cilíndrico es así que se tomara la siguiente fórmula

$$e = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} + C$$

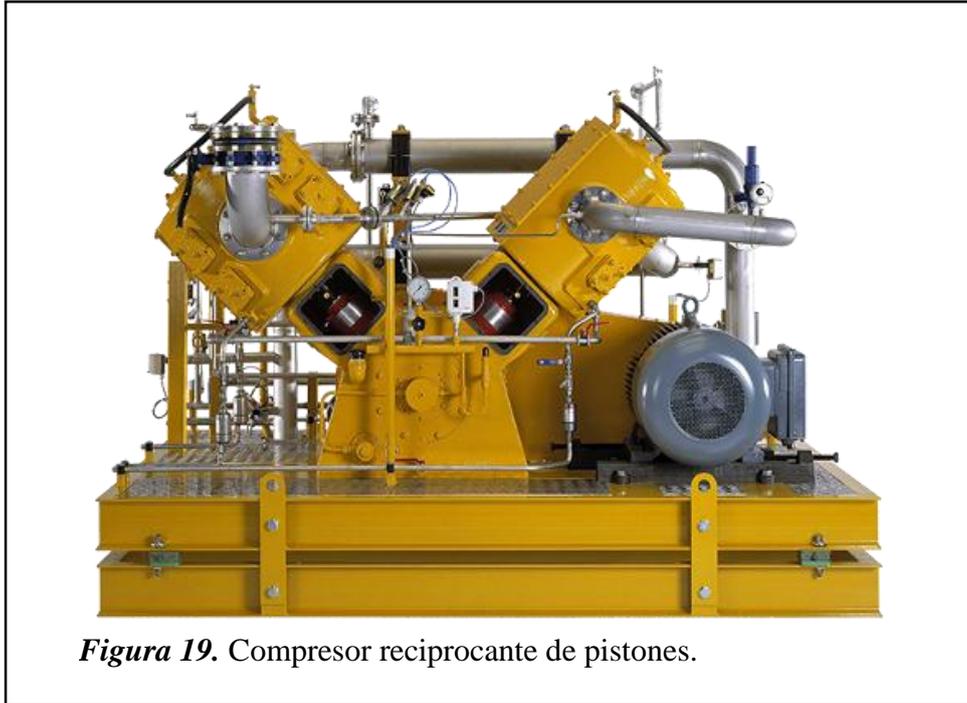
Donde P = presión, R = radio, S = esfuerzo máximo permisible, E = eficiencia conjunta

$$e = \frac{29.4 \frac{lb}{pulg^2} * 9.84 pulg}{18700 * 0.8 - 0.6 * 29.4 \frac{lb}{pulg^2}} + \frac{1}{16} pulg$$

$$e = 2.69 pulg = \frac{11}{4} pulg$$

### **Compresor.**

El compresor es de tipo recíprocante de dos (2) etapas, con diseño vertical que ahorra espacio, funcionamiento muy suave, costos mínimos de ciclo de vida, diseñado específicamente para uso en CO<sub>2</sub> aplicaciones donde el más mínimo lubricante de petróleo no puede ser tolerado. El gas limpio que viene de la torre de lavado llega a un compresor y se comprime hasta 16 veces su presión original, suficiente para atravesar los filtros de secado y carbón activado que continúan el proceso hasta llegar al tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub> comprimido.



**Figura 19.** Compresor reciprocante de pistones.

**Tabla 10**

*Especificaciones del compresor. (Según proveedor)*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Modelo	GD
Tipo	Reciprocante de dos cilindros- piston
Capacidad	10 Nm <sup>3</sup> /h
Presión de entrada	1.0 bar
Presión máxima de salida	150 bar
Potencia del motor	4 kw
Intercooler	SS-316 L
Dimensión (L * W * H )	1330 * 720 * 1000 mm

**Filtro de carbón activado.**

Es un tanque cilíndrico vertical que contiene 4/3 de su volumen de carbón activado. Este equipo tiene como función adsorber cualquier residuo de olor o color que esté presente en el gas dejándolo hasta una pureza del 99.99 %



**Figura 20.** Filtro de carbón activo.

Para calcular dimensión típica, la dimensión del filtro de carbón activado se considera primero que  $h = 3D$  luego en la siguiente fórmula se reemplaza.

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * h$$

Dónde: V = volumen, D = diámetro, H = altura

Donde el volumen del tanque es de  $0.06\text{m}^3$ ,  $\pi$  es 3.1416 y la altura es tres veces el diámetro

$$0.06\text{ m}^3 = \frac{3.1416 * D^2}{4} * 3D$$

$$\frac{0.06\text{ m}^3 * 4}{3.1416 * 3} = D^3$$

$$D = 0.29 = 30\text{ cm} \quad h = 90\text{ cm}$$

Para calcular las pulgadas de grosor que debe de tener el filtro de carbón activo tomaremos como fuente la fórmula para el diseño de recipientes bajo presión interna del libro Chemical Process Equipment Selection and Desing (Stanley & Walas).

En este caso la forma del filtro de carbón activo es cilíndrico es así que se tomará la siguiente fórmula.

$$e = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} + C$$

Donde P = presión, R = radio, S = esfuerzo máximo permisible, E = eficiencia conjunta

$$e = \frac{29.4 \frac{lb}{pulg^2} * 5.90 \text{ pulg}}{18700 * 0.8 - 0.6 * 29.4 \frac{lb}{pulg^2}} + \frac{1}{16} \text{ pulg}$$

$$e = 0.064 \text{ pulg} = \frac{1}{8} \text{ pulg (Espesor nominal)}$$

Entonces el grosor del filtro de carbón tendrá un espesor de 1/8 pulg.

**Tabla 11**  
*Especificaciones del filtro de carbón activo.*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Forma	Columna cilíndrico vertical
Uso	Desodoriza y decolora el CO2
Material	Acero inoxidable 304
Diámetro	300 mm
Altura	900 mm
Espesor	1/8 pulg.
Presión de operación	14.7 Psi
Presión de diseño	20 Psi
Relleno	Carbón activado

TABLE 18.3. Formulas for Design of Vessels under Internal Pressure'

Item	Thickness t(in.)	Pressure P(psi)	Stress S(psi)	Notes
Cylindrical shell	$\frac{PR}{SE - 0.6P}$	$\frac{SEt}{R + 0.6t}$	$\frac{P(R + 0.6t)}{t}$	$t \leq 0.250, P \leq 0.385SE$
Flat flanged head (a)	$D\sqrt{0.3P/S}$	$t^2 S/0.3D^2$	$0.3D^2 P/t^2$	
Torispherical head (b)	$\frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$\frac{SEt}{0.885L + 0.12t}$	$\frac{P(0.885L + 0.12t)}{t}$	$r/L = 0.06, L \leq D + 2t$
Torispherical head (b)	$\frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	$\frac{P(LM + 0.2t)}{2t}$	$M = \frac{3 + (L/r)^{1/2}}{4}$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{K + 0.2t}$	$\frac{P(D + 0.2t)}{2t}$	$h/D = 4$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PRK}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{DK + 0.2t}$	$\frac{P(DK + 0.2t)}{2t}$	$K = [2 + (D/2h)^2]/6, 2 \leq D/h \leq 6$
Hemispherical head (d) or shell	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{K + 0.2t}$	$\frac{P(R + 0.2t)}{2t}$	$t \leq 0.178D, P \leq 0.685SE$
Toriconical head (e)	$\frac{PR}{2[SE - 0.6P] \cos \alpha}$	$\frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha}$	$\frac{P(D + 1.2t \cos \alpha)}{2t \cos \alpha}$	$\alpha \leq 30^\circ$

Figura 21. Tabla de fórmulas para el diseño de recipientes bajo presión interna.

## Secador

Es un tanque cilíndrico vertical que contiene 2/3 de su volumen de sílica con el propósito de retener las partes de millón por unidad de agua en forma de humedad que pudiera estar presente en el gas carbónico.

La torre de secado es una columna rellena que contiene adsorbentes selectivos higroscópicas que retienen la humedad del CO2 secándolo totalmente. Este equipo es de forma cilíndrica vertical. Se dispone de dos equipos que operan en paralelo. Cada uno de ellos alterna en stand-by. Cuando se satura de humedad, este debe regenerarse. Mientras se regenera un equipo, el otro entra en operación. La regeneración de la sílice se realiza pasando aire caliente a través del lecho de sílica gel.

El CO2 que sale de estos equipos de filtración y secado tienen un grado de pureza que alcanzará los 99.998%, siendo esta calidad apta para ser utilizada en productos alimenticios que requieren de CO2, como son las bebidas carbonatadas.



**Figura 22.** Secador.

**Tabla 12**  
*Especificaciones del secador.*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Forma	Columna cilíndrico vertical
Uso	Secador del CO <sub>2</sub>
Material	Acero inoxidable 304
Diámetro	300 mm
Altura	900 mm
Espesor	1/8 pulg
Presión de operación	14.7 Psi
Presión de diseño	20 Psi
Relleno	Silica gel

Para calcular dimensión típica, la dimensión del secador se considera primero que  $h = 3D$  luego en la siguiente fórmula se reemplaza.

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * h$$

Dónde: V = volumen, D = diámetro, H = altura

Donde el volumen del tanque es de  $0.06 m^3$ ,  $\pi$  es 3.1416 y la altura es tres veces el diámetro

$$0.06 m^3 = \frac{3.1416 * D^2}{4} * 3D$$

$$\frac{0.06 m^3 * 4}{3.1416 * 3} = D^3$$

$$D = 0.29 = 30 \text{ cm} \quad h = 90 \text{ cm}$$

Para calcular las pulgadas de grosor que debe de tener el secador tomaremos como fuente la fórmula para el diseño de recipientes bajo presión interna del libro Chemical Process Equipment Selection and Sizing (Stanley & Walas)

**TABLE 18.3. Formulas for Design of Vessels under Internal Pressure'**

Item	Thickness t(in.)	Pressure P(psi)	Stress S(psi)	Notes
Cylindrical shell	$\frac{PR}{SE - 0.6P}$	$\frac{SEt}{R + 0.6t}$	$\frac{P(R + 0.6t)}{t}$	$t \leq 0.250, P \leq 0.385SE$
Flat flanged head (a)	$D\sqrt{0.3P/S}$	$t^2 S / 0.3D^2$	$0.3D^2 P / t^2$	
Torispherical head (b)	$\frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$\frac{SEt}{0.885L + 0.12t}$	$\frac{P(0.885L + 0.1t)}{t}$	$r/L = 0.06, L \leq D + 2t$
Torispherical head (b)	$\frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	$\frac{P(LM + 0.2t)}{2t}$	$M = \frac{3 + (L/r)^{1/2}}{4}$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{R + 0.2t}$	$\frac{P(D + 0.2t)}{2t}$	$h/D = 4$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PRK}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{DK + 0.2t}$	$\frac{P(DK + 0.2t)}{2t}$	$K = [2 + (D/2h)^2]^{1/2}, 2 \leq D/h \leq 6$
Hemispherical head (d) or shell	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{R + 0.2t}$	$\frac{P(R + 0.2t)}{2t}$	$t \leq 0.178D, P \leq 0.685SE$
Toriconical head (e)	$\frac{PR}{2(2SE - 0.6P) \cos \alpha}$	$\frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha}$	$\frac{P(D + 1.2t \cos \alpha)}{2t \cos \alpha}$	$\alpha \leq 30^\circ$

**Figura 23.** Tabla de fórmulas para el diseño de recipientes bajo presión interna.

En este caso la forma del secador es cilíndrico es así que se tomará la siguiente fórmula

$$e = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} + C$$

Donde P = presión, R = radio, S = esfuerzo máximo permisible, E = eficiencia conjunta

$$e = \frac{29.4 \frac{lb}{pulg^2} * 5.90 \text{ pulg}}{18700 * 0.8 - 0.6 * 29.4 \frac{lb}{pulg^2}} + \frac{1}{16} \text{ pulg}$$

$$e = 0.064 \text{ pulg} = \frac{1}{8} \text{ pulg (Espesor nominal)}$$

Entonces el grosor del filtro de carbón tendrá un espesor de 1/8 pulg.

### Tanque de almacenamiento de CO2.

Es un tanque cilíndrico horizontal dispuesto para almacenar el CO2 a presión y para distribución.



**Figura 24.** Tanque de almacenamiento de CO2 comprimido.

**Tabla 13**  
*Especificaciones del tanque de almacenamiento.*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Forma	Tanque Cilíndrico horizontal
Diámetro	3600 mm
Longitud	8900 mm
Volumen	30 m <sup>3</sup>
Material	Acero inoxidable 316
Temperatura de diseño	40°C
Presión de operación	20 bar
Presión de diseño	24 bar
Espesor	2 Pulg
Instrumentación	Manómetro dial, 0 – 30 bar

Para calcular las dimensiones del tanque de almacenamiento del CO<sub>2</sub> tendremos que tener en cuenta la forma del tanque la cual será cilíndrico horizontal la cual tendrá un cabezal elipsoidal.

Para el cálculo de esta misma necesitaremos primero la presión de operación y la presión de diseño, utilizando una presión de 200 Psi y para la presión de diseño se calcula con el 20% de la presión de operación.

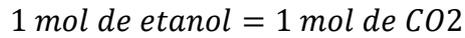
$$P_{Operación} = 20 \text{ bar}$$

$$P_{Diseño} = 1.2 * P_{Oper} = 24 \text{ bar}$$

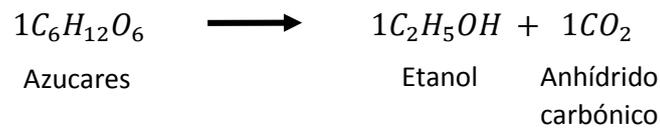
Ya contando con el cálculo de la presión ahora tenemos que tener el volumen del tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub> comprimido el cual se está diseñando para un almacenamiento de 3 días y para este cálculo necesitaremos la producción de etanol por hora, para esto se hace una pequeña conversión ya que se cuenta con la producción de etanol por día de 30000 l/día y este es igual a 1250 l/hr.

$$30000 \frac{l}{día} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hr}} = 1250 \frac{l}{hr}$$

Contando ya con la producción de etanol podremos calcular la producción de CO2 en la misma unidad de medida que la del etanol para esto lo realizaremos por estequiometria donde:



Y por pesos moleculares del proceso de fermentación del azúcar podremos decir que, por cada 46 kg de etanol producido, se produce 44 kg de CO2.



$$1 \text{ mol de } 1C_2H_5OH = 24 + 5 + 16 + 1 = 46 \text{ kg}$$

$$1 \text{ mol de } CO_2 = 12 + 32 = 44 \text{ kg}$$

Teniendo ya la cantidad de etanol y CO2 en la unidad de medida de kg, se calculará el volumen del etanol y CO2 y para eso contaremos con la densidad del etanol que es 0.789 kg/l y la densidad del CO2 es 0.001842 kg/l.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$v = \frac{46 \text{ kg}}{0.789 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 58.30 \text{ litros de etanol}$$

$$v = \frac{44 \text{ kg}}{0.001842 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 23887.08 \text{ litros de CO}_2$$

Entonces se calcula la producción de CO2 en litro/hora que se emiten de los fermentadores para este cálculo necesitaremos la producción de etanol en litros/hora, el CO2 en litros y el etanol en litros.

$$\frac{1250 \frac{\text{l}}{\text{hr}} * 23887 \text{ l}}{58.30 \text{ l}} = 512144.2 \frac{\text{l}}{\text{hr}} = 22640.87 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Esta masa equivale en metros cúbicos, a  $514,64m^3$ .

Por la ley de termodinámica  $P_1 * V_1 = P_2 * V_2$  se calculará el volumen donde:

$$V = 14.7 \text{ Psi} * 514.6 \text{ m}^3 / 352.8 \text{ Psi}$$

$V = 21.5 \text{ m}^3$ , para efecto de proyección a futuro, estimamos  $30m^3$ .

Teniendo ya todos los datos podremos calcular las dimensiones para el tanque de almacenamiento de CO2 que será horizontal, para esto tendremos como dato que la  $L = 2.5 D$  (según recomendaciones Haffmans).

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

$$30 \text{ m}^3 = \frac{3.14 * 2.5 * D^3}{4}$$

$$D = 2.5m$$

Entonces decimos que el diámetro del tanque de almacenamiento es de 2.5m por lo tanto la longitud es de 6.25m. La temperatura de operación será de  $30^\circ\text{C}$ , por lo que la temperatura de diseño será de  $40^\circ\text{C}$ , según la norma ASME, y el esfuerzo máximo permisible (S) será de 13584. Este dato lo calculamos por medio de la figura 18.4 (b) del libro Chemical Process Equipment (Stanley & Walas)

(b) High Alloy Steels

A.S.M.E. Specification No.	Grade	Nominal composition	Specified minimum tensile strength	For temperatures not exceeding °F.											
				-20 to 100	200	400	700	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	
SA-240	304	18 Cr-8 Ni	75,000	18,700	15,600	12,900	11,000	10,100	9,700	8,800	6,000	3,700	2,300	1,400	
SA-240	304L	18 Cr-8 Ni	70,000	15,600	13,300	10,000	9,300								
SA-240	310s	25 Cr-20 Ni	75,000	18,700	16,900	14,900	12,700	11,600	9,800	5,000	2,500	700	300	200	
SA-240	316	16 Cr-12 Ni-2 Mo	75,000	18,700	16,100	13,300	11,300	10,800	10,600	10,300	7,400	4,100	2,200	1,700	
SA-240	410	13 Cr	65,000	16,200	15,400	14,400	13,100	10,400	6,400	2,900	1,000				

(ASME Publications).

**Figura 25.** Tabla de aceros de alta aleación.

Contando ya con todos los datos se podrá calcular las pulgadas de grosor que debe de tener el tanque de almacenamiento, para esto tomaremos como fuente la fórmula para el diseño de recipientes bajo presión interna del libro Chemical Process Equipment Selection and Desing (Stanley & Walas)

Item	Thickness $t$ (in.)	Pressure $P$ (psi)	Stress $S$ (psi)	Notes
Cylindrical shell	$\frac{PR}{SE - 0.6P}$	$\frac{SEt}{R + 0.6t}$	$\frac{P(R + 0.6t)}{t}$	$t \leq 0.250, P \leq 0.385SE$
Flat flanged head (a)	$D\sqrt{0.3P/S}$	$t^2 S / 0.3D^2$	$0.3D^2 P / t^2$	
Torispherical head (b)	$\frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$\frac{SEt}{0.885L + 0.12t}$	$\frac{P(0.885L + 0.1t)}{t}$	$r/L = 0.06, L \leq D + 2t$
Torispherical head (b)	$\frac{P L M}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	$\frac{P(LM + 0.2t)}{2t}$	$M = \frac{3 + (L/r)^{1/2}}{4}$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{R + 0.2t}$	$\frac{P(D + 0.2t)}{2t}$	$h/D = 4$
Ellipsoidal head (c)	$\frac{PRK}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{DK + 0.2t}$	$\frac{P(DK + 0.2t)}{2t}$	$K = [2 + (D/2h)^2]^{1/2}, 2 \leq D/h \leq 6$
Hemispherical head (d) or shell	$\frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$\frac{2SEt}{R + 0.2t}$	$\frac{P(R + 0.2t)}{2t}$	$t \leq 0.178D, P \leq 0.685SE$
Toriconical head (e)	$\frac{PR}{2(SE - 0.6P) \cos \alpha}$	$\frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha}$	$\frac{P(D + 1.2t \cos \alpha)}{2t \cos \alpha}$	$\alpha \leq 30^\circ$

Figura 26. Tabla de fórmulas para el diseño de recipientes bajo presión interna.

En este caso la forma del tanque de almacenamiento es cilíndrico es así que se tomara la siguiente fórmula:

$$e = \frac{P * R}{S * E - 0.6 * P} + C$$

Donde P = presión, R = radio, S = esfuerzo máximo permisible, E = eficiencia conjunta

$$e = \frac{352.8 \frac{lb}{pulg^2} * 58.56 pulg}{13548 * 0.8 - 0.6 * 352.8 \frac{lb}{pulg^2}} + \frac{1}{16} pulg$$

$$e = 2.001 pulg = 2 pulg \text{ (Medida de uso comercial)}$$

## ACCESORIOS

**Tabla 14**

*Especificaciones de la tapa del fermentador.*

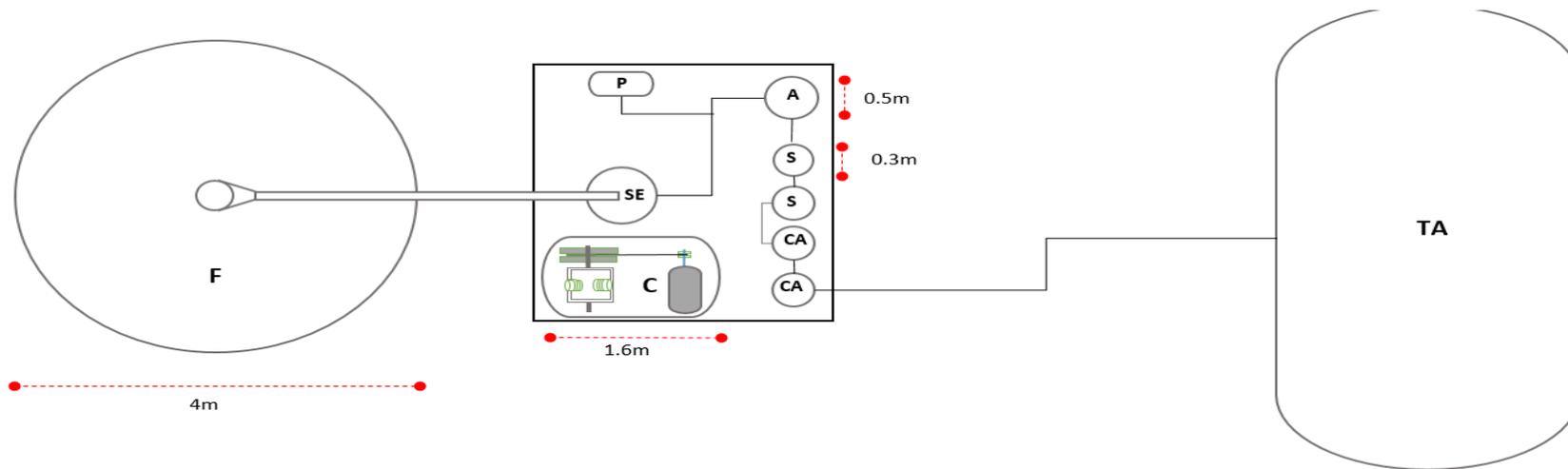
<b>TAPA DE FERMENTADOR</b>	
Material de construcción	Fierro negro
Espesor	¾ Pulg
Acoplamiento para la salida del CO2	2 Pulg

**Tabla 15**

*Especificaciones de tuberías.*

<b>TUBERIAS</b>		
	<b>Material</b>	<b>Diámetro (pulgada)</b>
Fermentador - separador de espuma	SS304	2"
Separador de espuma - lavado de gas	SS304	2"
Lavado de gas - compresor	SS304	2"
Compresor – filtros	SS304	2"
Filtros – tanque de almacenamiento	SS304	2"

## LAYOUT



### LEYENDA

F : Fermentador de la planta  
SE: Separador de espuma  
P : Presurizador  
A : Absorbedor  
S: Torre de secado  
CA: Torre de carbón activo  
C : Compresor  
TA: Tanque de almacenamiento de CO2

### LAYOUT DEL SISTEMA DE RECUPERACION Y PURIFICACION DE CO2

PROPUESTA DE DISEÑO DE SISTEMA DE RECUPERACION Y PURIFICACION DE CO2 DE LA PLANTA ALCOHOLERA PUCALA SAC - 2017

**Figura 27.** Distribución del sistema de recuperación del CO2.

Nota: La distribución de planta se hizo de acuerdo a las recomendaciones de PENTAIR Y HAFFMANS., que es una planta compacta que ocupa poco espacio y que facilita el control del proceso.

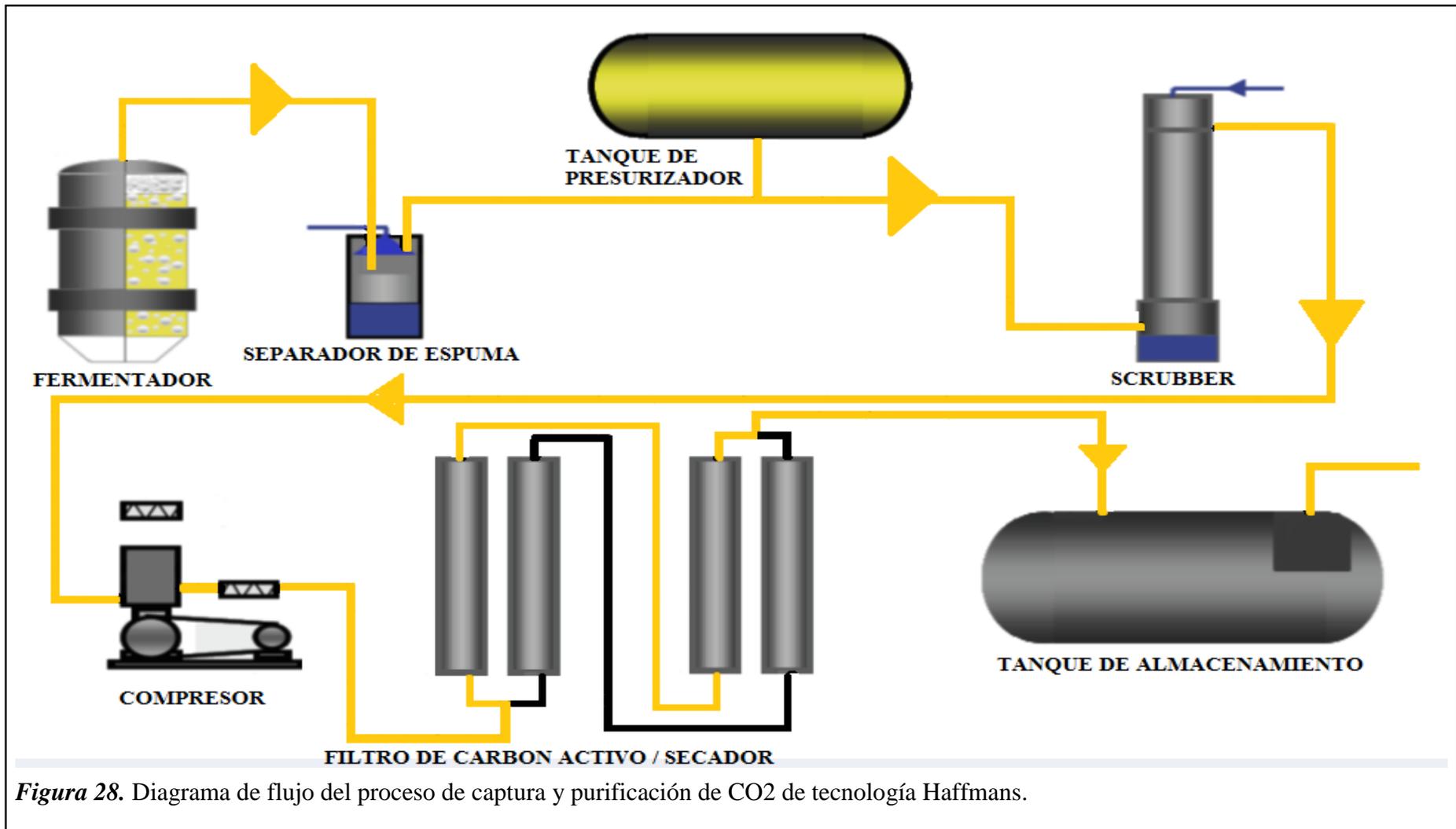
## **Proceso propuesto de tecnología haffman**

El sistema de recuperación de CO<sub>2</sub> inicia desde los fermentadores, como actualmente los fermentadores no cuentan con una cubierta, el proceso de recuperación comienza con la colocación de la cubierta a los fermentadores. El gas carbónico que sale por el tope de los fermentadores es conducido a través de una tubería hacia el separador de espuma e ingresado por la parte inferior con el propósito de retener la espuma que haya podido ser arrastrada en la solución de antiespumante. El CO<sub>2</sub> se libera libre de espuma por la parte superior del separador, luego el CO<sub>2</sub> es conducido al Scrubber. El gas es impulsado por la presión que ejerce el presurizador que se conecta en la tubería que lleva el CO<sub>2</sub> al scrubber (Absorbedor). El gas ingresa por la parte inferior del equipo y asciende mientras que una corriente de agua ingresa por la parte superior de la torre y cae en contracorriente. En la etapa de relleno se lleva a cabo el contacto líquido-gas, donde el agua disuelve las partículas de etanol y levaduras que pudieron ser arrastradas y las arrastra al fondo de la torre dejando limpio al CO<sub>2</sub>, El CO<sub>2</sub> limpio pasa a un compresor donde se comprime hasta 200 psi, y con esta presión pasa por un filtro de carbón activado y un secador de sílica gel, con el propósito de adsorber cualquier residuo de olor o color, y la humedad que aún pueden estar presente, dejándolo con una pureza de 99.998 %, y llegando finalmente a un tanque de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, listo para ser distribuido.

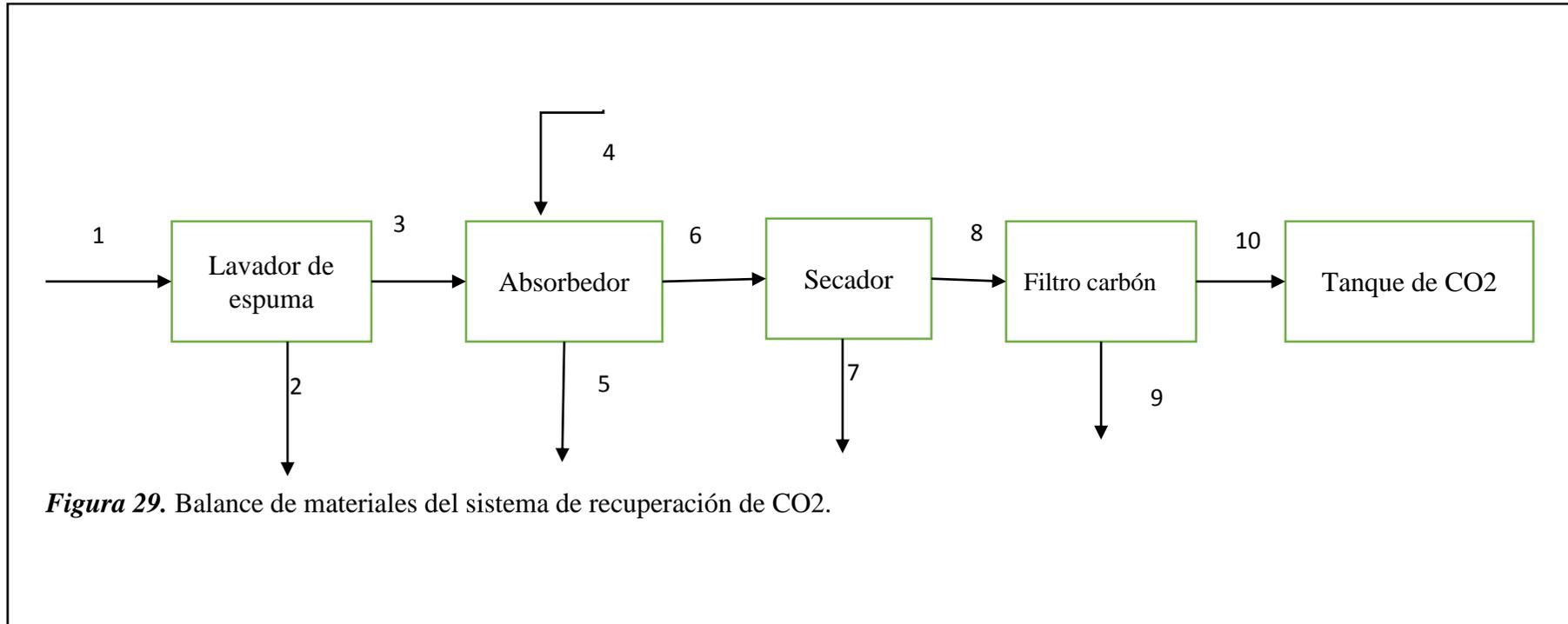
## **Balance de materia en el proceso de purificación de co2**

Con el propósito de conocer el flujo de entrada y salida en cada uno de los equipos de la planta de tecnología Haffman y tomando como base de cálculo la cantidad de CO<sub>2</sub> crudo que sale de los fermentadores e ingresa a la planta para su captura y purificación, se realizaron cálculos de balance de materiales con la ayuda de un diagrama de bloques del proceso para una mayor facilidad en el balance.

El diagrama de bloques tiene como base al diagrama de flujo del proceso Haffmans y se muestra en la figura 25.



*Figura 28.* Diagrama de flujo del proceso de captura y purificación de CO<sub>2</sub> de tecnología Haffmans.



*Figura 29.* Balance de materiales del sistema de recuperación de CO2.

**Tabla 16***Balance de materiales del proceso Haffmans para una producción de 805.78 kg/hr de CO2 purificado (\*)*

<b>CORRIENTES</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Presión, bar</b>	1	1.014	1.04	1.014	1.014	1.014	21	21	21	21
<b>Temperatura, °c</b>	25	25	25	25	25	25	25	25	25	30
<b>Composición, kg/día</b>										
<b>CO2</b>	805.6		805.6			805.6		805.6		805.6
<b>Espuma</b>	1.7	1.7	0			0		0		0
<b>Aire</b>	1.01		1.01		0.5	0.51	0.45	0.06	0.04	0.025
<b>Agua</b>	0		0	1600	1579	21	20.5	0.5	0.35	0.15
<b>Impurezas olor</b>	1.07		1.07		0.21	0.86	0	0.86	0.86	0
<b>TOTAL</b>	809.38	1.7	807.68	1600	1579.71	828.0	20.95	807.0	1.25	805.78

Fuente: Elaborado por los autores

(\*) La planta de tecnología Haffmans seleccionada es de 1000 kg/hr de capacidad.

BASE DE CÁLCULO: Ton/año de CO2: 6446.2

Horas/año operativas: 8000 hr/año

Base de cálculo: 805.78 Kg de CO2/hr

Pureza inicial: 99.970%

Pureza final: 99.99

## Otras alternativas de uso del CO<sub>2</sub>

El gas carbónico (CO<sub>2</sub>) puede ser utilizado de varias formas gracias a su baja densidad y a su propiedad inerte en soluciones acuosas. Uno de los mayores usos es como componente principal de las bebidas carbonatas que tienen alta demanda en todo el mundo. También puede ser convertido en otros productos de mayor utilidad, como por ejemplo su transformación a alcohol metílico, metano, etc. A continuación, se plantean alternativas de uso.

1. Consumo en bebidas carbonatadas con CO<sub>2</sub> al 99.998%.
2. Líquido de refrigeración
3. En la mezcla con argón (soldadura)
4. En la mezcla con el helio
5. Mezcla con hidrógeno para gas de síntesis

El sistema propuesto en el presente estudio permitirá obtener CO<sub>2</sub> purificado al 99.998% de pureza, que es apto para consumo en la industria de bebidas carbonatas, que es el principal uso al cual se destina este producto.

### 3.2.4 Mitigación de CO<sub>2</sub> en los gases de efecto invernadero con la propuesta.

Con la presente propuesta se mitigarán 6446.19 T de CO<sub>2</sub> por año, los cuales se destinarán al uso en la industria de bebidas carbonatadas, ya que actualmente se deja escapar al medio ambiente contribuyendo a aumentar los gases de efecto invernadero y por ende al calentamiento global y climático.

### Índice de huella de carbono

Producción de T CO<sub>2</sub>/año = 6446.19

### Huella de carbono

***Bonos de carbono por año ≈ 6446.19***

La empresa Industrial Pucalá tendrá también la oportunidad de comercializar bonos de carbono, lo cual le generaría ingresos económicos.

**% de emisión de CO2 de Pucalá en el Perú es de aproximadamente**

$$\frac{6446.19}{126240} * 100 = 5.11\% \text{ de emisiones a nivel nacional}$$

### **3.2.5 Evaluación Económica para instalar planta de recuperación y purificación del CO2 Haffmans en la Planta alcoholera Pucalá.**

La evaluación económica consta de 4 partes. La primera comprende el beneficio/costo para ver si el proyecto es rentable, la inversión total de la planta cotizada por el fabricante de la tecnología PENTAIR HAFFMANS; la segunda está constituida por el costo de producción del CO2 purificado y el último es el análisis de rentabilidad en cual compone el VAN, TIR y RSI.

Para el cálculo de rentabilidad se ha considerado un precio de venta en planta del CO2 de 2.5 soles/kg, basados a que en el mercado el precio de CO2 es de 5.0 soles/kg como se observa en la cotización recibida (Anexo).

La empresa Pucalá ha determinado el costo de CO2 como materia prima de 1.0 Sol/Kg.

Se considera también financiar la inversión total en la banca comercial con una tasa de interés promedio de 20% anual. El financiamiento que otorga la banca es de 80% de la inversión total, donde el 20% correspondería invertir a la empresa Pucalá.

También se ha estimado una tasa de inflación anual de 2% para los siguientes 5 años, periodo para el cual se ha estimado el pago del financiamiento con la banca comercial.

Para efectos del estudio económico se estimó que la producción actual de la empresa alcoholera se mantiene constante durante los siguientes 5 años.

#### **3.2.5.1 Beneficio/costo**

**Tabla 17**  
*Beneficio/costo*

	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
<b>Beneficio</b>	0	2562335	5287319	8177303	11234688	14461920
<b>Costo</b>	0	7858754	7858754	7858754	7858754	7858754
<b>Relacion Beneficio/Costo</b>	<b>0</b>	<b>0.33</b>	<b>0.67</b>	<b>1.04</b>	<b>1.43</b>	<b>1.84</b>

### 3.2.5.2 Inversión total del proyecto

La inversión total del proyecto comprende principalmente el Capital Fijo Total y el Capital de Trabajo. El primero que comprende la inversión en la compra de la tecnología seleccionada que es la planta de captura y purificación de CO<sub>2</sub>, y el segundo que es un estimado de un capital que permita a la empresa trabajar holgadamente sin problemas de liquidez para efectos de pago al personal y servicios varios.

La tabla 18 muestra la estructura y monto de estos capitales y el total de la inversión necesaria para comprar e instalar la planta de tecnología Haffmans.

**Tabla 18**

*Inversión total para instalación de la planta de tecnología Haffmans.*

<b>INVERSION TOTAL DEL PROYECTO</b>	
CAPITAL FIJO TOTAL, nuevos soles (S/:	1471500
1.1 Costo de Planta Haffmans (\$US 450000)	1471500
CAPITAL DE TRABAJO	1342706
Cuentas por cobrar (equivale a 15 días de ventas)	671353
Disponible en caja (equivale a 15 días de ventas)	671353
<b>INVERSION TOTAL DEL PROYECTO, S/.</b>	<b>2814206</b>

Fuente; Elaborado por los autores

El precio que se indica en la tabla 18, se obtuvo de las cotizaciones solicitadas a tres fabricantes de las tecnologías en mención, de las cuales se seleccionó a la tecnología Haffmans como se indicó anteriormente. Esta planta de recuperación y purificación de CO<sub>2</sub> con capacidad de 1000 kg/hr. Los precios cotizados se resumen en la Tabla 19.

**Tabla 19***Precio de plantas de recuperación y purificación de CO2. Cap. 1000 kg/hr.*

<b>PRECIO DE PLANTA SEGÚN FABRICANTES (VER ANEXO)</b>		
	<b>\$</b>	<b>S/.</b>
PENTAIR HAFFMANS	450 000	1471500
PUREGAS	451 500	1476405
TECHNO ENGINEERING	570 000	1863900
Fuente: Elaborado por los autores		

**3.2.5.3 Costo de producción de co2 purificado**

El costo total de producción del CO2 en la planta de recuperación y purificación de CO2 a instalarse de tecnología Haffmans, estaría comprendida por los costos directos e indirectos de fabricación, los costos fijos y los gastos generales como se muestra en la tabla 20.

**Tabla 20***Costo total de producción y costo unitario de CO2 en la planta a instalar*

<b>COSTO TOTAL DE PRODUCCION</b>	
<b>1.1 COSTOS DIRECTOS</b>	<b>S/.</b>
Materia prima (1000 S./T) x 6446.2 Tn	6446200
Mano de obra (6 Obre.x1000 solesx12meses)	72000
<b>1.2 COSTOS INDIRECTOS</b>	
Carga de planillas (42%), estimado	30240
Costo de supervisión e ingeniería (1Ing,2000/mes)	24000
Costo de mantenimiento (5% costo directo), estimado	73575
<b>1.3 COSTOS FIJOS DE PRODUCCION</b>	
Depreciación (10% costo de equipos de planta)	147150
Impuestos(10% costo de planta)	147150
Seguros (1% costo de planta)	14715
<b>1.4 GASTOS GENERALES</b>	
Gasto x administración y ventas (2.5% costo de planta)	36787.5
<b>COSTO TOTAL DE PRODUCCION, (S/)</b>	<b>6991817.5</b>
Total de Toneladas producidas por año	6444.99
Costo del CO2: Soles /T	<b>1084.8</b>

Fuente: Elaborado por los autores

Se concluye que 1 Tonelada de CO2 purificada, tendría un costo de fabricación de 1084.8 soles. Esto equivale a 1.0848 soles/kg.

### 3.2.5.4 Análisis de rentabilidad.

Para realizar el análisis de rentabilidad se construyó un flujo de caja, y con ello se obtuvo un flujo neto económico y flujo neto financiero necesario para calcular la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN). Para una buena rentabilidad el TIR debe estar muy por encima de la tasa del mercado (>35%), y el VAN>0.

La data necesaria para el cálculo de estos indicadores económicos que se muestran en el flujo de caja se muestra en la tabla 21.

**Tabla 21**

*Data para evaluación económico-financiero del proyecto Haffmans.*

Venta anual de CO2, en toneladas		6444.99
Precio de venta en planta por año, a 2500 soles/T(*)		16112476.9
Precio de venta en planta por mes, soles		1342706
Índice de inflación anual (estimada)	2%	
Costo producción de CO2:	1084.8 S./T	
Precio en mercado de CO2	5000 S./T	
Precio de venta en Planta	2500 S./T	
Impuesto a la renta	27%	
Préstamo bancario	80% de la inversión total, S/.	2251365
Aporte de la empresa	20% de la inversión total, S/.	562841
Valor de cambio de moneda	1\$ = 3.27 soles	
<b>FINANCIAMIENTO DE PRESTAMO</b>		
Interés de financiamiento	20% anual (promedio del mercado)	

Fuente: Elaborado por los autores.

(\*) El precio en planta a 2.5 soles el kg significa que será vendido a distribuidores externos quienes tendrán amplio margen de utilidad, ya que el mercado actual vende a 5 soles/kg.

### 3.2.5.5 Financiamiento de la inversión

Se estimó financiar la inversión con la banca comercial. En tal sentido, la banca propone un préstamo del 80% de la inversión total y el 20% restante es el aporte de la empresa. Para una inversión total de 2814206 soles, el financiamiento (80%) sería de 2251365 soles. Bajo esta premisa el cuadro de financiamiento a 5 años es así:

**Tabla 22**

*Financiamiento de la inversión del proyecto con tecnología Haffmans*

<b>Año</b>	<b>Saldo</b>	<b>Interés</b>	<b>Amortización</b>	<b>Pago total</b>	<b>Saldo</b>
0	2251365				
1	2251365	450273.0248	450273.0248	900546.0496	1801092.099
2	1801092	360218.4198	450273.0248	810491.4446	1350819.074
3	1350819	270163.8149	450273.0248	720436.8397	900546.0496
4	900546	180109.2099	4450273.0248	630382.2347	450273.0248
5	450273	90054.60496	450273.0248	540327.6298	0
		<b>1350819.074</b>	<b>2251365.124</b>	<b>3602184.198</b>	

Fuente: Elaborado por los autores

### 3.2.5.6 Flujo de caja

Para efectos de realizar un análisis de rentabilidad, conocer el flujo neto económico y el flujo neto financiero, se elaboró un flujo de caja, el mismo que se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 23***Flujo de caja económico-financiero del proyecto con tecnología Haffmans*

FLUJO DE CAJA ECONOMICO - FINANCIERO						
RUBRO/ AÑO	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Producción de CO2, Tn/año		6444.99	6444.99	6444.99	6444.99	6444.99
Precio de venta, S./Tn		2500.0	2550.0	2601.0	2653.0	2706.1
(+) Ingreso por ventas		16112475	16434725	16763419	17098687	17440661
(-) Inversión Total	-2814206					
(-)Costo de Producción		7131355.7	7131355.7	7131355.7	7131355.7	7131355.7
(-)Gastos Operativos (10% C.P)		727398.3	727398.3	727398.3	727398.3	727398.3
Utilidad bruta		8253721.1	8575970.6	8904665.1	9239933.4	9581907.2
(-) Impuesto a la renta		2228504.7	2315512.1	2404259.6	2494782.0	2587114.9
<b>Flujo Neto Económico</b>	<b>-2814206</b>	<b>6025216</b>	<b>6260459</b>	<b>6500405</b>	<b>6745151</b>	<b>6994792</b>
(+) Préstamo	2251365					
(-) Amortización		450273.0	450273.0	450273.0	450273.0	450273.0
(-) Intereses		450273.0	360218.4	270163.8	180109.2	90054.6
<b>Flujo Neto Financiero</b>	<b>-562841</b>	<b>5124670</b>	<b>5449967</b>	<b>5779969</b>	<b>6114769</b>	<b>6454465</b>
(+) Aporte propio	562841					
(-) Reserva legal, 10%		512467.0	544996.7	577996.9	611476.9	645446.5
(-) Dividendos, 40%		2049868.1	2179986.8	2311987.5	2445907.7	2581785.8
Flujo Neto (Utilidad neta)		2562335	2724984	2889984	3057385	3227232
Flujo Neto Acumulado	0	2562335	5287319	8177303	11234688	14461920
<b>B/C</b>		<b>0.33</b>	<b>0.67</b>	<b>1.04</b>	<b>1.43</b>	<b>1.84</b>

Con los resultados del flujo neto económico y flujo neto financiero para los siguientes 5 años, se determina la Tasa Interna de Rentabilidad económica y financiera la misma que debería ser mayor a la tasa promedio del mercado, para lo cual se recomienda  $TIR > 35\%$ . Otro indicador que explica la rentabilidad del proyecto es el Valor Actual Neto que se recomienda sea  $>0$ .

Para que el proyecto sea visto rentable, se calculó el indicador TMAR que es el que evalúa que tan rentable puede ser el proyecto para los inversionistas.

Para calcular el TMAR necesitaremos saber la tasa de inflación y el riesgo de la inversión, donde la tasa de inflación va hacer del 2% anual como se trabajó en la evaluación económica y en el riesgo de la inversión va hacer el 4% porque el proyecto se encuentra

en un riesgo bajo; decimos que el riesgo es bajo porque la demanda es estable y en la zona donde se está elaborando el proyecto no hay empresas que puedan ser nuestra competencia.

Entonces decimos que el proyecto es rentable a la vista de cualquier inversionista por que el TMAR es mayor a la tasa de inflación

La tabla 23 muestra los resultados del TIR económico y financiero, y del VAN económico y financiero, y ambos indican que el proyecto sería altamente rentable.

### 3.2.5.7 Análisis de rentabilidad

**Tabla 24**

*Análisis de rentabilidad del proyecto de tecnología Haffmans*

TASA INTERNA DE RENTABILIDAD ECONOMICA (TIReco)	217%
VALOR ACTUAL NETO ECONOMICO, VANeco	21671291
TASA INTERNA DE RENTABILIDAD FINANCIERA (TIRfin)	917%
VALOR ACTUAL NETO FINANCIERO, VANfin	21126815
TASA MINIMA ACEPTABLE DE RENDIMIENTO (TMAR)	6%

El análisis de rentabilidad muestra que la ejecución del proyecto con tecnología Haffmans sería altamente rentable.

### 3.2.5.8 Tiempo de recuperación del dinero

Siendo el flujo neto acumulado del primer año 2562335 soles, entonces significa que la deuda de 2251365 se puede cancelar en un año.

### 3.2.5.9 Tiempo de retorno sobre la inversión (tri).

Otra de los indicadores que ayudan a explicar la rentabilidad del proyecto es el tiempo de retorno del dinero respecto a la inversión realizada, en este caso respecto al monto financiado con el Banco. En la tabla 23 del Flujo de Caja se observa que el monto financiado es de 2251365 nuevos soles. También se observa que el flujo

neto acumulado de utilidades para el primer año de operación es de 2562335 nuevos soles, monto mayor a la deuda, lo que significa que podría cancelarse la deuda en el primer año, o en otras palabras el tiempo de retorno sobre la inversión es de menos de un año.

### **3.3. Discusión de resultados**

En el presente proyecto se estaría recuperando 6444.99 toneladas de CO<sub>2</sub> por año, que contaminan el ambiente y se convertiría en un producto útil para la industria de bebidas carbonatadas. Sin embargo, el CO<sub>2</sub> tiene otros usos que muy bien pueden ser aprovechados y generar ganancias, como lo indica el BBC Mundo( 2017) del proyecto realizado en la ciudad de Tuticorin, (India) donde se ahorró 60 000 toneladas de CO<sub>2</sub> por año y fueron convertidos en polvo de hornear.

Este estudio además permite la oportunidad de vender bonos de carbono y generar ingresos económicos a la empresa Industrial Pucalá S.A.C en una cantidad de 6444.99 bonos por año, así como se hizo en el proyecto realizado en San Martín (Alto Mayo) que actualmente vende bonos de carbono al parque de diversiones Disney, Microsoft, United Airlines entre otras compañías, a través de sembríos de pino en la selva peruana, las cuales compran bonos para poder compensar las contaminaciones que generan en sus países.

El CO<sub>2</sub> crudo recuperado de la planta de destilación de etanol rectificado de la empresa Industrial Pucalá S.A.C. se podrá purificar hasta una concentración de 99.998% en el sistema de recuperación y purificación Haffmans, seleccionado como apto para ser utilizado en la planta alcoholera Pucalá y producir CO<sub>2</sub> purificado y útil para la industria de bebidas carbonatadas. Esto es una demostración que el CO<sub>2</sub> que actualmente contamina el ambiente, pueda ser convertido en un producto útil para la industria de bebidas, aunque también puede ser convertido en otros productos como lo indica Amaos (2016) en el proyecto realizado en Islandia llamado Carbfix, el cual 220 toneladas de CO<sub>2</sub> se convirtieron en piedra caliza con el método de combinación de desechos de CO<sub>2</sub> con agua.

El CO<sub>2</sub> purificado hasta 99.998% de pureza que se destina en este estudio para la industria de bebidas carbonatadas, puede también ser utilizado en otro tipo de industrias del sector alimentos y bebidas. Este también es el caso que indica Vega(2011) en su investigación titulada técnica de energía y medio ambiente sobre la posibilidad de utilizar el CO<sub>2</sub> en diversas aplicaciones industriales manifiesta que uno de los grandes usos del dióxido de carbono es en las bebidas carbonatadas, bebidas alcohólicas como cerveza y vino. También menciona que el CO<sub>2</sub> puede ser convertido en combustible como fotosíntesis artificial y producción de metanol.

El CO<sub>2</sub> recuperado y purificado en el presente proyecto tiene como fuente de aprovechamiento el CO<sub>2</sub> que escapa de los fermentadores en el proceso de fermentación de las industrias de producción de etanol, sin embargo otras fuentes importantes de amplio aprovechamiento son los gases residuales de la combustión, especialmente de los hornos y calderos de las plantas industriales. Al respecto, el Diario El País (2009) menciona de un proyecto realizado en Noruega, donde se da a conocer que hay una planta de recuperación de CO<sub>2</sub> donde aplica dos tecnologías para su captura hasta perfeccionarlas y luego hacerlas más competitivas, su objetivo es capturar 100000 toneladas de dióxido de carbono al año; esta captura de CO<sub>2</sub> realiza teniendo como fuente de aprovechamiento los procesos de combustión.

Con el propósito de mitigar la contaminación ambiental generada por el CO<sub>2</sub>, además de este estudio, actualmente se están realizando muchas investigaciones en el mundo, de otras fuentes como es el caso del parque automotor, donde en los gases residuales se expulsa también dióxido de carbono. Este es el caso de Yu (2017) que en un proyecto realizado en Suiza, tuvo como objetivo, recuperar 9000 toneladas de CO<sub>2</sub> anual lo que equivale a una demanda de 200 carros, la metodología que utilizó fue la recuperación de calor residual emitidas por lo carros.

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

## IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones.

Se realizó un diagnóstico de la situación actual de producción de CO<sub>2</sub> en la planta alcoholera Industrial Pucalá, y se encontró que actualmente produce un promedio de 30 000 litros de alcohol por día que genera 6446.19 toneladas por año de CO<sub>2</sub>, el cual está causando un aumento en los gases de efecto invernadero.

Se identificaron 4 tecnologías para la recuperación y purificación de CO<sub>2</sub>, de mayor presencia en las plantas de fermentaciones industriales. Estas son Haffman, Puregas, Techno Engineering y Unión. Se aplicó un método de criterio técnico y se seleccionó la tecnología de Haffmans como la más adecuada para el sistema de recuperación y purificación de CO<sub>2</sub>, con una calidad de 99.998% de pureza, para uso en la industria de bebidas. El proceso haffmans consiste en un proceso que se inicia en la captura de CO<sub>2</sub> del fermentador de alcohol para luego pasar por un separador de espuma, seguido de un scrubber o absorbedor y dos filtros, uno de carbón activado que adsorbe olores y colores que pueda traer el CO<sub>2</sub> y un secador de silica gel. Finalmente un compresor comprime el CO<sub>2</sub> hasta 200 psi y lo almacena para su distribución. Con el sistema HAFFMANS para captura y purificación de CO<sub>2</sub> se podrá eliminar las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente en 6444.99 Toneladas por año y podrán ser utilizados para venta a la industria de bebidas.

El CO<sub>2</sub> purificado será principalmente para uso en la industria de las bebidas carbonatadas con un porcentaje de pureza es de 99.998%, y porque es el tipo de industria de mayor presencia en nuestro país. Entre las bebidas carbonatas se encuentran las bebidas gaseosas, agua carbonatada, cerveza y vino. Otros usos son en el tratamiento de aguas residuales y para el procesamiento y conservación de alimentos, y para la obtención de gas de síntesis, piedra caliza y polvo de hornear.

Se realizó una evaluación económica de la propuesta del sistema de recuperación y uso de CO<sub>2</sub> con los siguientes resultados: Inversión Total S/ 2'814,206 (nuevos soles). El costo de producción de 1T de CO<sub>2</sub> será de 1084.8soles/Tonelada. Así mismo el proyecto resulta ser muy rentable con una Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) de >217% y un VAN>0. El tiempo de retorno sobre la inversión será de un año. Un índice adicional que reafirma la rentabilidad del proyecto es la relación Beneficio/Costo que va desde 0.33 hasta 1.84 en los siguientes 5 años.

La planta alcoholera Pucalá emite al año 6446.2 toneladas de CO2 utilizando el sistema de recuperación de CO2 HAFMANS se está recuperando 6444.99 toneladas de CO2 por año el cual ayudará a mitigar los gases de efecto invernadero. Al utilizar el sistema se obtiene un porcentaje de 99.998% de pureza, es decir es apto para la industria de bebidas carbonatadas.

#### **4.2. Recomendaciones**

Desarrollar estudios analíticos sobre la conversión del CO2 en un amplio uso.

Realizar estudios de bonos de carbono que se emite en al ambiente de todo el Perú.

## REFERENCIAS

- A,L.L.(2015).China emitió 13.000 millones de toneladas de CO2 que no registró en sus informes.ABC.Recuperado de [http://www.abc.es/sociedad/ abci-china-emitio-13000-millones-toneladas-no-registro-informes-201511042016\\_noticia.html](http://www.abc.es/sociedad/ abci-china-emitio-13000-millones-toneladas-no-registro-informes-201511042016_noticia.html)
- Alegsa Leandro (2016). *Alegsa: Definición de sistema*. Argentina. Recuperado de <http://www.alegsa.com.ar/Dic/sistema.php>
- Amaos,J (2016). El extraordinario experimento que convierte el dióxido de carbono en piedra. BBC Mundo. Recuperado de <http://www.bbc.com/ mundo/noticias-36499441>
- Benavides,H.& León,G.(2007).Información de técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático(IDEAM-METEO/008).Recuperado del sitio de internet de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climático.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>. <http://www.bbc.com/mundo/noticias-36499441>
- Berman,J.M & Pérez,V.(2013).CO2 como refrigerante:del pasado al futuro.Acta Universitaria,23(2),23-30.
- Centro Internacional para la Investigacion del Fenomeno del Niño.(2012).Efecto Invernadero. Recuperado de [http://www.ciifen.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=572:efecto-invernadero&catid=99:contenido-2&Itemid=132&lang=es](http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=572:efecto-invernadero&catid=99:contenido-2&Itemid=132&lang=es)
- Exebio,V & Prieto ,M.(2013).Impacto económico de las emisiones de gases efecto invernadero de las centrales térmicas en el Perú.Universidad Catoliza Santo Toribio de Mogrovejo.Chiclayo,Perú.
- Greg, R. (2009). Electrochemical CO2 Capture and Storage with Hydrogen Generation. Energy Procedia, 823-828.

- Portillo, G.(2016).¿Qué es y como funciona el efecto invernadero?.Meteorología en red de Bezzia. Recuperado de <https://www.meteorologiaenred.com/efecto-invernadero.html>. <https://www.meteorologiaenred.com/efecto-invernadero.html>
- Redacción EC(2014,9 de noviembre).El futuro brillante del mercado de bonos de carbono en el Perú. El Comercio. Recuperado de <http://elcomercio.pe/economia/peru/futuro-brillante-mercado-bonos-carbono-peru-179876>. <http://elcomercio.pe/economia/peru/futuro-brillante-mercado-bonos-carbono-peru-179876>
- Redacción EC(2014,25 de noviembre).CO2 que Perú emite a diario equivale a 380 mil globos como este. El Comercio. Recuperado de <http://elcomercio.pe/lima/co2-peru-emite-diario-equivale-380-mil-globos-306972>. <http://elcomercio.pe/lima/co2-peru-emite-diario-equivale-380-mil-globos-306972>
- Redacción BCC MUNDO(2017,3 de Enero).La planta que convierte el CO2 en polvo para hornear. BBC MUNDO. Recuperado de <http://www.bbc.com/mundo/noticias-38496684>. <http://www.bbc.com/mundo/noticias-38496684>
- Redacción Quito(2014,6 de Agosto).5.1 millones de toneladas de CO2, en el año. El Comercio. Recuperado de: <http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-produce-millones-dioxido-carbono.html>
- Rodriguez,J.(2012,febrero,20).¿Qué es el CO2?.Conciencia Eco.Recuperado de <http://www.concienciaeco.com/2012/02/20/que-es-el-co2/>
- Romero,L.,Díez,L.,Lisbona,P.,González,A.,Guedea,I.,Lupiáñez,C.,Martínez,A.,Lara,Y.,Bolea,I.(2010).Captura y almacenamiento de CO2. España. Prensas Universitarias de Zaragoza. <http://www.concienciaeco.com/2012/02/20/que-es-el-co2/>
- Vega, L,F (2011). Guías técnicas de energía y medio ambiente. Barcelona, España: Fundación Gas Natural

Yapar, Y. (2016). Reducción de costos de energía y mitigación de gases de efecto invernadero en una planta industrial mediante la cogeneración con gas natural. Universidad Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

## ANEXO



### Universidad Señor de Sipán

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

#### FICHA DE OPINIÓN DE EXPERTOS

Apellidos y nombres del experto: LARREA COLCHAO, Luis P.  
 Grado Académico: INGENIERIA  
 Cargo e Institución: DTC - INDUSTRIAL  
 Nombre del instrumento a validar: Memoranda  
 Autor del instrumento: Requiere puntillan Angui - Mercedes Montenegro Florio  
 Título del Proyecto de Tesis: Sistema de recuperación y uso del CO2 de la planta alcohólica Industrial Pucallpa para mitigar los gases de efecto invernadero

Indicadores	Criterios	Calificación			
		Deficiente De 0 a 5	Regular De 6 a 10	Bueno De 11 a 15	Muy bueno De 16 a 20
Claridad	Los items están formulados con lenguaje apropiado y comprensible			/	
Organización	Existe una organización lógica en la redacción de los items			/	
Suficiencia	Los items son suficientes para medir los indicadores de las variables			/	
Validez	El instrumento es capaz de medir lo que se requiere			/	
Viabilidad	Es viable su aplicación			/	

**Valoración**

Puntaje: (De 0 a 20) 15

Calificación: (De Deficiente a Muy bueno) BUENO

**Observaciones**

.....  
 .....

Fecha 24 Julio  
 Firma de [Firma]  
 No. Colegiatura 200049

**Universidad Señor de Sipán**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

**FICHA DE OPINIÓN DE EXPERTOS**

Apellidos y nombres del experto: D. ANGELES CHERO PEDRO PABLO  
 Grado Académico: Doctor en Ciencias  
 Cargo e Institución: Profesor Principal  
 Nombre del instrumento a validar: Extracción  
 Autor del instrumento: Isiquiro Santellan Pngui - Jacaracha Montenegro, Elvira  
 Título del Proyecto de Tesis: Sistema de recuperación y uso del CO<sub>2</sub> de la planta alcohólica Industrial Pucallpa para mitigar los gases de efecto invernadero.

Indicadores	Criterios	Calificación			
		Deficiente De 0 a 5	Regular De 6 a 10	Bueno De 11 a 15	Muy bueno De 16 a 20
Claridad	Los items están formulados con lenguaje apropiado y comprensible				✓
Organización	Existe una organización lógica en la redacción de los items				✓
Suficiencia	Los items son suficientes para medir los indicadores de las variables				✓
Validez	El instrumento es capaz de medir lo que se requiere				✓
Viabilidad	Es viable su aplicación				✓

**Valoración**

Puntaje: (De 0 a 20) 18

Calificación: (De Deficiente a Muy bueno) Muy buena

**Observaciones**

.....  
 .....

Fecha 17/07/2017  
 Firma [Firma]  
 No. Colegiatura CIP 18169

