



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN
DE GASES DE EFECTO INVERNADERO AL AMBIENTE, MEDIANTE LA CAPTURA DEL
CO₂ DE LOS GASES DE ESCAPE COMO PRODUCTO DE LA QUEMA DE COMBUSTIBLES
FÓSILES, EN EL CALENTAMIENTO DE HORNOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA**

Abel Ernesto Mancilla Castro

Asesorado por el MSc. Lic. Juan Ramón Pallais Ponciano

Guatemala, julio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO AL AMBIENTE, MEDIANTE LA CAPTURA DEL CO₂ DE LOS GASES DE ESCAPE COMO PRODUCTO DE LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES, EN EL CALENTAMIENTO DE HORNO EN LA INDUSTRIA CEMENTERA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ABEL ERNESTO MANCILLA CASTRO

ASESORADO POR EL MSC. LIC. JUAN RAMÓN PALLAIS PONCIANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Erick René Guerrero Silva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO AL AMBIENTE, MEDIANTE LA CAPTURA DEL CO₂ DE LOS GASES DE ESCAPE COMO PRODUCTO DE LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES, EN EL CALENTAMIENTO DE HORNOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 16 de julio de 2013.



Abel Ernesto Mancilla Castro



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142

ADSE-MEAPP-0018-2013

Guatemala, 16 de julio de 2013.

Director:
Julio César Campos Paiz
Escuela de Ingeniería Mecánica
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Abel Ernesto Mancilla Castro** con carné número **1995-15706**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"

JUAN RAMON PALLAIS PONCIANO
LICENCIADO EN QUIMICA
COLEGIADO 1,784

MSc. Ing. Juan Ramón Pallais Ponciano
Asesor (a)

JUAN RAMON PALLAIS PONCIANO
LICENCIADO EN QUIMICA
COLEGIADO 1,784

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Dra. Mayra/Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador de Área y de la Directora de la Escuela de Estudios de Posgrado al Diseño de Investigación titulado DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO AL AMBIENTE, MEDIANTE LA CAPTURA DEL CO₂ DE LOS GASES DE ESCAPE COMO PRODUCTO DE LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES, EN EL CALENTAMIENTO DE HORNOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA, del estudiante **Abel Ernesto Mancilla Castro**, en la modalidad del proceso de graduación de pregrado de la Facultad de Ingeniería, opción Estudios de Postgrado, procede a la autorización del mismo

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz

DIRECTOR



Guatemala, julio de 2013

ESCUELAS: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria Recursos Hidráulicos (ERIS), Posgrado Maestría en Sistemas Mención Construcción y Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas Licenciatura en Matemática, Licenciatura en Física. Centros: de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM), Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 523 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO AL AMBIENTE, MEDIANTE LA CAPTURA DEL CO₂ DE LOS GASES DE ESCAPE COMO PRODUCTO DE LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES, EN EL CALENTAMIENTO DE HORNOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA**, presentado por el estudiante universitario: **Abel Ernesto Mancilla Castro**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 30 de julio de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme con salud lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.
- Mi madre** Juvinalia Castro, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor.
- Mi esposa** Alejandra de Mancilla, por el tiempo, la paciencia y el amor demostrado en todos estos años juntos.
- Mi hijo** Sebastian Mancilla, quien desde su nacimiento me ha dado una lección de vida.
- Mis hermanos** Con su apoyo, ejemplos y consejos formaron la persona que soy.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por haberme permitido vivir este día, iluminarme en los momentos más difíciles.
- Mi madre** Juvinalia Castro por el apoyo brindado a lo largo de mi vida, por tenerme la confianza y permitirme estudiar esta carrera.
- Mis hermanos** Por apoyarme en aquellos momentos de necesidad, en especial a Leonel Mansilla ya que con su ayuda logre formar una base solida que me permitió terminar esta carrera.
- Mi esposa** Alejandra de Mancilla, por ser una parte importante de mi vida, haberme apoyado en las buenas y en las malas, el haberme soportado en momentos críticos.
- Mi padrino** Carlos Eduardo Díaz, por ser amigo con quien siempre puedo contar.
- Mi asesor** Juan Ramón Pallais, por tomarse el tiempo y compartir sus conocimientos.
- Mis amigos** Por todo lo compartido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	01
2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	05
3. OBJETIVOS	07
4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	09
5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
6. ALCANCES	13
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	15
7.1. Efecto invernadero	15
7.2. Impacto ambiental a causa del desarrollo de la industria del cemento.....	16
7.2.1. Uso de combustibles fósiles como fuente energética y acumulación de CO ₂ en la atmósfera.....	17

7.2.2.	Apropiación de recursos naturales, ecoeficiencia de materiales y de energía, desperdicio energético y mejora tecnológica	19
7.3.	La industria cementera y su relación con el medio ambiente..	22
7.4.	Qué es la captura y almacenamiento de CO ₂ , y cómo podrían contribuir a la mitigación del cambio climático	23
7.5.	Tecnologías para capturar el CO ₂	24
7.5.1.	Tipos de captura de CO ₂	25
7.6.	Transporte del CO ₂	27
7.7.	Almacenamiento provisional o en reservorios	31
7.8.	Aspectos técnicos	34
8.	HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	37
9.	CONTENIDO PROPUESTO DEL INFORME FINAL.....	39
10.	MÉTODOS Y TÉCNICAS	41
10.1.	Tipo de investigación.....	41
10.2.	Tipo de hipótesis de investigación	41
10.3.	Metodología	41
11.	RESULTADOS ESPERADOS	53
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	55
13.	RECURSOS NECESARIOS	57
14.	BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Flujos anuales de carbono	19
2.	Diagrama de fases del CO ₂	29
3.	Eficiencia del sistema de captura	50

TABLAS

I.	Alcance de la solución	13
II.	Generación de CO ₂ asociado a la producción de cemento hidráulico	20
III.	Índice de CO ₂ asociado a la producción de cemento hidráulico, incluyendo combustibles.....	22
IV.	Tipos de variables.....	43
V.	Características de los gases emitidos	45
VI.	Volumen y densidad de los gases de escape.....	46
VII.	Caracterización de los gases emitidos	47
VIII.	Eficiencia en el sistema de captura	48
IX.	Período de retorno de inversión.....	51
X.	Recursos para proyecto.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂O	Agua, óxido de dihidrogeno
bar	Bares
CAC	Captura y almacenamiento de carbono
PLC	Controlador lógico programable
SO₂	Dióxido de azufre
CO₂	Dióxido de carbono, bióxido de carbono
GEI	Gases de efecto invernadero
°C	Grados Celsius
kJ/kg	Kilo Joule por kilogramo
kgCO₂/Mg	Kilogramo de dióxido de carbono por megagramo
kg/cm²	Kilogramo por centímetro cuadrado
psig	Libra por pulgada cuadrada
lt/gr	Litro por gramo
MJ/t	Mega Joule por tonelada
CO	Monóxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno
ppm	Partes por millón
Pg	Pico gramo
pies³/lb	Pie cúbico por libra
%	Porcentaje
T	Tonelada

GLOSARIO

Absorción química	Operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido.
Antropogénico	efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas.
Cambio climático	Es la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional.
Caracterización	Determinar los atributos peculiares de alguien o de algo.
Cemento portland	Conglomerante o cemento hidráulico que cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón.
Chimeneas	Ductos utilizados para evacuar gases producidos por efectos de la combustión.
Clinker	Se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1 350 y 1 450 °C.

Combustible fósil	Son tres: petróleo, carbón y gas natural, y se formaron hace millones de años, a partir de restos orgánicos de plantas y animales muertos.
Efecto invernadero	Fenómeno por el cual determinados gases, que son componentes de la atmósfera terrestre, retienen parte de la energía que la superficie planetaria emite por haber sido calentada por la radiación estelar.
Emisión	Son todos los fluidos gaseosos, puros o con sustancias en suspensión.
Erosión	Degradación y el transporte de suelo o roca que producen distintos procesos en la superficie de la Tierra u otros planetas.
Gas	Estado de agregación de la materia en el cual, bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, sus moléculas interactúan solo débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares
Impacto ambiental	Efecto que produce una acción sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos.
Indicador	Elemento o dispositivo que muestra cierto cambio según el medio en el cual se encuentra.

Proceso	Conjunto de actividades o eventos (coordinados u organizados) que se realizan o suceden (alternativa o simultáneamente) bajo ciertas circunstancias con un fin determinado.
Recursos naturales	Bien o servicio proporcionado por la naturaleza sin alteraciones por parte del ser humano.
Reducción	Se refiere a utilizar la cantidad mínima indispensable de recursos necesarios en acciones que van desde las cotidianas hasta las industriales.

RESUMEN

La evaluación de la reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero mediante la captura poscombustión del CO₂, que se produce en la quema de combustible fósil para el calentamiento de hornos en la industria cementera, es el principal objetivo de este trabajo de investigación, esta propuesta determinará si con la tecnificación y el uso debido de los gases de chimenea se atenuará significativamente las emisiones directas de CO₂ al ambiente que son de las principales fuentes del cambio climático. Si se considera que las emisiones de CO₂ que la industria cementera genera al ambiente es de alrededor del 5 % mundial, con la tecnología de captura se está aplazando las emisiones directas al ambiente, permitiendo que los sumideros capturen de forma natural el CO₂ luego de su procesamiento.

Por tanto este análisis puede ser un aliciente para el desarrollo y futura ejecución de dicha tecnología en investigación, dado que el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera trae graves consecuencias para todos los países, especialmente los que basan su economía en la agricultura y por ser Guatemala un país forestal se ve afectado directamente, siendo el CO₂ el principal gas que provoca el efecto invernadero se ve la necesidad de tecnologías emergentes como la captura de CO₂ en procesos poscombustión en el calentamiento de hornos en la industria cementera siendo estas de las que mayor emisión tiene del mismo. Se espera que esta evaluación alcance un interés a nivel medioambiental y empresarial en donde se facilite una solución mediante la aplicación de esta tecnología y poder contribuir a la huella de carbono, siendo una interesante cantidad de industrias que puedan aplicar en sus áreas la captura poscombustión.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, principalmente en la línea investigativa de Gestión y políticas energéticas ambientales del área de formulación, gestión, seguimiento y evaluación de proyectos.

Se efectuará una evaluación de la reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero mediante la captura poscombustión del CO₂ que se produce en la quema de combustible fósil para el calentamiento de hornos en la industria cementera.

Se efectuará una caracterización de los componentes químicos, físicos y ambientales de los gases de chimenea como producto del calentamiento de los hornos, se evaluarán los diferentes combustibles fósiles que se utilizan en el proceso de calentamiento de hornos para determinar la cantidad a capturar; para así conocer los beneficios que se obtienen al cambio climático que afecta al mundo en general.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la reducción de los gases de efecto invernadero con el sistema propuesto se estará atenuando significativamente las emisiones directas de CO₂ al ambiente que son las principales fuentes del cambio climático.

Asimismo, se pretende que la industria compruebe que es aplicable a todo sistema de combustión con modificaciones mínimas a sus actuales sistemas de chimeneas.

Para este trabajo de evaluación se trata un marco teórico dividido en 6 secciones principales.

La primera sección hace referencia al efecto invernadero y como éste ha ido en aumento derivado de la quema de combustibles fósiles a nivel global así de como la industria cementera tiene una relación estrecha con los efectos medioambientales que se tienen hoy en día. Se hace notar la preocupación de las potencias mundiales del incremento de temperatura y de niveles del mar a consecuencia de los gases de efecto invernadero específicamente el CO₂ y la necesidad de tecnificar la captura, debido a esto se agrega una sección a lo que son los diferentes tipos de captura de CO₂, su transporte y su almacenamiento en reservorios.

Es necesario conocer el comportamiento, los riesgos y características del CO₂ ya que luego de su captura se debe transportar a tanques específicos para su almacenamiento en forma segura para su posterior utilización.

En la sección de aspectos técnicos se relaciona a parte de montaje y análisis de la interface para poder utilizarse en los sistemas de escape existentes, la finalidad es que sea un sistema el cual no incremente los costos y las modificaciones sean mínimas para que sea atractiva a los empresarios.

En métodos y técnicas, se analizarán las emisiones de CO₂ en forma teórica evaluando los datos obtenidos de industrias cementeras, se hará un estudio técnico de los planos de la planta para su descripción operativa teniendo consumos energéticos, de combustibles, cantidad de operadores, producción diaria de clínker, estructura organizacional para determinar la cantidad de CO₂ a capturarse y los costos operativos relacionados al sistema.

Con esta información se tabulará estadísticamente para determinar los efectos positivos al cambio climático por medio de la captura bajo el sistema evaluado.

2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

(Conama, 2009), en el documento del Grupo de Trabajo de Conama 10: Captura y Almacenamiento de CO₂ (2002), cita que existen un número significativo de proyectos pilotos en marcha para desarrollar nuevos y mejores solventes para los gases de combustión y para reducir su demanda energética. Enuncia ejemplos de proyectos pilotos de aminas tales como: Port Arthur, Denbury, Air Products (EE.UU) y Praxair, BP, Gulf Coast Carbon Center, CO₂ exhaust from SMR.

(Linares & Beatriz, 2007), trata en el documento Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ con respecto a los proyectos demo previstos en Europa en el 2015, de estos seis proyectos cuentan ya con el apoyo del Plan de recuperación europeo y tres de estos proyectos son de captura en post-combustión por medio de absorción química a base de aminas, en el documento tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂. Tiene como objetivo crear una línea de trabajo u opción que puede ser válida para las instalaciones existentes o las de nueva construcción, tanto en centrales térmicas de carbón, como en plantas de ciclo combinado con gas natural como combustible de este tipo de captura de CO₂ poscombustión.

Mientras (Morales & Torres, 2008), hacen referencia en su documento Tecnologías de Captura y Secuestro de CO₂, del 25 de mayo de 2008 de la Pontificia Universidad Católica de Chile, de un cuadro comparativo de las ventajas y desventajas de los tres sistemas actualmente existentes siendo el más ventajoso el propuesto que es a base de absorción química.

Existe un plan de trabajo diseñado como menciona (Cemex, Hacia una industria cementera sostenible, 2002), en el informe del Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD), “Hacia una industria cementera sostenible”, descrito en 2002 Memoria Medio Ambiental de Cemex España que incluye una agenda de acciones. Entre esas acciones cabe destacar la creación de un protocolo para estimar de una forma homogénea las emisiones de CO₂ en todas las fábricas de cemento que forman parte del WBCSD, en cumplimiento de los compromisos de Kyoto.

La postura de Cemex (Cemex, Captación y Almacenamiento de Carbono, 2012) en la exploración de tecnologías de captación y almacenamiento de carbono (CAC) y su aplicación al proceso de producción de cemento lo deja claro en la actualización de su informe Captación y Almacenamiento de Carbono postura de Cemex del 20 de julio de 2012, de la urgencia ambiental de los procesos productivos intensivos en el uso de energía y el tratamiento de los gases de escape.

3. OBJETIVOS

General

Evaluar la reducción de la emisión al ambiente de gases de efecto invernadero mediante la captura del CO₂ de los gases de escape como producto de la quema de combustibles fósiles en el calentamiento de hornos para la industria cementera.

Específicos

1. Identificar la necesidad de un sistema de captura poscombustión que reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria cementera.
2. Describir la tecnología utilizada en procesos de captura y almacenamiento de CO₂ en la quema de combustibles fósiles y sus beneficios al medioambiente.
3. Determinar la factibilidad técnica y económica de la implementación del proceso poscombustión de captura de CO₂ para los hornos de la industria cementera.
4. Estimar la cantidad de CO₂ emitido que sería mitigado con la implementación del proyecto.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El cambio climático es considerado una de las amenazas más serias para el ambiente, el cual requiere una solución inmediata. Si bien es cierto el cambio global tiene un ciclo natural, muchos de estos cambios se generan debido a los gases de efecto invernadero que en su mayoría son de origen antropogénico. El CO₂ es el principal gas contaminante y más común causante del deterioro de la capa de ozono.

Si se considera que las emisiones de CO₂ que la industria cementera genera al ambiente es de alrededor del 5 % mundial, con la tecnología de captura estamos aplazando las emisiones directas al ambiente, permitiendo que los sumideros capturen de forma natural el CO₂ luego de su procesamiento.

A pesar de los esfuerzos de la industria cementera guatemalteca por reducir sus emisiones de CO₂, las cuales tienen un impacto perjudicial al cambio climático, se tiene la necesidad de evaluar la implementación de un proceso poscombustión para la captura de CO₂ el cual ayude a mitigar significativamente la emisión de este gas de efecto invernadero.

Por lo tanto el presente trabajo puede ser un aliciente para el desarrollo y futura ejecución de dicha tecnología en investigación, esto justifica el caso para ser estudiado en una tesis que se encuentra dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, principalmente en la línea investigativa de Gestión y políticas energéticas

ambientales del área de formulación, gestión, seguimiento y evaluación de proyectos.

5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera trae graves consecuencias para todos los países, especialmente los que basan su economía en la agricultura y por ser Guatemala un país forestal se ve afectado directamente.

Los cambios de temperatura y precipitación excesiva, la elevación del nivel del mar, se traducen en alteraciones de las enfermedades tropicales en la región, cambios drásticos en los ecosistemas naturales, constituyen estos algunos de los impactos esperados que conllevan un alto costo humano y económico a Guatemala en particular y en general a prácticamente toda la tierra.

El CO₂ es el principal gas que provoca el efecto invernadero, las emisiones de CO₂ en la industria cementera guatemalteca han mostrado una tendencia de disminución en los últimos años. Hasta la fecha han logrado reducir la emisión de CO₂ por cada tonelada de cemento producido en aproximadamente 18 %, comparado con las emisiones de 1990. (Progreso, 2013).

Esto es un indicador de que es necesaria la evaluación de la tecnificación de la captura bajo métodos actualmente en estudio para reducir el impacto de las emisiones de CO₂ en el medio ambiente.

Dentro de las tecnologías emergentes se encuentra que en Guatemala es posible aplicar la captura de CO₂ en procesos poscombustión en el calentamiento de hornos en la industria cementera siendo ésta la que mayor emisión tiene del mismo. En tal sentido hace necesario investigar la aplicación de este sistema y nos surgen ciertas preguntas de investigación:

- ¿Por qué es necesaria la implementación de un sistema de captura poscombustión para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria cementera?
- ¿Qué tipo de tecnología es la utilizada en procesos de captura y almacenamiento de CO₂ en la quema de combustibles fósiles y cuáles son sus beneficios al medioambiente?
- ¿Es factible técnica y económicamente la implementación del proceso poscombustión de captura de CO₂ para los hornos de la industria cementera?
- ¿Qué cantidad de CO₂ emitido sería mitigado con la implementación del proyecto?

6. ALCANCES

Los alcances que pretende el siguiente estudio de investigación están dirigidos específicamente a las áreas investigativas esperando obtener:

- Descripción de la tecnología de captura de CO₂ en proceso poscombustión.
- Explicar la reducción de gases de efecto invernadero mediante la captura de CO₂ de los gases de escape de los hornos en la industria cementera.

Se estima abarcar la problemática de la emisión de gases de efecto invernadero específicamente CO₂ y que faciliten una solución para reducir el impacto ambiental en el medio.

Tabla I. **Alcance de la solución**

Problema	Alcance de la solución
Desconocimiento del tema	Descripción de las tecnologías de captura aplicables a los sistemas de escape ya existentes
Falta de documentación de la implementación a la industria cementera	Dar a conocer las ventajas técnicas y la factibilidad económica para esta industria
Emisión de gases de efecto invernadero	Mostrar los beneficios al ambiente del sistema de captura propuesto

Fuente: elaboración propia.

Esta evaluación de la reducción de los gases de efecto invernadero mediante la captura de CO₂, se dirige a nivel nacional con el fin de mitigar el daño causado al medio ambiente reflejado en el clima el cual afecta las áreas más vulnerables del país, como la agricultura, la salud y la infraestructura.

Se espera que esta evaluación alcance un interés a nivel medioambiental y empresarial en donde se facilite una solución mediante la aplicación de esta tecnología y poder contribuir a la huella de carbono, siendo algunas industrias que puedan aplicar en sus áreas técnicas la captura poscombustión, las siguientes:

- Cementeras
- Metalúrgicas
- Blockeras
- Alimenticias
- Procesadoras de gases
- Carboneras
- Centrales de energía

Siendo de interés investigativo también para:

- Ingenieros mecánicos e ingenieros ambientales
- Estudiantes de ingeniería
- Estudiantes de posgrado de las universidades del país

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

7.1. Efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno natural, el cual provoca un calentamiento de la atmósfera en sus capas bajas; los gases que lo producen se denominan de efecto invernadero, compuestos naturales de la atmósfera donde su concentración y distribución está regulada por los ciclos de carbono y nitrógeno. (Morales & Torres, 2008).

El importante crecimiento económico en nuestra sociedad desde mediados del siglo pasado ha estado asociado a un notable aumento del consumo energético, basado en un modelo energético centrado en el uso de combustibles fósiles, lo que ha conllevado un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La problemática generada como consecuencia del aumento del CO₂, principal gas causante del efecto invernadero, ha obligado a tomar iniciativas que traten de reducir o evitar que el CO₂ de las emisiones antropogénicas de los grandes centros de combustión alcance la atmósfera. (Grupo de Trabajo Conama 10).

Muchos científicos consideran que parte de la solución a corto plazo consiste en capturar y almacenar el CO₂ proveniente de los procesos que crean las corrientes más grandes o más concentradas de CO₂. El desarrollo de estos sumideros de CO₂ creados por el hombre permitiría que el mundo siga utilizando sus recursos energéticos más económicos y abundantes, reduciendo al mismo tiempo sus emisiones de CO₂ de forma sustancial. (Benaceur, 2005).

7.2. Impacto ambiental a causa del desarrollo de la industria del cemento

La industria del cemento ha venido combatiendo a través de su historia con el intento por reducir su huella ambiental. Inevitablemente esta industria depende del uso intensivo en energía, por lo que ha introducido las técnicas de procesamiento de cooperación para reemplazar la quema de combustibles fósiles tradicionales. Estas técnicas hacen uso de los elementos combustibles de los residuos producidos en otros sectores, incorporándolos en porcentajes adecuados para no dañar la localidad del producto y ayudar al impacto ambiental.

La industria del cemento produce 5 % de las emisiones de dióxido de carbono (gas de efecto invernadero) generadas por el ser humano en todo el mundo. Por lo que sus objetivos a mediano y largo plazo son la reducción del dióxido de carbono. Además, emite contaminantes atmosféricos de criterio como óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono y material particulado, además de contaminantes tóxicos como ácido clorhídrico, tolueno, benceno y mercurio.

La fabricación de cemento portland requiere un importante consumo de energía térmica y eléctrica, ya que se precisan muy altas temperaturas para completar las reacciones químicas que conducen a la formación del clínker del mismo.

La fuente de energía predominante en este coprocesamiento es el petróleo coque (un subproducto del proceso de refinación de petróleo) y la industria de cemento del mundo utiliza hasta ahora el 70 % del coque (producido principalmente en América del Norte y del Sur). Con el enfoque del

uso de combustibles alternativos en un 17 % del requerido y adicionando elementos diferentes a los de la fabricación convencional, se logró un ahorro de 4 millones de toneladas de carbón y la prevención de 9,7 millones de toneladas de las emisiones de CO₂ en Europa.

Debido al avance de la tecnología en maquinaria y elementos usados como materia prima en las fábricas, la energía específica requerida se ha visto sensiblemente reducida en los últimos años. Entre 1973 y 1988 la energía específica necesaria para producir clinker disminuyó desde 4,750 MJ/t de clinker a 3,750 MJ/t. Desde entonces, la energía específica no ha sufrido cambios, es decir que se ha mantenido más o menos constante.

Adicionalmente, la industria cementera es también una industria contaminante, ya que explota recursos naturales (canteras) y emite a la atmósfera una gran cantidad de gases contaminantes (CO₂, SO₂, NO_x). Las emisiones de CO₂ están asociadas a la descarbonatación de las calizas, ya que el carbono es el constituyente mayoritario del crudo de cemento (superando el 60 % de la emisión total). Los restantes gases contaminantes son emitidos durante la combustión de los combustibles fósiles utilizados en las plantas cementeras. (Díaz, 2012).

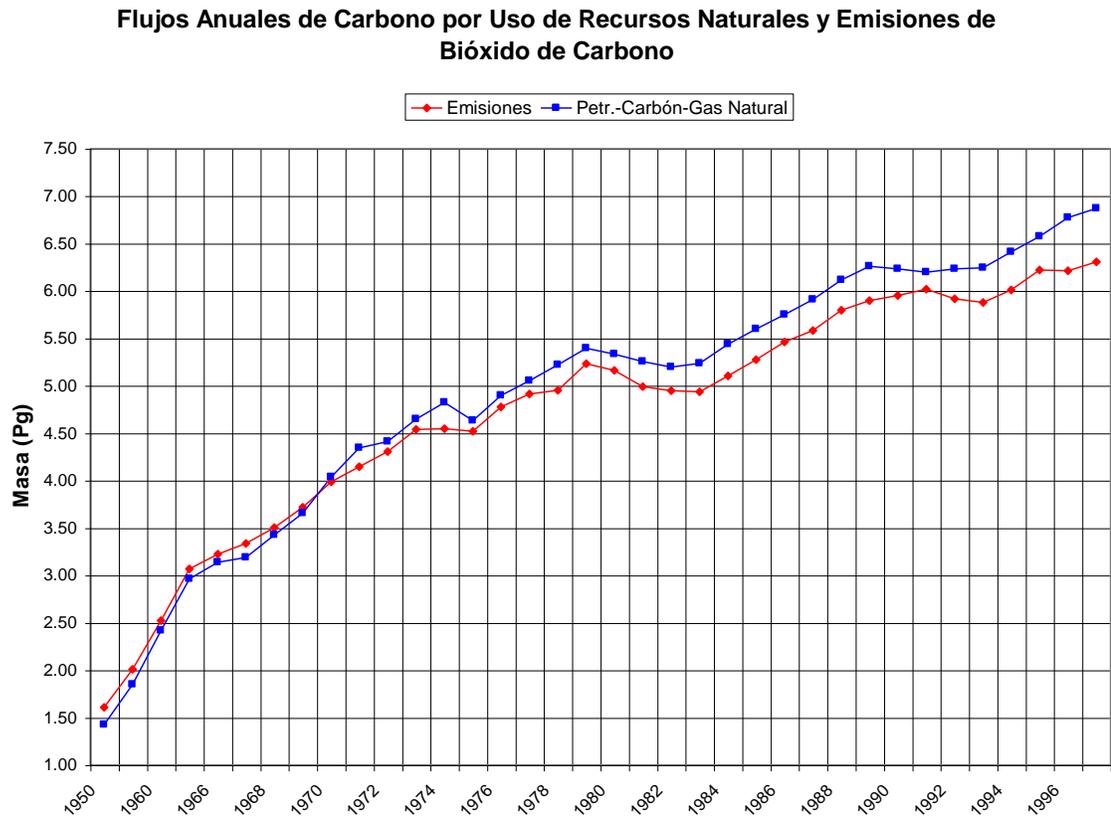
7.2.1. Uso de combustibles fósiles como fuente energética y acumulación de CO₂ en la atmósfera

Se ha inferido que la génesis de los combustibles fósiles se debe a la actividad biológica a través de tiempos inmemoriales, de acuerdo a esta inferencia el bióxido de carbono fue capturado de la atmósfera primitiva y como producto de desecho de esta actividad se generó oxígeno. Con la muerte de los organismos vivos y su oclusión en el manto terrestre, debido a los movimientos

tectónicos, se fueron generando el carbón, petróleo y gas natural. La escala de tiempo para tal generación es del orden de centenas de millones de años. A partir de la Revolución Industrial y sobre todo del siglo XIX se inicia el uso acelerado de combustibles fósiles, por lo que se puede asegurar que en un intervalo de 200 años el hombre se ha apropiado de los recursos energéticos fósiles y ha retornando el CO₂ a la atmósfera mucho más rápido si lo se compara con la tasa de formación de los combustibles. Afortunadamente una cierta porción del CO₂ emitido a la atmósfera por el uso de los combustibles fósiles es nuevamente fijado por la biota o los mares y secuestrado del aire.

En la siguiente figura se aprecia la correlación que existe entre la emisión y el uso de los combustibles, (Brown et al 1998) la diferencia puede deberse a que no todos los recursos energéticos producidos se destinan al uso de combustibles. (Lozano, 2001).

Figura 1. **Flujos anuales de carbono**



Fuente: LOZANO, 2001. p. 11.

7.2.2. **Apropiación de recursos naturales, ecoeficiencia de materiales y de energía, desperdicio energético y mejora tecnológica**

La industria del cemento es un ejemplo interesante para analizar, dado que su contribución a la emisión de CO₂ proviene de dos fuentes dentro del proceso. La primera es la transformación química de la materia prima que se usa para la manufactura, ya que parte de ella es piedra caliza (carbonato de calcio) la cual se descompone térmicamente a CO₂ y óxido de calcio a las

temperaturas de operación en los hornos de cemento. La segunda está representada por la combustión del energético usado, el cual normalmente es de tipo fósil, ya sea uno sólo o una mezcla.

La contribución química a la emisión es casi imposible de hacerla disminuirse o desaparecerse, ya que depende de la materia prima y podríamos para efectos del presente análisis considerarla fija. El orden de magnitud es de 0,48 T de CO₂ por cada T de cemento producido con datos de 1995, véase tabla II.

Tabla II. **Generación de CO₂ asociado a la producción de cemento hidráulico**

(Miles de Toneladas métricas = Gigagramos)

	Cemento hidráulico ¹	CO₂ producción ²	por	Relación entre CO₂ [Prod.] / cemento
	1995	1995		1995
				kg/kg
Alemania	37,480	19,932		0.5318
Arabia Saudita	15,773	7,973		0.5055
Argentina	5,447	3,189		0.5855
Australia	6,500	2,990		0.4600
Brasil	28,256	12,707		0.4497
Canadá	10,440	5,343		0.5118
Corea	55,130	27,472		0.4983
Corea del Norte	17,000	1,334		0.0785
China	475,910	222,049		0.4666
Egipto	17,665	7,973		0.4513

Continuación de la tabla II.

España	26,423	12,458		0.4715
EUA	78,320	38,323		0.4893
Filipinas	10,600	4,883		0.4607
Francia	19,692	10,464		0.5314
Gran Bretaña	11,805	6,229		0.5277
Grecia	12,500	5,980		0.4784
India	62,000	34,881		0.5626
Indonesia	23,129	9,717		0.4201
Irán	16,300	8,122		0.4983
Italia	33,715	17,441		0.5173
Japón	90,474	45,084		0.4983
México	23,366	11,945		0.5112
Polonia	13,884	6,918		0.4983
Rusia	36,500	18,138		0.4969
Tailandia	34,900	13,205		0.3784
Taiwan	22,478			0.0000
Turquía	33,153	16,520		0.4983
Ucrania	7,600	5,481		0.7212
Total	1,443,328	687,927		0.4766

Fuente: LOZANO, 2001. p. 27.

Las mejoras tecnológicas a los procesos de producción de cemento han disminuido el consumo energético. Haciendo uso de los datos publicados para el consumo de energéticos, excluyendo la electricidad y tan sólo considerando los combustibles fósiles, se está en posición para estimar las emisiones de CO₂

adicionales por combustión. Siendo el total de emisiones de CO₂ la suma de la parte de producción (química) y la parte de uso de combustibles fósiles. El análisis lo haremos para los siguientes países: Brasil, Canadá, Estados Unidos de América y México, cuyos datos se observan en la tabla III. (Lozano, 2001).

Tabla III. **Índice de CO₂ asociado a la producción de cemento hidráulico, incluyendo combustibles**

	Cemento Producido	Energía utilizada	Índice de uso Energético. Energía/Masa Cemento	CO ₂ Producido por calcificación	CO ₂ Producido por combustible	CO ₂ Total	Año	CO ₂ Total <i>Producido por masa de producto</i>
	x10 ³ ton métrica	Petajoules	kJ/kg	Gigagramo	Gigagramo	Gigagramo		kgCO ₂ /Mg cemento
México	23,971	90.463	3,774	11,945	5,688	17,633	1995	736
EUA	79,353	344.778	4,345	38,323	27,137	65,460	1994	825
Canadá	10,722	56.400	5,260	5,343	9,200	14,543	1995	1,356
Brasil	25,500	134.387	5,270	12,707	7,123	19,830	1995	778

Fuente: LOZANO, 2001. p. 28.

7.3. La industria cementera y su relación con el medio ambiente

La producción convencional de cemento puede ocasionar algunos problemas ambientales:

- Erosión del área de las canteras por la extracción continua de la piedra caliza y otros materiales.
- Producción de polvos provocados por el triturado de la piedra en la planta.

- Emisión de contaminantes al aire (monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas muy finas) dependiendo del tipo de combustible y proceso empleado durante la calcinación en el horno (combustión).
- El polvo de los residuos del horno forma el llamado clínker, que puede contener metales pesados y otros contaminantes. Si el polvo del clínker se desecha en las canteras donde se extrajo la piedra caliza o en un relleno sanitario puede contaminar los mantos de aguas subterráneas. (Orellana, 2007).

El volumen físico de la producción industrial en el mundo ha crecido aceleradamente en las últimas décadas y Guatemala ha sido un modelo en este sector en el área centroamericana, al grado que en la segunda mitad del siglo XX se han empleado más recursos naturales en la producción de bienes de consumo que en toda la historia anterior de la humanidad. Esto se ha traducido en una enorme presión sobre los recursos naturales y ha incrementado significativamente los problemas de contaminación local, tanto por los efectos directos de la fabricación de satisfactores como por su consumo. El consumo y la producción de cemento están ligados directamente a la actividad constructiva (pública y privada) en cada momento, y por lo tanto sigue una evolución muy homogénea a la situación económica general. (Orellana, 2007).

7.4. Qué es la captura y almacenamiento de CO₂, y cómo podrían contribuir a la mitigación del cambio climático

La captura y el almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂) (CAC) constituyen un proceso consistente en la separación del CO₂ emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera. Se considera la CAC como

una de las opciones de la cartera de medidas de mitigación para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. La captura de CO₂ puede aplicarse a grandes fuentes puntuales. Entonces, el CO₂ sería comprimido y transportado para ser almacenado para ser utilizado en procesos industriales. (Bert Metz, 2005).

Estudios determinaron que, en los próximos 100 años, la captura y almacenamiento de CO₂ podría disminuir el costo de la mitigación del cambio climático en un 30 % o más. También llegaron a la conclusión de que los sistemas basados en captura y almacenamiento del CO₂ serán competitivos con otras tecnologías de gran escala, tales como las tecnologías basadas en la energía nuclear y las energías renovables. Otro atractivo de la CAC es que puede completar y facilitar el despliegue de otras tecnologías posiblemente importantes que podrían reducir las emisiones de CO₂ a largo plazo. Entre estas pueden mencionarse las instalaciones que, empleando poco o ningún carbono, producen hidrógeno a partir de combustibles carbonosos para el sector del transporte, y los sistemas de energía de biomasa a gran escala, que dotados con la técnica de captura y almacenamiento de CO₂, pueden de hecho llegar a "emisiones de CO₂ negativas", desde el momento en que la biomasa creada de formas sostenible elimina CO₂ de la atmósfera. (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006).

7.5. Tecnologías para capturar el CO₂

La preocupación de las potencias mundiales ante los informes de cambio climático y efecto de las emisiones de CO₂ generó gran interés en la investigación de tecnologías eficientes de captura, desarrollándose rápidamente métodos eficientes para implementar en las industrias intensivas en energía,

responsables de casi el 50 % de las emisiones de este gas en la Unión Europea.

La capacidad técnica de remover CO₂ de las fuentes puntuales de emisión se ha establecido; sin embargo actualmente son muy pocas las manifestaciones en gran escala de esta tecnología, principalmente por los costos que implica y en la mayoría de los casos las tecnologías individuales no han sido integradas al nivel que estaba previsto. De esta manera, si bien teóricamente se puede superar el índice de captura de emisiones, el enfoque actual de las investigaciones está en optimizar económicamente los procesos utilizados en la actualidad. (Morales & Torres, 2008).

Tipos de captura de CO₂

- Captura de CO₂ en precombustión

La separación se basa en la descarbonización del combustible antes de la combustión mediante técnicas de gasificación del carbón o reformado del gas natural.

Este sistema está muy relacionado con la producción de hidrógeno, el cual es un agente muy importante en distintos procesos, entre los cuales se incluyen:

- Generar energía eléctrica o calor (produciéndose únicamente vapor de agua).
- La síntesis de amoníaco
- La producción de fertilizantes
- Los hidroprocesamientos en las refinerías de petróleo

Básicamente consiste en producir, a partir de gas natural o gas sintético (proveniente de la gasificación de carbón u otros hidrocarburos), una mezcla gaseosa compuesta principalmente del hidrógeno mencionado H₂ y CO₂ para posteriormente separar estos dos gases. (Camacho, 2011)

- Captura de CO₂ en poscombustión

Este tipo de captura implica la separación del CO₂ producido en una combustión. Se requiere esta separación porque no es factible la captura de todos los gases de escape de la combustión debido, entre otras cosas, a los altos costes de compresión y almacenamiento. La captura de CO₂ en poscombustión es en muchos aspectos similar al proceso de desulfuración de los gases que ya se lleva a cabo habitualmente para la captura del CO₂ producido en las combustiones de carbón o petróleo. (Rillo, 2011).

Las bajas concentraciones de CO₂ de los gases de escape de combustión (normalmente entre el 4 y el 14 %) implican que ha de tratarse un gran volumen de gases, lo que supone altos costes y equipos de gran tamaño. Cuando se utiliza un solvente para la captura de CO₂ se requiere una importante cantidad de calor para su regeneración. Este calor puede generarse en la misma planta o importarse. Cuando se genera *in situ*, el CO₂ producido por esta generación de calor también debe ser capturado; en estos casos la elección del combustible necesario tiene una gran influencia en el rendimiento técnico y económico de la captura de CO₂. A pesar de esta dificultad, la captura en poscombustión tiene el mayor potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a corto plazo, debido a que puede ser utilizado en plantas existentes que generan dos tercios de las emisiones de CO₂ del sector energético. Existen varias tecnologías de separación de CO₂ que pueden ser empleadas en la captura en

poscombustión, como la absorción química, la separación con membranas y la destilación a baja temperatura. (Rillo, 2011).

- Captura de CO₂ en oxi-combustión

Este proceso se realiza durante la combustión y tiene un largo recorrido como tecnología aplicada. Básicamente consiste en la utilización de oxígeno en lugar de aire para la combustión, de ahí que los gases de escape están compuestos principalmente de H₂O y CO₂, que puede separarse fácilmente del vapor de agua mediante condensación. (Morales & Torres, 2008).

7.6. Transporte del CO₂

En esta sección se describen los aspectos técnicos y económicos del transporte de CO₂ a través de tubos en forma supercrítico, pero también a tanques estacionarios para su posterior traslados a plantas de distribución y llenado en estado líquido refrigerado. (Morales & Torres, 2008).

Aspectos básicos a tener en cuenta en el futuro diseño de infraestructuras de transporte de CO₂.

Las características físico-químicas del CO₂ de origen antropogénico es necesario tener en cuenta las particularidades del mismo, con objeto de adaptar el diseño de las mismas a su singularidad.

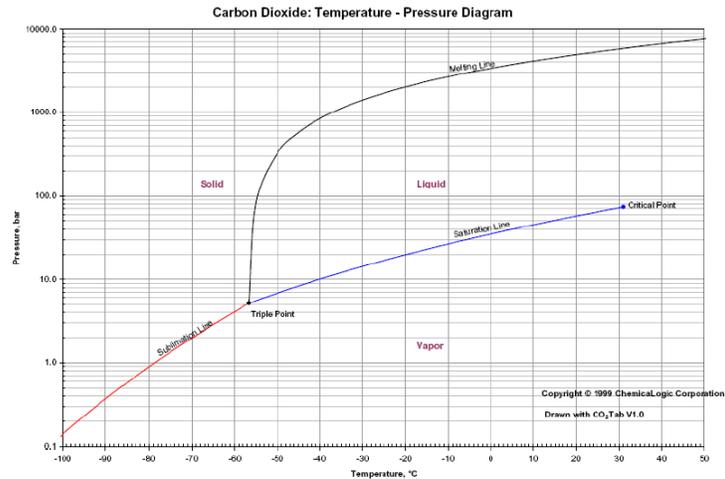
Un aspecto importante a tener en cuenta es la peligrosidad del CO₂, dado que dependiendo de la concentración y su difusividad en el aire se encuentra categorizado como sustancia tipo “C” de acuerdo al estándar ISO 13.623. Es por tanto un fluido muy tóxico a temperatura ambiente, en proporciones

superiores al 5 %. Esta particularidad es determinante a la hora de definir los futuros trazados de las tuberías de transporte.

Otro aspecto a tener en cuenta es que, para favorecer el transporte y aprovechar la hidraulicidad óptima del fluido, es importante evitar la posible formación de fluidos bifase, para lo cual las condiciones de presión y temperatura más óptimas para el CO₂ serán aquellas que se encuentren próximas al denominado estado “supercrítico”, las cuales implican temperaturas superiores a los 32,3 °C y presiones por encima de 74 bar. En esta condición, no son previsibles cambios de fase en el fluido, facilitando su operación.

En esa condición de supercrítico, el CO₂ presenta la difusividad de un gas y la densidad de un líquido, lo cual lo hace óptimo para el transporte a larga distancia, el principal problema que se presenta es mantener el estado supercrítico durante todo el proceso de transporte, lo cual en carecería mucho este tipo de instalaciones, por el tipo de aislamiento requerido para las conducciones. (Ver diagrama de fases CO₂).

Figura 2. Diagrama de fases del CO₂



Fuente: Conama, 2009. p. 77.

Teniendo en cuenta el coeficiente de intercambio térmico terreno – tubería, es previsible que la temperatura a la cual tengamos el CO₂ durante la mayor parte del proceso de transporte, sea en una temperatura alrededor de los 12 °C, que es la temperatura del terreno, lo cual lleva a la necesidad de garantizar que la presión de transporte este alrededor de los 100 bar, dependiendo de la longitud de la tubería. En esa condición, el fluido se encuentra en una fase conocida como “densa”, que sin llegar a estar en condiciones supercríticas, se aproxima mucho a ese estado.

Otros factores a tener en cuenta en el diseño de las futuras redes de transporte de CO₂, será la mayor o menor presencia de impurezas acompañando al CO₂, que condicionarán su comportamiento termodinámico e hidráulico. Sobre todo el control de la posible presencia de H₂O es fundamental, ya que además de incrementar la posibilidad de formación de hidratos, complicando el transporte del fluido, puede ser un agente determinante en la

durabilidad de las tuberías de acero, por problemas de corrosión y posible formación de ácidos carbónicos que ataquen a los revestimientos de protección de las tuberías.

Adicionalmente hay otros problemas que a fecha de hoy se encuentran en una fase incipiente de desarrollo o incluso en fases muy preliminares de ensayo e investigación como son:

- Caracterización mecánica de los aceros aptos para el transporte de CO₂, sobre todo en lo relativo a la tenacidad ante la fractura.
- Velocidad de descompresión de tuberías de transporte de CO₂ y su interacción en las propiedades mecánicas de los aceros comerciales.
- Simuladores hidráulicos, estáticos y dinámicos, adecuados para mezclas de CO₂ variables en composición. Sistemas comerciales de control de fugas.
- Otros posibles efectos adversos que puedan generar las impurezas sobre el acero, como son: el HCC (Hydrogen Corrosion Cracking) y SSC (Stress Corrosión Cracking), asociados a la presencia de hidrógeno y azufre en la corriente de CO₂.
- Posibles efectos hidráulicos no estudiados en este fluido como son los golpes de ariete y efecto de la altitud en el fluido.
- Uso y efecto del CO₂ en plásticos y elastómeros para juntas, uniones, etc.

7.7. Almacenamiento provisional o en reservorios

Se entiende por almacenamiento provisional de CO₂ a la retención del gas en tanques tras ser capturado en cualquiera de los procesos anteriormente descritos dentro de la misma central térmica. Se denomina provisional porque después el CO₂ debe ser transportado para darle un uso definitivo.

El dióxido de carbono es un gas no inflamable, no tiene color ni olor y se puede encontrar en estado líquido o gaseoso. Este gas es aproximadamente 1,5 veces más pesado que el aire, por lo que tiende a bajar a la superficie de la tierra. El dióxido de carbono es un componente minoritario de la atmósfera, en promedio, la atmósfera contiene 0,03 % o 300 ppm (partes por millón), por volumen. Debido a que el dióxido de carbono es un gas relativamente inerte, no se requieren recipientes hechos de materiales especiales para su almacenamiento. Sin embargo, en altas concentraciones, ante la presencia de humedad se puede formar ácido carbónico, por lo que es necesario utilizar materiales resistentes a éste ácido.

El dióxido de carbono no es tóxico, pero puede producir asfixia al disminuir la cantidad de oxígeno en el aire a niveles inferiores a los requeridos para la vida. También puede crear atmósferas peligrosas de forma inmediata. En concentraciones superiores al 1,5 %, este gas puede causar hiperventilación, dolor de cabeza, trastornos visuales, temblor, pérdida de la conciencia y en casos extremos, la muerte.

Cuando la velocidad del CO₂ en circulación es muy elevada, o la presión de almacenamiento muy baja, la temperatura del gas se acerca al punto de ebullición, situados a -78,5 °C, para una presión de 5,24 bar. Si este punto se rebasa, parte del gas condensa y puede aparecer lo que vulgarmente se

conoce como hielo seco. Cuando se prevea estas condiciones de circulación no usar materiales para tuberías de conducción o depósitos que se vuelvan quebradizos o frágiles a bajas temperaturas.

Las tuberías y recipientes para manejar el CO₂, deben estar diseñadas bajo las normas adecuadas, como la norma ASME (Asociación de Ingenieros Mecánicos), o de la DOT (Departamento de Transportación de EE UU), de acuerdo con la presión y temperatura a la que serán expuestos.

Por ejemplo siguiendo la norma ASME, el dióxido de carbono en estado líquido puede almacenarse en grandes recipientes con capacidades de 5 toneladas en adelante. El líquido dentro del tanque de almacenamiento se mantiene a presiones entre 17,22 kg/cm² (245 psig) y 21,44 kg/cm² (305 psig). Si la presión del tanque de almacenamiento sobrepasa los 21,44 kgs/cm², un sistema de refrigeración mecánica se activa para enfriar el contenido del tanque, reduciendo la presión hasta 20,74 kg/cm². Si la presión del tanque baja a un nivel inferior a 17,22 kg/cm², una parte del líquido pasa a una bobina de presurización que lo vaporiza y el vapor resultante se envía al espacio del vapor del tanque hasta que éste alcance una presión de 17,92 kg/cm².

Los tanques de almacenamiento de dióxido de carbono en grandes volúmenes se llenan utilizando pipas con dióxido de carbono líquido. El CO₂ también es bombeado en estado líquido a cilindros de alta presión que son llenados por peso. La cantidad de gas contenida en un cilindro, se obtiene multiplicando el peso del líquido por el volumen específico a 20 °C y a una presión de una atmósfera (0,5431 lt/gr = 8,7 pies³/lb).

La presión del vapor líquido almacenado en el cilindro a 20 °C es de 57,37 kg/cm² (816 lbs/pulg²).

El dióxido de carbono en grandes volúmenes es almacenado en tanques con capacidades de 6, 14, 26 y 50 toneladas. Estos tanques poseen un aislamiento de poliuretano con una barrera de vapor que provee protección contra el medio ambiente a la intemperie. Estos son fabricados en acero al carbón, de acuerdo a las normas ASME (Asociación de Ingenieros Mecánicos). El gas es mantenido a presiones inferiores a los 305 psig (21,4 kg/cm²), con una bobina de presurización que le permite ser almacenado por un periodo de tiempo indefinido, sin tener que ser venteado a la atmósfera. (Almacenamiento Provisional y Transporte de CO₂).

Tipos de unidades de almacenamiento de CO₂

Existen tanques de almacenamiento de diferentes modelos y tamaños. Los hay de aislamiento con uretano o aislamiento al vacío, unidades horizontales o unidades verticales. (NCM International, 2010).

Estas unidades de almacenamiento deben consistir en tanques de presión en acero soldado, construido y probado de acuerdo a los requerimientos del Código para Calderas y Tanques Presurizados, Sección VIII Div. I de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ("ASME" en Inglés). Se utiliza acero SA-12 de granos finos que ha sido normalizado para mejorar su fortaleza. Están diseñados para una presión operacional máxima ("MAWP" en inglés) de 350 psig (2,41 mPa) a una temperatura mínima de diseño ("MDMT" en inglés). En MDMT utilizado por TOMCO2 para el almacenamiento de bióxido de carbono líquido es de -20 F (-28,9 C), o menor. (Asco Carbon Dioxide LTD, 2013).

7.8. Aspectos técnicos

El análisis técnico de montaje y acoplamiento del sistema de captura poscombustión, se consideraran las instalaciones existentes en los gases de escape de los hornos para el acoplamiento del sistema, (Moscoso, 2007) (Cabrera, Romero, & Curbelo, 2012).

Principio básico

La planta de recuperación de CO₂ elimina las impurezas y baja la temperatura de las materias primas a través de una reacción química, absorción, fraccionamiento de la baja temperatura, filtrado, etc. (ZhuHai GongTong Mechanical Equipment Co., Ltd.).

Características

- La planta de recuperación de CO₂ está especialmente diseñada en línea con los gases de alimentación de los diferentes componentes. Por lo tanto, la inversión del equipo y el consumo de energía se reducen, mientras que el funcionamiento del equipo está también garantizado.
- El equipo se presenta con un diseño simple, ocupa una pequeña área y es de fácil instalar.
- La planta de recuperación de CO₂ adopta un sistema de control distribuido (DCS). Por lo tanto, es fácil de operar. Además esta, automáticamente puede funcionar durante 24 horas.

Aplicación

El equipo de recuperación de CO₂ hace un uso completo del CO₂ producido en el proceso de cemento, fertilizantes químicos, alcohol, producción de hidrógeno, y la generación de electricidad, etc. Por lo tanto, el equipo puede reducir eficazmente las emisiones de CO₂ y producir CO₂ apto para uso alimentario y de calidad industrial. Debido a la compatibilidad con el medio ambiente, la planta de recuperación de CO₂ debe ser aplicada extensamente en las industrias de bebidas, la soldadura, extinción de incendios, agricultura de invernadero, campo petrolífero, almacenamiento de alimentos, etc. De esta manera, puede ayudar eficazmente a controlar el efecto invernadero. (ZhuHai GongTong Mechanical Equipment Co., Ltd.).

8. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Es posible la captura el CO₂ por medio de un proceso de poscombustión para reducir la emisión directa al ambiente de los gases de efecto invernadero producidos por la quema de combustibles fósiles para el calentamiento de hornos en la industria cementera y además es técnica y económicamente factible la utilización del proceso propuesto.

9. CONTENIDO PROPUESTO DEL INFORME FINAL

1. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES
2. GLOSARIO
3. INTRODUCCIÓN
4. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN
5. OBJETIVOS
6. JUSTIFICACIÓN
7. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA
8. ALCANCES

9. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL
 - 9.1. Efecto invernadero
 - 9.2. Impacto ambiental a causa del desarrollo de la industria del cemento
 - 9.2.1. Relación de los combustibles fósiles con el fenómeno del cambio climático global
 - 9.2.2. Apropiación de recursos naturales, ecoeficiencia de materiales y de energía, desperdicio energético y mejora tecnológica
 - 9.3. La industria cementera y su relación con el medio ambiente
 - 9.4. Qué es la captura y almacenamiento de CO₂ y cómo podría contribuir a la mitigación del cambio climático
 - 9.5. Tecnologías para capturar el CO₂
 - 9.5.1. Tipos de captura de CO₂
 - 9.6. Transporte del CO₂
 - 9.7. Almacenamiento provisional o en reservorios

- 9.7.1. Tipos de unidades de almacenamiento de CO₂
- 9.8. Aspectos técnicos
 - 9.8.1. Principios básicos
 - 9.8.2. Características
 - 9.8.3. Aplicaciones
- 10. MÉTODOS Y TÉCNICAS
 - 10.1. Fase 1. Investigación preliminar
 - 10.2. Fase 2. Recolección de datos
 - 10.3. Fase 3. Análisis de la Información
- 11. RESUMEN
- 12. RESULTADOS
- 13. DISCUSIÓN DE RESULTADOS
- 14. CONCLUSIONES
- 15. RECOMENDACIONES
- 16. BIBLIOGRAFÍA
- 17. ANEXOS

10. MÉTODOS Y TÉCNICAS

10.1. Tipo de investigación

La línea de investigación del tema a estudiarse debido a los objetivos de mitigación ambiental planteados se clasificó como descriptivo no experimental; lo que se busca es evaluar la reducción de emisiones de CO₂ en la industria cementera del caso también se harán estudios exploratorios debido a que tenemos un caso poco o nada investigado en el sentido técnico comercial.

10.2. Tipo de hipótesis de investigación

La hipótesis de investigación planteada para este tema es una hipótesis descriptiva, ya que se describe como el sistema de captura propuesto reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente.

10.3. Metodología

Fase 1. Investigación preliminar

A. Obtención de permisos

El permiso será para obtener los datos específicos de la planta y del área que será de estudio, estos permisos determinarán el detallar en forma precisa el sistema de interface propuesto para su posterior adaptación, tipos de combustibles utilizados, cantidad de clínker producido, tiempos de producción, este permiso está en fase de tramite con el área de cumplimientos de normas

ISO de Cementos Progreso, de ser denegado el acceso a esta información se analizarán teóricamente basándose en información de plantas productoras de cemento internacionales.

B. Investigación documental

Para este inciso se analizarán las emisiones de CO₂ en forma teórica evaluando los datos obtenidos de industrias cementeras internacionales y nacionales, se hará un análisis técnico para su descripción operativa obteniendo teóricamente los siguientes datos:

- Consumos energéticos
- Tipos de combustibles
- Emisiones de CO₂
- Temperatura de operación
- Cantidad de operadores
- Producción diaria de clinker
- Estructura organizacional
- Planos estructurales

Fase 2. Diseño de investigación, métodos e instrumentación

A. Variables

Tabla IV. **Tipos de variables**

Variable	Tipo de Combustible	Tipo de Variable	Indicador	Dimensionales
Cantidad de CO ₂ capturado por el proceso post-combustión		Independiente	Cuantitativo	Toneladas de CO ₂
	Bunker	Dependiente	Cuantitativo	Toneladas de CO ₂
Cantidad de CO ₂ emitido en el proceso de combustión	Carbon	Dependiente	Cuantitativo	Toneladas de CO ₂
	Coque	Dependiente	Cuantitativo	Toneladas de CO ₂
	Gasóleo	Dependiente	Cuantitativo	Toneladas de CO ₂
	Gas Natural	Dependiente	Cuantitativo	Toneladas de CO ₂
Cantidad de CO ₂ almacenado posterior a su captura		Dependiente	Cuantitativo	Toneladas de CO ₂

Fuente: elaboración propia.

B. Recolección de datos

Los valores obtenidos teóricamente de fuentes nacionales e internacionales se tabularán para llevar un registro de las emisiones con las cuales se obtendrá el dato del CO₂ que se espera capturar por corridas de

producción dependiendo el tipo de combustible fósil utilizado en el calentamiento de los hornos.

Se hará un análisis comparativo con industrias similares que servirá para estudiar las metodologías utilizadas y las conclusiones alcanzadas por este proceso de captura.

Mediciones

Variable

A. Cantidad de CO₂ emitido en el proceso de combustión

Clasificación por sistema (bunker, carbón, coque, gasóleo y gas natural)

a) Temperatura de los gases de escape de los hornos

Método: (sistema automatizado para determinar la temperatura de los gases de salida en la chimenea)

Instrumentación: PLC, transductores de temperatura, software experimental

Dimensionales: grados centígrados

Tabla V. **Características de los gases emitidos**

Tipo de combustible	Características de los gases emitidos		
	Temperatura de los gases de escape (grados centígrados)	Cantidad de CO ₂ (ton)	Duración de la producción (horas, minutos)
Bunker			
Carbon			
Coque			
Gasóleo			
Gas Natural			

Fuente: elaboración propia.

- b) Flujo másico y volumétrico sobre la cantidad de CO₂ emitido en el manifold de escape para diseñar las dimensiones del sistema que capturara el CO₂ en la salida

Método: (medición *in situ*)

Instrumentación: flujometro electrónico para altas temperaturas con memoria y graficador de comportamiento

Dimensionales: Presión (bar)

Masa (kg)

Volumen (metros cúbicos)

Tabla VI. **Volumen y densidad de los gases de escape**

Tipo de combustible	Volumen de los gases de escape (SCFM)	Densidad de los gases de escape (kg/m ³)	Diámetro de tubería en la salida (mts)
Bunker			
Carbon			
Coque			
Gasóleo			
Gas Natural			

Fuente: elaboración propia.

c) Eficiencia del sistema de combustión

Método: scanner para determinar compuestos en la salida de los gases de escape y determinar la eficiencia en quemado de combustible

Instrumentación: sonda detectora de productos de la combustión

Dimensionales: % de nitrógeno, % de CO₂, % de CO, % de hidrocarburos

Tabla VII. **Caracterización de los gases emitidos**

Tipo de combustible	Caracterización de los gases emitidos			
	% de Nitrógeno	% de CO ₂	% de CO	% de hidrocarburos
Bunker				
Carbon				
Coque				
Gasóleo				
Gas Natural				

Fuente: elaboración propia.

Variable

B. Relación de CO₂ capturado por CO₂ almacenado en forma líquida

a) Porcentaje de gasificación en tanques de almacenamiento

Método: caracterización del CO₂ de la gasificación diaria por estar licuado y así determinar la eficiencia de los tanques de almacenamiento

Instrumentación: Manómetros metrológicamente calibrados

Medidor de nivel por diferencial de presión

Dimensionales: kilogramos (kg)

libra sobre pulgada cuadrada (PSI)

Tabla VIII. **Eficiencia en el sistema de captura**

Tipo de combustible	Datos de eficiencia del sistema de captura				
	CO ₂ emitido (ton)	CO ₂ capturado (ton)	CO ₂ almacenado (ton)	Eficiencia en el proceso	Reducción en la emisión directa al medio ambiente
Bunker					
Carbon					
Coque					
Gasóleo					
Gas Natural					

Fuente: elaboración propia.

Fase 3. Análisis de la información, tabulación y representación grafica de los datos

Con los datos obtenidos se efectuará un análisis estadístico de tipo observacional para conocer la tendencia central de reducción de los gases de efecto invernadero para evaluar efectos del cambio climático en series de tiempo se basaran en la guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible CEPAL, al igual que estará basado en el análisis de los índices por medio del paquete informático basado en hojas de cálculo estadístico SIGMAPLOT 12.1 del cual se obtendrá gráficas referentes a: moda, mediana, media aritmética, rango, desviación estándar, varianza, análisis factoriales, de esto elaborará una bitácora estadística la cual determinará las

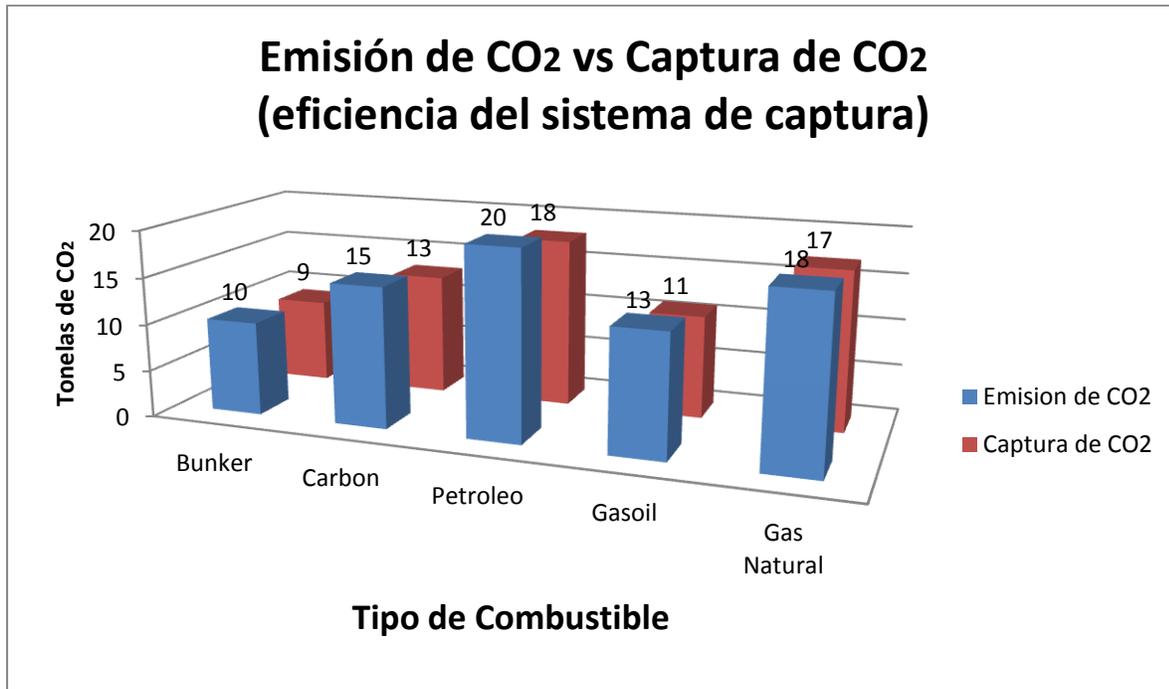
tendencias de las variables para concluir si el proyecto de la evaluación de la reducción de los gases de efecto invernadero mediante la captura de CO₂ será factible técnica y económicamente. (Quiroga, 2009).

Se obtendrá una relación:

- Tipo de combustible
- emisión de CO₂ a capturar
- CO₂ almacenado en estado líquido

Con los datos y la relación arriba descrita se procede al análisis económico, a través de la Tasa Interna de Rentabilidad y el Valor Actual Neto para obtener los costos por tonelada capturada en reservorio y se hará una comparación real con los precios en el mercado de la tonelada de CO₂, para así sacar las conclusiones de la factibilidad económica del proyecto. (Rodas, 2013).

Figura 3. Eficiencia del sistema de captura



Fuente: elaboración propia.

Período de retorno de la inversión

Es el número de años que la empresa tarda en recuperar la inversión. Este método selecciona aquellos proyectos cuyos beneficios permiten recuperar más rápidamente la inversión, es decir, cuanto más corto sea el periodo de recuperación de la inversión mejor será el proyecto, generalizando:

Tabla IX. **Período de retorno de inversión**

Período retorno años	Riesgo aceptado
1-3	Alto
4-7	Medio
8-12	Bajo

Fuente: elaboración propia.

Valor Actual Neto (VAN)

Permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. (Gava, Roperó, Serna, & Ubierna, 2008).

La fórmula que nos permite calcular el Valor Actual Neto es:

$$\text{VAN} = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

(Gava, Roperó, Serna, & Ubierna, 2008).

Donde:

V_t representa los flujos de caja en cada período t .

I_0 es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n es el número de períodos considerado.

El tipo de interés es k . Si el proyecto no tiene riesgo, se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico. En otros casos, se utilizará el coste de oportunidad.

Cuando el Valor Actual Neto toma un valor igual a 0, k pasa a llamarse TIR (Tasa Interna de Retorno). La Tasa Interna de Rentabilidad es la utilidad que está proporcionando el proyecto.

$VAN > 0$	El proyecto supera la rentabilidad exigida
$VAN < 0$	El proyecto no supera la rentabilidad exigida.

Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

Se denomina a la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto de una inversión sea igual a cero.

Este método considera que una inversión es aconsejable si la Tasa Interna de Rentabilidad resultante es igual o superior a la tasa exigida por el inversor, y entre varias alternativas, la más conveniente será aquella que ofrezca una Tasa Interna de Rentabilidad mayor.

La T.I.R. es un indicador de rentabilidad relativa del proyecto, por lo cual cuando se hace una comparación de tasas de rentabilidad interna de dos proyectos no tiene en cuenta la posible diferencia en las dimensiones de los mismos. Una gran inversión con una T.I.R. baja puede tener un V.A.N. superior a un proyecto con una inversión pequeña con una T.I.R. elevada.

11. RESULTADOS ESPERADOS

Que el aplazamiento en la emisión de CO₂ que se está obteniendo con esta captura poscombustión sea importante para contribuir a los sumideros naturales y así beneficiar al medio ambiente.

Según las referencias bibliográficas esperamos obtener que la tecnología de captura de CO₂ en procesos de poscombustión sea completamente eficiente llegando a valores significativamente altos.

El enlace que se pretende entre variables como lo es tonelada emitida de CO₂ versus tonelada capturada de CO₂ sea un punto interesante para comparar las tecnologías que son las principales fuentes de captura hasta la fecha.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

TIEMPO EN MESES	Agosto 2013				Septiembre 2013				Octubre 2013				Noviembre 2013			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ACTIVIDAD SEMANAL	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
FASE 1	Obtención de permisos															
	Investigación preliminar															
	Elaboración de plan de pruebas															
FASE 2	Medición de CO ₂ emitido por clinker producido															
	Medición de combustible consumido por clinker producido															
	Medición de flujos másicos y volumétricos de gases de escape															
FASE 3	Análisis de la información															
	Presentación de resultados															

13. RECURSOS NECESARIOS

Tabla X. Recursos para proyecto

RECURSOS HUMANOS	COSTO POR HORA	TOTAL 4 MESES
Asesor (2 horas semanales)	Q 200,00	Q 6 400,00
Estudiante (5 horas semanales)	Q 100,00	Q 8 000,00
Imprevistos		Q 1 000,00
TOTAL RECURSOS		Q 15 400,00
MATERIALES E INSUMOS	COSTO POR PRUEBA	TOTAL 4 MESES
Laboratorio (2 pruebas semanales)	Q 150,00	Q 4 800,00
Fabricación de prototipo		Q 3 000,00
	TOTAL MATERIALES E INSUMOS	Q 7 800,00
	GRAN TOTAL	Q 23 200,00

Fuente: elaboración propia.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Agüero, R. (2012). Proceso de Captura y Almacenamiento de Dióxido de Carbono. Roma.
2. Almacenamiento Provisional y Transporte de CO₂. (s.f.). Recuperado el 04 de abril de 2013, de [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4355/fichero/Analisis De La Tecnologia De Reduccion Efectiva De Emisiones De%252F4 Almacenamiento Provisional y Transporte De CO₂.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4355/fichero/Analisis%20De%20La%20Tecnologia%20De%20Reduccion%20Efectiva%20De%20Emisiones%20De%20CO2.pdf)
3. Asco Carbon Dioxide LTD. (2013). Recuperado el 04 de abril de 2013, de Ascoco2.com: [http://www.ascoco2.com/es/productos/tanques-de- CO₂-y-criogenicos/](http://www.ascoco2.com/es/productos/tanques-de-CO2-y-criogenicos/)
4. Azuara, J. (2008). Captura del CO₂ originado por el empleo de combustibles fosiles. Fisica y Sociedad , 20.
5. Cabrera, H., Romero, J., & Curbelo, M. (2012). Programa de monitoreo ambiental para cementos Cienfuegos, S.A. Revista Avanzada Cientifica , 1-14.
6. Cemex. (2012). Captacion y Almacenamiento de Carbono. México.
7. _____. Hacia una industria cementera sostenible. España.

8. Clemente, M. D., & Naharro, J. (2009). Comparacion de las tecnologias de captura y almacenamiento de CO₂ en la generacion de energia. En Anales de la Real Academia de Doctores de España (págs. 19-29). Madrid.
9. Congreso Nacional del Medio Ambiente. (2009). Recuperado el 04 de marzo de 2013, de conama10: http://www.conama10.es/conama10/download/files/GTs%202010/2_final.pdf
11. Linares, J., & Beatriz, M. (2007). Captura y almacenamiento de CO₂. Madrid: Endesa.
12. Morales, H., & Torres, C. (2008). Tecnologias de Captura y Secuestro de CO₂. Chile.
13. Moscoso, M. J. (2007). Plan De Manejo Ambiental Aplicado a Hornos De Producción De Clinker, En La Industria Cementera Guatemalteca. Guatemala.
14. NCM International. (2010). Recuperado el 04 de abril de 2013, de NCM International Equipos- Maquinaria-Servicios de Ingenieria: <http://www.ncminternational-esp.com/page0/page14/page15/page15.html>
15. Prando, R. (2011). La Captura y el almacenamiento del dióxido de carbono, CAC. Uruguay.

16. Quiroga, R. (2009). Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: CEPAL.
17. Rillo, L. (2011). Simulación del proceso de carbonatación-calcinación para captura de CO₂. Estrategias de mejora del proceso. Zaragoza.
18. Robles, A., & Ación, F. (2011). Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂. I Certamen de Proyectos Educativos en Ingeniería Química en la UAL , 18-27.
19. Rodas, A. (27 de 02 de 2013). Comercialización de CO₂. (A. Mancilla, Entrevistador)
20. ZhuHai GongTong Mechanical Equipment Co., Ltd. (s.f.). Recuperado el 04 de abril de 2013, de GongTong Machinery: <http://www.gongtongmachinery.es/1-co2-recovery-plant.html>