



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN SISTEMA DE SECADO PARA EL CARBÓN
SUBBITUMINOSO, UTILIZADO COMO COMBUSTIBLE EN PROCESOS DE CALCINACIÓN
EN LA INDUSTRIA DE MINERALES MEDIANTE EL USO COMBINADO DE PARÁBOLAS
SOLARES Y RESISTENCIAS ELÉCTRICAS**

Maira Ninett Cecaída Mijangos

Asesorado por el Ing. Juan Amílcar López Ramos

Guatemala, febrero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN SISTEMA DE SECADO PARA EL CARBÓN
SUBBITUMINOSO, UTILIZADO COMO COMBUSTIBLE EN PROCESOS DE CALCINACIÓN
EN LA INDUSTRIA DE MINERALES MEDIANTE EL USO COMBINADO DE PARÁBOLAS
SOLARES Y RESISTENCIAS ELÉCTRICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MAIRA NINETT CECAIDA MIJANGOS
ASESORADO POR EL ING. JUAN AMILCAR LOPEZ RAMOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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 UN SISTEMA DE SECADO PARA EL CARBÓN
SUBBITUMINOSO, UTILIZADO COMO COMBUSTIBLE EN PROCESOS DE CALCINACIÓN
EN LA INDUSTRIA DE MINERALES MEDIANTE EL USO COMBINADO DE PARÁBOLAS
SOLARES Y RESISTENCIAS ELÉCTRICAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 25 de abril de 2019.



Maira Ninett Cecaida Mijangos

Ref. EEPFI-631-2019

Guatemala, 09 de septiembre de 2019

Director
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez:

Reciba un 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 **Maira Ninett Cecaida Mijangos** carné número **200915427**, quien optó por 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 en Artes en Energía y Ambiente**.

Y 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 Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, se firma y sella la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular,

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Amilcar López Ramos

INGENIERO ELECTRICISTA
COLLEGIADO No. 6657

Mtro. Juan Amilcar López Ramos
Asesor

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Energía y Ambiente



Edgar Dario Alvarez Cot

Mtro. Ing. Edgar Dario Álvarez Cot
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Ref.EIQ.TG.006.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la estudiante, **MAIRA NINETT CECAIDA MIJANGOS**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN SISTEMA DE SECADO PARA EL CARBÓN SUBBITUMINOSO, UTILIZADO COMO COMBUSTIBLE EN PROCESOS DE CALCINACIÓN EN LA INDUSTRIA DE MINERALES MEDIANTE EL USO COMBINADO DE PARÁBOLAS SOLARES Y RESISTENCIAS ELÉCTRICAS"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Williams G. Álvarez Mejía; M.I.Q., M.U.I.E
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2020

Cc: Archivo
WGAM/ale



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189102 - 24189103

DTG. 064.2020

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 Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UN SISTEMA DE SECADO PARA EL CARBÓN SUBBITUMINOSO, UTILIZADO COMO COMBUSTIBLE EN PROCESOS DE CALCINACIÓN EN LA INDUSTRIA DE MINERALES MEDIANTE EL USO COMBINADO DE PARÁBOLAS SOLARES Y RESISTENCIAS ELÉCTRICAS**, presentado por la estudiante universitaria: **Maira Ninett Cecaida Mijangos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, febrero de 2020

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la luz y el camino en mi vida. Por darme la fuerza, paciencia y sabiduría en cada etapa.
- Mis padres** Marco Antonio Zecaida y Gloria Ninett Mijangos. Por su amor incondicional, por su apoyo y palabras de aliento en cada etapa de mi vida.
- Mi hermano** Marco Antonio Zecaida Mijangos por ser ese compañero de aventuras, terapeuta, tramitador, amigo, conciencia y ejemplo de calidad humana.
- Mi abuelita** María Luisa Pérez. Por ser ese ángel de luz y amor en mi vida.
- Mis tíos** Gustavo Mijangos, Lidia Mijangos, Jeannette Gutierrez, Simona Secaida y Feliz Secaida. Por brindarme tanto amor y ser una importante influencia en mi vida.
- Mis amigos** Por todos los momentos especiales, por ser cómplices en mis ocurrencias y estar en cada etapa de mi vida, en los buenos y los malos momentos. En especial a Ana Belén Morales, Andrea Arias y Diego Ochoa. Por estar conmigo en los momentos de estrés y ser mi apoyo en

cada paso de la carrera y de la vida. A Eduardo Golón. Por su apoyo y seguimiento a mi trabajo de graduación en este último año.

Mis compañeros de maestría

Carlos Quan, Claudia Taracena, Joel Ajxup, Jose Carlos Lemus, Julio Ortiz, Lester Luna y Vinicio Armas. Por estar ahí cada sábado y su amistad, por hacerme olvidar del stress de la semana y apoyarme en cada paso de la maestría.

Mis compañeros de trabajo

Por apoyarme siempre en el trabajo, por su amistad y hacer de mis almuerzos una aventura llena de lecciones y risas.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios a la cual me llena de orgullo pertenecer, y porque me ha enseñado a luchar por mis sueños y mis ideales.

Facultad de Ingeniería

Por ser la facultad que me acunó durante mis años de carrera y me dio todas las herramientas para ser la profesional que soy hoy.

Ing. Juan Amílcar López

Por su asesoría en el trabajo de graduación y sus consejos que me han ayudado a trazarme metas y cumplir mis objetivos.

**Ing. Joze Eduardo del
Cid**

Por su apoyo y amistad en mi trabajo y en mi formación profesional.

Víctor Orozco

Por su amistad y apoyo guía tanto en el área académica como en el área laboral.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	7
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	7
3.1.1. Uso de los combustibles fósiles.....	7
3.1.2. Carbón subbituminoso combustible en un proceso de calcinación.....	8
3.1.3. Secado del carbón.....	8
3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
3.2.1. Preguntas de investigación.....	13
3.2.1.1. Pregunta central.....	13
3.2.1.2. Preguntas auxiliares.....	13
3.3. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
4. JUSTIFICACIÓN.....	15
5. OBJETIVOS.....	17
General.....	17
Específicos.....	17

6.	MATRIZ DE COHERENCIA.....	19
7.	ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	21
8.	MARCO TEÓRICO.....	23
8.1.	Industria de minerales.....	23
8.2.	Combustibles.....	23
8.2.1.	Gas LP.....	24
8.2.2.	Carbón Mineral	24
8.2.3.	Carbón subbituminoso.....	24
8.3.	COMBUSTIÓN.....	25
8.4.	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	25
8.4.1.	Ley de Fourier.....	26
8.5.	Secado.....	26
8.5.1.	Agua Removida.....	28
8.5.2.	Tipos de secadores.....	28
8.5.2.1.	Secador en operación continua.....	29
8.5.2.2.	Secador por contacto directo.....	29
8.5.3.	Secado y molienda simultanea.....	30
8.5.4.	Balance de aire.....	31
8.5.5.	Eficiencia del proceso.....	31
8.6.	Fuentes de energía alternativas.....	32
8.7.	Energía Solar.....	32
8.7.1.	Colector Cilíndrico Parabólico.....	33
8.7.2.	Componentes de recolector cilíndrico Parabólico... 33	
8.7.2.1.	El reflector cilíndrico parabólico.....	33
8.7.2.2.	El tubo de absorción o receptor	33
8.7.2.3.	Sistema de seguimiento solar.....	34
8.7.3.	Concentración geométrica colector cilíndrico parabólico.....	36

8.7.4.	Pérdidas térmicas del colector cilíndrico parabólico.....	36
8.7.5.	Energía solar incidente en el colector cilíndrico parabólico.....	37
8.7.6.	Energía térmica útil del colector cilíndrico parabólico.....	37
8.7.7.	Rendimiento del colector cilíndrico parabólico.....	37
8.8.	Termo eléctrico.....	38
8.9.	Valor presente neto.....	39
9.	ÍNDICE DE CONTENIDO PROPUESTO.....	41
10.	METODOLOGÍA.....	45
10.1.	Datos y variables.....	45
10.1.1.	Datos.....	45
10.1.2.	Variables.....	46
10.2.	Delimitación de campo de estudio.....	46
10.3.	Recursos humanos disponibles.....	47
10.3.1.	Recursos humanos.....	47
10.3.2.	Recursos materiales disponibles.....	47
10.3.2.1.	Equipo de medición.....	47
10.3.2.2.	Fuentes de información.....	47
10.3.2.3.	Equipo.....	48
10.4.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	48
10.5.	Recolección y ordenamiento de la información.....	48
10.6.	Fase de Investigación.....	49
10.7.	Fase de análisis.....	49
10.8.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	49
10.9.	Diagrama del sistema propuesto.....	50

11.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	53
12.	CRONOGRAMA.....	55
13.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	57
	13.1. Factibilidad.....	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Árbol del problema, análisis de causas y efectos.....	9
2.	Árbol de medios	10
3.	Árbol de fines	11
4.	Esquema de solución.....	22
5.	Curvas de velocidad y humedad de secado	27
6.	Contacto de sólidos con el medio en secadores.....	30
7.	Esquema de un colector cilíndrico parabólico	34
8.	Esquema de seguimiento colector cilíndrico parabólico	35
9.	Funcionamiento de un termo eléctrico	38
10.	Diagrama del proceso propuesto.....	50

TABLAS

I.	Matriz de coherencia del diseño de investigación.....	19
II.	Descripción de elementos de diagrama de proceso propuesto	51
III.	Cronograma de actividades para realización de diseño de investigación.....	55
IV.	Costos de recursos necesarios para el diseño de investigación.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO₂	Dióxido de carbono

GLOSARIO

AIE	Agencia Internacional de la Energía.
Briquetas	Inicio de una combustión.
Cuantitativa	Se relaciona a la cantidad, por tanto, se relaciona a una variable medible.
Fisicoquímica	Ciencia que estudia las relaciones recíprocas entre los fenómenos físicos y químicos.
GEI	Gases efecto invernadero.
Ignición	Bloque sólido de combustible, producto catalogado como ecológico.
Prefactibilidad	Análisis comparativo de las ventajas y desventajas que posee determinado proyecto de inversión.
Termodinámica	Rama de la física que estudia la acción mecánica del calor y las restantes formas de energía.
VPN	Valor presente neto.

RESUMEN

El siguiente protocolo presenta todos los aspectos teóricos para realizar el diseño de un sistema de secado para el carbón subbituminoso, utilizado como combustible en procesos de calcinación en la industria de minerales mediante el uso combinado de parábolas solares y resistencias eléctricas. En los antecedentes se presentan diferentes proyectos en los que se puede apreciar el uso de sistemas de secado. En el capítulo 1, se expone la problemática a tratar y los beneficios que se esperan obtener al realizar al poner en práctica el diseño del proceso de secado.

En el capítulo 2 se analiza la justificación del diseño desde el punto que, al reducir el porcentaje de humedad en el combustible, la eficiencia térmica del sistema aumenta en un 10 % y que se consuman 75,87 toneladas métricas de carbón al año. Al tener presente lo indicado con anterioridad se puede desglosar los objetivos que se desean alcanzar y desear demostrar el presente diseño de investigación, las preguntas a las que se desea responder, así como el camino que se seguirá se presenta en los capítulos 3 y 4.

En los siguientes capítulos se planteará la estrategia para dar solución a la problemática planteada en capítulos anteriores. En el capítulo 6 se desarrollarán los conocimientos necesarios para desarrollar el diseño del secador de carbón, esto complementa al capítulo 8 y el capítulo 9 en los que se explican los pasos a seguir y la metodología a utilizar para el diseño del sistema.

1. INTRODUCCIÓN

El carbón es utilizado en reacciones de combustión para producir energía térmica que pueda transformarse o utilizarse en distintos procesos dentro de diferentes industrias. Actualmente el carbón es el segundo material más utilizado para la producción de energía, solo atrás del petróleo según nos indica la Agencia Internacional de la Energía (AIE).

El carbón mineral es uno de los combustibles fósiles más utilizados a nivel mundial en la industria, debido a su alta capacidad para ceder calor, entre otras propiedades. Una de las aplicaciones más conocidas del carbón subbituminoso se deriva de su alta capacidad para combustionar, la cual se utiliza para generar energía, por lo que es utilizado desde generadoras eléctricas hasta pequeñas empresas, para diferentes fines.

La capacidad de ceder calor del carbón subbituminoso se ve directamente afectada por sus propiedades fisicoquímicas, dentro de las cuales podemos mencionar la humedad del material. La humedad se define como el porcentaje de agua que se encuentra en el interior del material; un valor alto en el porcentaje de humedad afecta en gran medida la eficiencia de reacción de combustión del carbón, causando un mayor consumo de combustible para la generación de determinada cantidad de energía y una mayor emisión de gases efecto invernadero.

Para la reducción del porcentaje de humedad en sólidos se aplican diferentes procesos entre los que podemos mencionar el método de adición de productos químicos los cuales tienen la capacidad de absorber el agua en los

sólidos; y el secado el cual es un proceso que consiste en la eliminación de sustancias volátiles, especialmente el agua que se encuentra en el interior de un sólido. Otro método de secado es el contacto directo con un fluido caliente que utiliza energía térmica, que se traspassa al sólido para que se evapore el agua que tiene contenida. El secado enfocado a la disminución de la humedad. En el carbón subbituminoso, se busca estabilizar el poder calorífico del combustible para que la combustión pueda contar con un equilibrio entre el consumo de combustible, la generación de energía térmica y disminución en la emisión de gases efecto invernadero.

En el proceso térmico de la calcinación de minerales se utiliza como combustible el carbón subbituminoso, por tanto su eficiencia térmica se ve afectada debido a los altos porcentajes de humedad que presenta el carbón en su estructura al momento de llevar a cabo la combustión, causando así repercusiones en la elevación en los costos de producción y una mayor emisión de gases efecto invernadero como vapor y monóxido de carbono, por tanto se ve la alternativa de un sistema híbrido de secado utilizando la combinación de calentadores parabólicos solares y resistencias eléctricas para las horas sin energía solar, esto para regular la humedad del carbón molido que ingresa al quemador. La implementación de un sistema de secado ayudará a mantener estables el consumo de carbón, así como el control de eficiencia en el proceso térmico.

2. ANTECEDENTES

Para aumentar la eficiencia en la combustión y el consumo del carbón, se han realizado diferentes estudios enfocados a diferentes tipos de procesos de secado para carbón y así reducir el porcentaje de humedad. Estos estudios fueron realizados a nivel mundial, regional y local, a continuación, se presentan algunos.

Para llevar a cabo un proceso de secado se deben de tomar en cuenta las propiedades físicas del sólido que se espera secar, regularmente el tipo de partícula y el porcentaje de humedad son los principales valores que se toman en cuenta, en el secado del carbón en especial si el carbón es molido para un mejor aprovechamiento del combustible, según nos indica el Prontuario del cemento: “por regla el carbón debe tener un porcentaje de humedad residual mínimo de 0,5 % a 1,5 %, la cual es conveniente para la ignición”, (Labahn, 1985. p.3).

El artículo: carbón ultrafino etapa simple de deshidratación y el proceso de fabricación de briquetas, expone de mejor manera los problemas que causa la partícula fina, “las partículas de carbón obtenidas de la molienda ultrafina poseen una gran área de superficie, haciendo que las partículas atrapen una gran cantidad de agua” (Wilson, 1994. p.2.). Este artículo se enfoca al uso del carbón en una generadora, y como el factor de absorber humedad en el proceso de limpieza del combustible afecta el poder calorífico del carbón, esta situación es la que se presenta en la empresa, no se tiene un proceso de limpieza, pero la humedad que absorbe el carbón causa que el poder calorífico descienda y el secado se complique debido a la fineza de la partícula.

El proceso de secado con partícula fina es de mayor dificultad que el de una partícula de tamaño mayor, y si el proceso de secado se lleva a cabo de modo mecánico se ve necesario el empleo de químicos para la reducción de la humedad del carbón tal como se ve en el artículo de *Deshidratación de carbón fino* en el cual se ejemplifica un secado mecánico utilizando un filtro de alta presión, a escala planta piloto para la deshidratación de carbón fino el cual es limpiado por flotación de espuma, este proceso indica parámetros de funcionamiento a altas presiones y adición de diversos agentes tensoactivos y floculantes que se evaluaron para la deshidratación de carbón fino (Parekh & Groppo, 1998. p.1.), por lo que los procesos mecánicos para la reducir la humedad del carbón fino repercuten en grandes complicaciones y más gastos debido a los floculantes y tenso-activos para su deshidratación.

En la industria es necesario un proceso continuo, es por eso que se toma en cuenta el secado solar, según diferentes estudios al exponer al sol el carbón húmedo se logra reducir el contenido de humedad de este material en porcentajes cercanos del 13 % al 8 %.

El último antecedente presenta una evidencia clara de la viabilidad del uso de la energía solar para llevar a cabo el secado del carbón, sin embargo, este estudio busca utilizar la energía solar no de forma directa en el proceso de secado del carbón subbituminoso, si no, en forma indirecta utilizando la energía solar para calentar el fluido que posteriormente calentará el aire que ingresa al molino para secar el carbón. Por lo que se ha considerado el uso de colectores cilíndricos parabólicos los cuales según indica el estudio *Diseño captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay* que “Los colectores cilíndricos parabólicos tienen una eficiencia termodinámica muy buena en comparación con otros, y es por ello por lo que se usan en algunos procesos industriales como en la producción de acetona, el procesado de residuos, en la industria láctea, así

como en la producción de electricidad, donde existe gran madurez en investigación”, (Paredes Velasco, Carmen. 2012. p.14).

Según el artículo: *Meeting the Clean Energy Demand: Nanostructure Architectures for Solar Energy Conversion* “Los colectores cilindro parabólicos son los de más bajo costo, y es la tecnología más desarrollada en cuanto a concentración de energía solar, operan en rangos de temperatura que van desde los 50°C hasta los 400°C”, (Kamat. 2007. p.1). Con base en los dos antecedentes previos se demuestra que el uso de parábolas solares o recolectores cilíndrico parabólicos en el calentamiento del fluido utilizado para secar, es viable debido a la eficiencia térmica de los mismos, la gran cantidad de investigación y desarrollo en el tema y su bajo costo.

Este estudio plantea un sistema combinado de molienda y secado del carbón subbituminoso, por tanto es necesario tener en cuenta y tomar algunas precauciones tal como lo indica la tesis *Estudio de prefactibilidad económica para la utilización de carbón mineral en la fabricación de cal viva*, el cual indica que “en la planta de cementos ubicada en Guatemala existen sistemas de secado, sin embargo el manejo del carbón en este tipo de equipos requiere la inversión de equipos para la detección de explosiones y elevadas temperaturas”. (Calderón Aguilar, 2005. p.31.), por lo que estos datos se deben tomar en cuenta en estudios de inversión.

3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

3.1. Descripción del problema

A continuación, se enumeran todos los factores que influyen en el problema de la humedad de carbón.

3.1.1. Uso de los combustibles fósiles

Los combustibles fósiles han sido utilizados por la humanidad como una fuente de energía, sin embargo, en los últimos años se ha visto que pese al gran beneficio energético que han brindado estos a la humanidad su daño al planeta es palpable. Por lo que varios países han incursionado en el uso y mejora de diferentes energías alternativas, como el caso de energía solar, eólica, biomasa, entre otras.

Existen diferentes opciones en energías para dejar de utilizar combustibles fósiles, sin embargo, son aún de alta importancia en diferentes industrias. En Guatemala son utilizados aún para la producción de energía eléctrica y en industrias de minerales, aunque la meta final es dejar de utilizar combustibles fósiles la realidad es que en la actualidad son muy utilizados, por lo que el utilizarlos de forma efectiva y eficiente es la clave para mantener su uso controlado.

3.1.2. Carbón subbituminoso combustible en un proceso de calcinación

El carbón subbituminoso es un material con altas capacidades carburantes, por lo que es muy utilizado como combustible en diferentes procesos. Debido al calor que desprende al momento de combustionar, es un material adecuado para usar en un proceso de calcinación, para dicho proceso se necesita alta energía en forma de calor para poder cambiar la estructura de los materiales.

La alimentación del carbón subbituminoso de un horno para realizar el proceso térmico de calcinación se mantiene estable en un rango de 1,15 a 1,27 toneladas métricas por hora. Sin embargo, la temperatura del horno disminuye al aumentar la humedad en el combustible, lo que afecta directamente a la eficiencia del proceso térmico, porque el producto no sale con las especificaciones de calidad adecuadas y entra en el rango de producto no conforme. Según el análisis de calidad realizados a un carbón en la industria de minerales este posee entre un 5 % a un 13 % de humedad en su estructura, estos datos varían dependiendo de la hora y las condiciones climáticas en el área donde está ubicada la empresa.

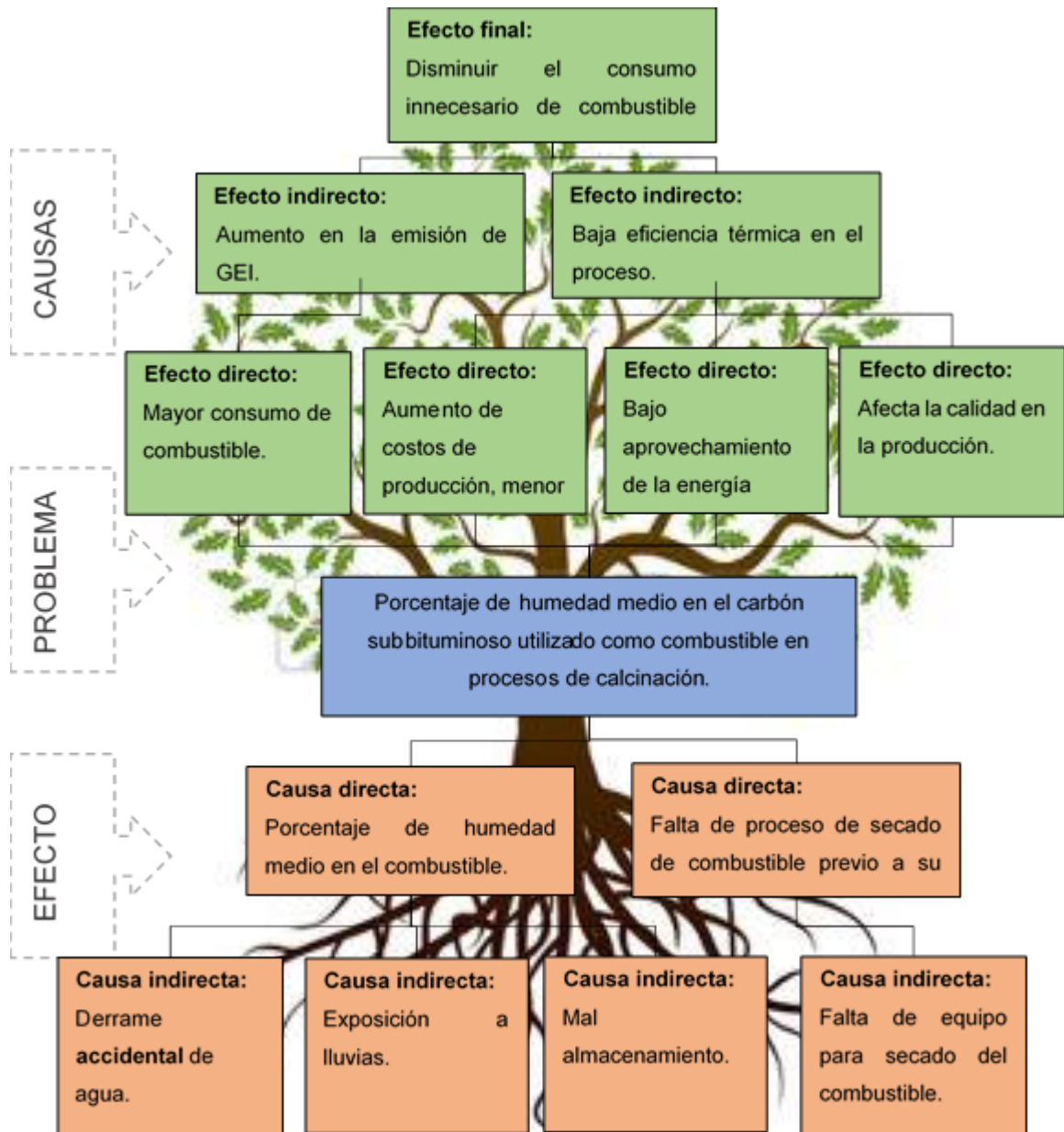
3.1.3. Secado del carbón

El secado en la industria de minerales, específicamente en procesos de calcinación, es un subproceso que tiene como fin el controlar la humedad en el combustible; se debe considerar que la falta de un proceso de secado de combustible causa pérdidas y gastos extras en la producción, debido a la humedad superficial en el carbón subbituminoso.

Sin un proceso de secado previo, el carbón es utilizado con un alto contenido de humedad superficial o una humedad variable lo cual afecta

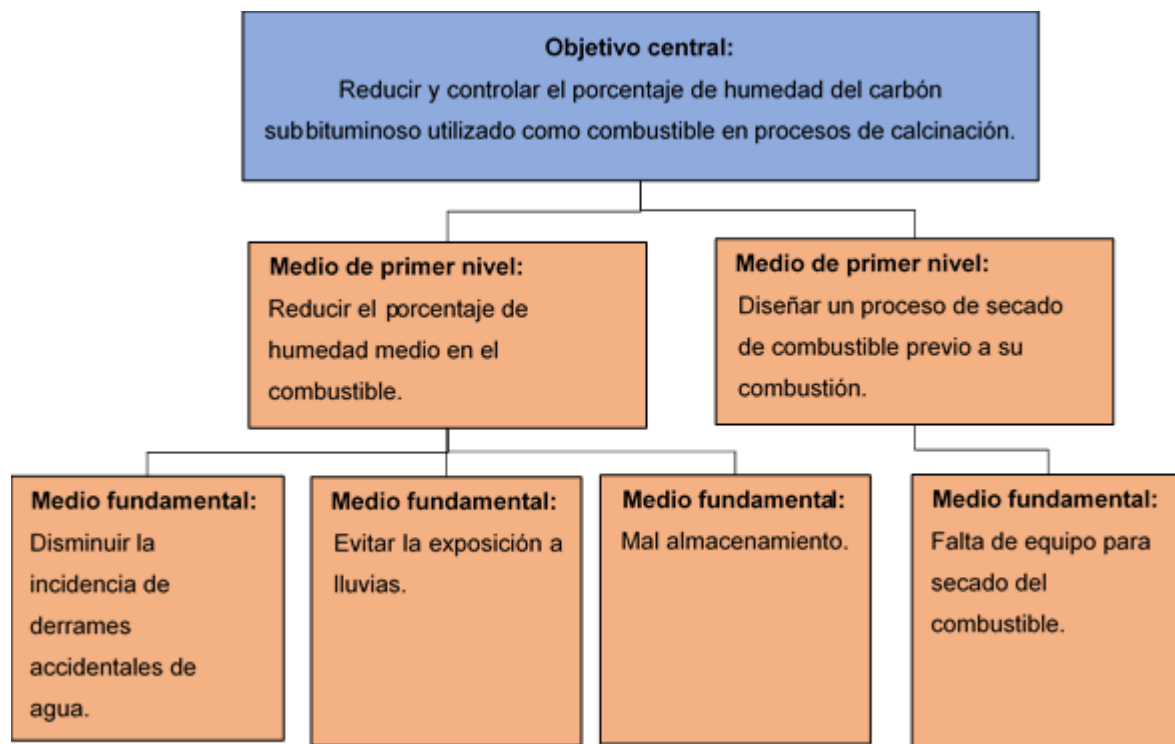
directamente la eficiencia de aprovechamiento energético del proceso térmico en la industria de minerales.

Figura 1. **Árbol del problema, análisis de causas y efectos**



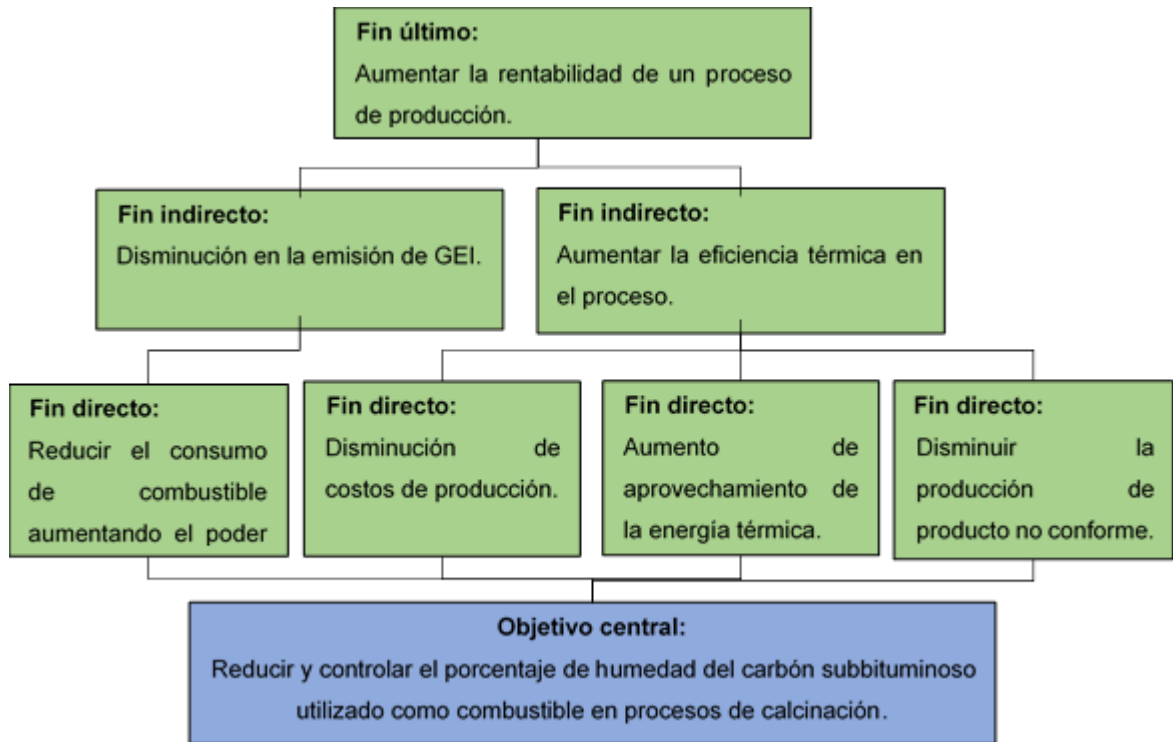
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Árbol de medios**



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Árbol de fines**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Formulación del problema

La humedad dentro del carbón subbituminoso causa pérdida en aprovechamiento de la energía térmica desprendida por el carbón por medio de la combustión, este tipo de energía es utilizada para llevar a cabo un proceso térmico de calcinación en un horno rotatorio. La falta de eficiencia en el aprovechamiento de la energía térmica representa mayor consumo de combustible, mayores problemas en control de variables de manejo causando como resultante producto no conforme, lo que ocasiona pérdidas económicas.

Al utilizar carbón subbituminoso en el proceso térmico de calcinación que posea una humedad máxima de 13 % el cual fluctúa con un mínimo de 5 %. Por lo que estos cambios en la humedad causan un aumento en los costos de producción y aumentando la huella de carbono de una empresa por combustionar más carbón y disminuyendo la producción del producto no conforme debido a bajas en la energía térmica del proceso.

Las emisiones de gases efecto invernadero también se ven incrementadas con la humedad del carbón, esto debido al aumento en la cantidad de carbón subbituminoso que se combustiona. También debido a la calidad de la combustión, si la combustión es incompleta habrá una mayor emisión de gases de efecto invernadero que dañan la calidad del aire tanto del personal como de las personas que viven en las cercanías de la empresa.

Al reducir el porcentaje de humedad en el carbón bituminoso se ayuda a consumir menor cantidad de combustible haciendo más eficiente el proceso, generando una mayor rentabilidad del proceso y contaminando de menor manera el aire, que a su vez contribuye a la calidad del aire de las viviendas ubicadas alrededor de la empresa.

3.2.1. Preguntas de investigación

Se plantean a continuación las preguntas principales para dar solución a la problemática ya mencionada.

3.2.1.1. Pregunta central

¿Mediante qué proceso se puede reducir el porcentaje de humedad en el carbón subbituminoso, utilizado como combustible en procesos de calcinación en la industria de minerales?

3.2.1.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es la viabilidad técnica del diseño del proceso de secado para el carbón subbituminoso?
- ¿Cuál será la eficiencia térmica del proceso de secado de carbón subbituminoso?
- ¿Cuál es la viabilidad financiera en la implementación del proceso de secado?
- ¿Qué beneficios ambientales se obtienen del proyecto?

3.3. Delimitación del problema

El estudio estará enfocado en aprovechar de mejor manera la energía térmica generada en la combustión del carbón subbituminoso utilizada como fuente de energía en el proceso térmico de calcinación de la industria de minerales.

La línea del proyecto se enfoca en la eficiencia energética, del Programa de Maestría en Energía y Ambiente, la cual se centrará en la problemática causada por la humedad superficial del carbón subbituminoso, el cual se utiliza como combustible de un proceso térmico de calcinación.

Por lo que, mediante el diseño de un sistema de secado de carbón, utilizando un reflector solar parabólico para calentar el aire que ingresa al secador. Busca reducir las pérdidas de energía robado por la evaporación del agua superficial del carbón.

4. JUSTIFICACIÓN

La combustión es un proceso muy utilizado para la generación de energía; no solamente de la energía eléctrica sino también de la energía térmica. Sin embargo, el dióxido de carbono es el mayor responsable del cambio climático y este es un producto en la combustión. Por lo que se busca que, en el proceso térmico de calcinación en la industria de minerales, aumente la eficiencia de reacción para que todo el calor de la combustión se aproveche de mejor manera en el horno rotatorio, haciendo que una empresa reduzca su huella de carbono.

El carbón subbituminoso, que es utilizado en la combustión del horno en la empresa, presenta de 5 % a 13 % de humedad en su composición, variando según las condiciones climáticas de la ubicación geográfica de la empresa, entre mayor sea la humedad del carbón, menor será su poder calorífico, causando así una disminución en la eficiencia energética del sistema y un aumento en los costos de producción.

La eficiencia energética del sistema disminuye debido a que si el carbón subbituminoso que combustiona tiene un alto porcentaje de humedad este desprende más cantidad de vapor y la cantidad de calor que cede el combustible al sistema es menor, esto provoca que la temperatura en el horno disminuya lo cual repercute en la calidad del producto terminado, o bien el mantener la calidad del producto terminado requiere que la temperatura del horno se mantenga estable causando un aumento en el consumo del combustible.

Al reducir el porcentaje de humedad en el combustible, la eficiencia térmica del sistema aumenta en un 10 % y que se consuman 75,87 toneladas métricas de carbón al año. Por lo que el secado del carbón es un proceso importante para

reducir la humedad del combustible y aprovechar los recursos del proceso de mejor manera sin sacrificar la calidad del producto terminado.

El diseño del equipo de secado favorecerá a la industria de minerales aumentando su eficiencia energética debido a un mayor aprovechamiento del calor de combustión del carbón subbituminoso en el proceso térmico, equilibrando así la humedad en el combustible, para evitar picos de calor que afectan de igual manera que las bajas de calor en la calidad del producto terminado.

El proyecto se desarrolla en la línea de investigación de “Gestión y uso eficiente de la energía”, del Programa de Maestría en Energía y Ambiente, el cual se enfocará en la problemática del realizar una eficiente combustión del carbón subbituminoso, basado en un proceso de secado evaluando el diseño del proceso mediante la utilización de tecnología tal como la energía solar por medio de parábolas solares y su unificación con energía eléctrica para mantener la eficiencia del proceso.

Se estima que con el secado de carbón se tenga un ahorro de hasta \$7 por tonelada de carbón secado, esto debido al aumento de máximo un 9% en la eficiencia térmica lo que repercute directamente en el costo de operación, de igual forma debido a que el consumo de combustible se reduce por mayor eficiencia se disminuye la emisión de CO₂ a la atmósfera en 7 toneladas por día.

5. OBJETIVOS

General

Diseñar un proceso de secado para el carbón subbituminoso, utilizado como combustible en procesos de calcinación en la industria de minerales utilizando un sistema híbrido de calentadores parabólicos y resistencias eléctricas.

Específicos

1. Determinar la viabilidad técnica del proceso de secado en el molino de carbón de la industria de minerales, mediante el cálculo de agua removida, calor transferido, y flujo de aire necesario.
2. Determinar la eficiencia térmica teórica del sistema de secado de carbón subbituminoso, mediante la capacidad de transferencia del aire y la cantidad de humedad final deseada.
3. Analizar la factibilidad financiera de la implementación del proyecto, mediante la evaluación del valor presente neto.
4. Analizar los beneficios ambientales asociados al uso eficiente del carbón subbituminoso en la industria de minerales, mediante análisis ambientales de una combustión controlada.

6. MATRIZ DE COHERENCIA

Tabla I. **Matriz de coherencia del diseño de investigación**

	PREGUNTA	OBJETIVO
General	¿Mediante qué proceso se puede reducir el porcentaje de humedad en el carbón subbituminoso, utilizado como combustible en procesos de calcinación en la industria de minerales?	Diseñar un proceso de secado para el carbón subbituminoso, utilizado como combustible en procesos de calcinación en la industria de minerales utilizando un sistema híbrido de calentadores parabólicos y resistencias eléctricas.
1	¿Cuál es la viabilidad técnica del diseño del proceso de secado para el carbón subbituminoso?	Determinar la viabilidad técnica del proceso de secado en el molino de carbón de la industria de minerales, mediante el cálculo de agua removida, calor transferido, y flujo de aire necesario.
2	¿Cuál será la eficiencia térmica del proceso de secado de carbón subbituminoso?	Determinar la eficiencia térmica teórica del sistema de secado de carbón subbituminoso, mediante la capacidad de transferencia del aire y la cantidad de humedad final deseada.

Continuación tabla I.

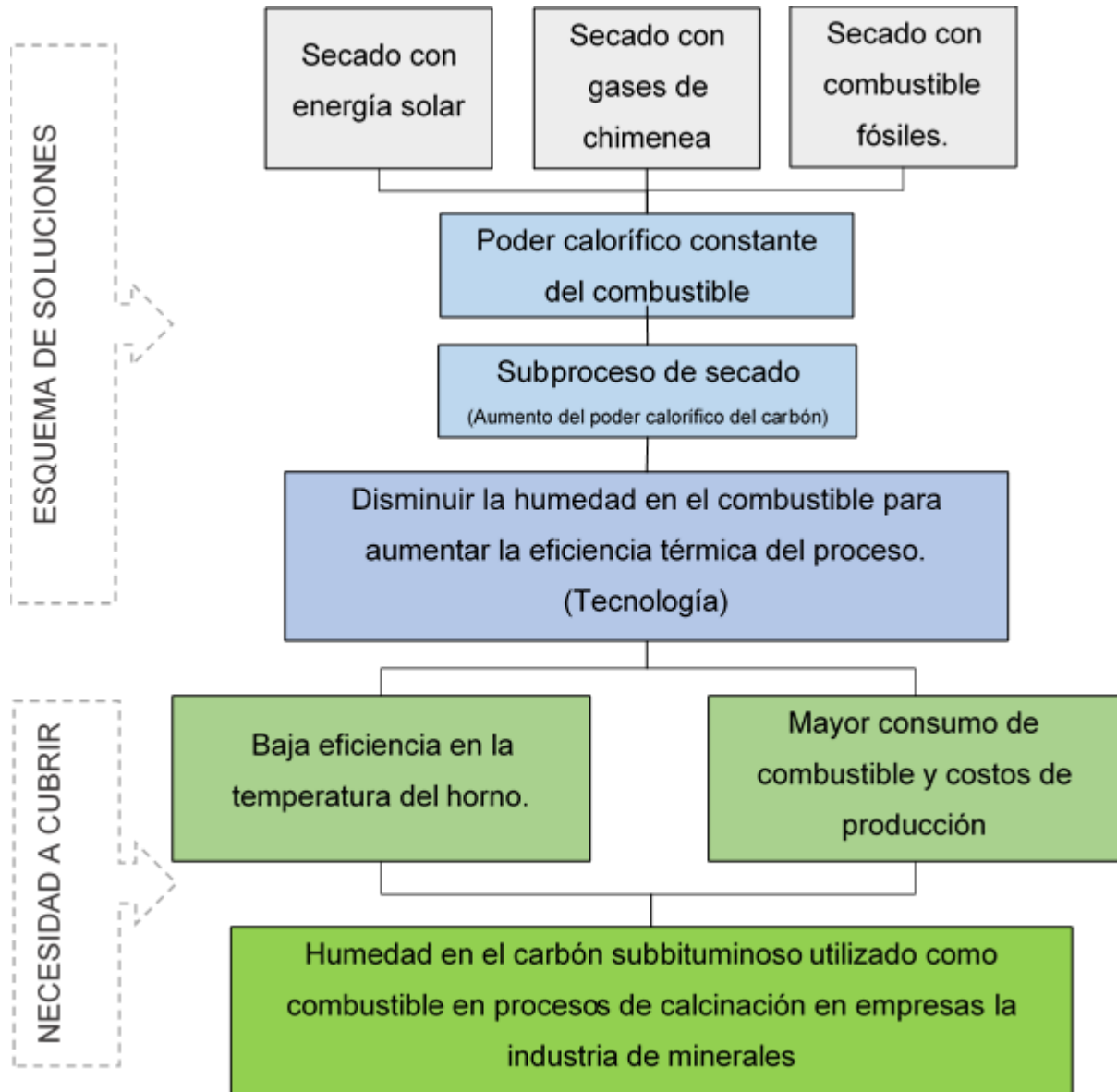
3	¿Cuál es la viabilidad financiera en la implementación del proceso de secado?	Analizar la factibilidad financiera de la implementación del proyecto, mediante la evaluación del valor presente neto.
4	¿Qué beneficios ambientales se obtienen del proyecto?	Describir los beneficios ambientales asociados al uso eficiente del carbón subbituminoso en la industria de minerales, mediante análisis ambientales de una combustión controlada.

Fuente: elaboración propia.

7. ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La necesidad a cubrir es el regularizar la humedad del carbón subbituminoso, utilizado como combustible en procesos térmicos de calcinación en la industria de minerales, este es la base de nuestro esquema de solución, por lo que se observa la necesidad de aumentar la eficiencia del proceso y reducir los costos de producción, por lo que se esquematiza la solución iniciando con la opción de un sistema de secado para el combustible, carbón subbituminoso, el cual repercutirá en el aumento del poder calorífico del carbón. Este sistema se puede implementar mediante: el uso de calentadores solares, la recirculación de los gases de chimenea y, por último, la implementación de resistencias eléctricas como fuente de energía en el sistema de secado.

Figura 4. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

8. MARCO TEÓRICO

8.1. Industria de minerales

La industria de minerales a la que esta direccionada la investigación se divide en dos sectores, la industria del cemento y la industria de producción de óxidos de calcio y magnesio. El principio de funcionamiento de estas industrias es el mismo, es decir, llevar a cabo una reacción química mediante un proceso térmico, en un horno.

Para la producción de óxidos, se lleva a cabo un proceso de descarbonatación, la cual consiste en una reacción que cambia la estructura del mineral para convertirlo en óxido, esta reacción se da dentro de un horno a temperaturas de 600 a 900 °C, por lo que se considera un proceso térmico.

8.2. Combustible

La producción de minerales como óxidos de calcio y magnesio, poseen una alta demanda de energía, los hornos funcionan mediante la combustión de diferentes combustibles, especialmente aquellos que poseen un alto poder calórico, en el libreo de cemento, manual tecnológico, indica que “para la industria del cemento y los minerales se utilizan combustibles en estado de agregación sólido, líquido y gaseoso; y del carbón el cual es un combustible sólido se utiliza en hornos rotatorios”, (Duda. 1977. p.171). En un horno de capacidad de producción de 200 toneladas al día, se utilizan por lo regular los siguientes tipos de combustibles:

8.2.1. Gas LP

Este tipo de combustible es un derivado del petróleo compuesto por hidrocarburos, por lo que se le considera un excelente combustible para los hornos cementeros que son el mismo equipo utilizado para la producción de óxidos; este combustible es utilizado en el precalentamiento del horno, debido al alto costo del combustible. La temperatura 400° C.

8.2.2. Carbón mineral

El carbón mineral en su división de carbón subbituminoso es uno de los más utilizados para diferentes procesos; en la industria de minerales para la fabricación de óxidos el carbón subbituminoso es utilizado debido a su costo, a su alto valor calorífico.

Para poder descarbonatar la materia prima se quema carbón mineral en el quemador principal, este calienta el aire secundario, el aire transfiere el calor a la materia prima en un flujo en contra corriente a lo largo del horno.

8.2.2.1. Carbón subbituminoso

Es una división del carbón mineral, con propiedades no aglomerantes con un valor calorífico bruto alto entre 17,435 kJ/kg (4 165 kcal/kg) y 23,865 kJ/kg (5 700 kcal/kg) que contiene más del 31 % materia volátil en términos secos y libres de materia mineral.

8.3. Combustión

La combustión es una reacción rápida que desprende calor, en la cual intervienen, como nos indica el libro *la química ciencia central* “el oxígeno del aire y un hidrocarburo como un reactivo, para la formación de dióxido de carbono y agua con productos, sin embargo, para llegar a estos, se efectúan en el interior de la reacción una serie de pasos en los que ocurre reacción de oxidación, que libera calor por tanto es exotérmica” (Brown, LeMay, & Bursten, 2004. P. 82), es decir que transfiere energía en forma de calor a sus alrededores. La energía que cede un combustible se ve afectada por la capacidad calorífica del mismo, así como de si la reacción es completa o incompleta.

Una reacción completa se da cuando la relación entre cantidad de combustible y de comburente (oxígeno) es como mínimo la necesaria basada en la relación estequiométrica de la reacción de combustión. Mientras que la incompleta se da cuando hay menor cantidad de oxígeno, oxígeno en exceso o demasiada humedad en el combustible.

Cuando la reacción de combustión de un combustible es incompleta, produce como reactivos gases de efecto invernadero que son tóxicos para el ser humano como el monóxido de carbono. Sin embargo, la causa de una baja en capacidad de ceder calor del combustible es la cantidad de agua expresada en porcentaje de humedad que posee el material en su estructura, este factor causa una mayor acumulación de vapor en el ambiente como gas de efecto invernadero.

8.4. Transferencia de calor

Estudia los tres tipos de transferencia de calor que existen, transferencia por conducción, por convección y por radiación. Para poder comprender cada

uno de ellos se estudiará la ley general de conducción. Existen dos estados en los que se puede dar la transferencia de calor en estado estacionario y en estado no estacionario.

8.4.1. Ley de Fourier

La relación básica del flujo de calor por conducción es la proporcionalidad existente entre la velocidad de flujo de calor a través de una superficie isotérmica y el gradiente de temperatura existente en dicha superficie. Esta generalización, que es aplicable a cualquier lugar del cuerpo y en cualquier instante, recibe el nombre de ley de Fourier (McCabe, Smith, & Harriott, 1991. P.315).

$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{\partial T}{\partial n}$$

Donde:

A = área de la superficie isotérmica

n = distancia medida en dirección normal a la superficie

q = velocidad de flujo de calor a través de la superficie en dirección normal a la misma

T = temperatura

k = constante de proporcionalidad

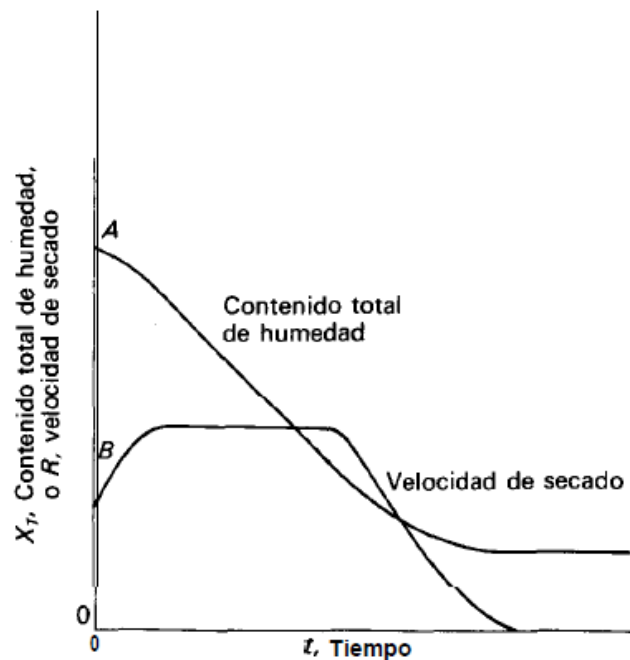
8.5. Secado

“El secado se describe como un proceso de eliminación de humedad en un sólido y así obtener un sólido seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro del sólido. En el carbón húmedo, el agua puede encontrarse en la superficie, en los poros y en las grietas de la partícula”. (Baute, Dangond, 2007. p.5).

El reducir en un grado el porcentaje de humedad, la eficiencia térmica aumenta un 0.1 % y se reduce en un 4 % la producción de cenizas. (Baute, Dangond, 2007. p.5), además que se emite menor cantidad de gases efectos invernaderos ya que la combustión reacciona de manera completa, siempre que las condiciones de combustión sean las adecuadas para el sistema.

“A medida que transcurre el tiempo el contenido de humedad en el sólido disminuye por lo regular sigue el comportamiento de la figura 5” (McCabe, Smith, & Harriott. 1991. p. 832), es decir que conforme el tiempo transcurre la humedad en sólido disminuye en igual medida, pero también disminuye la velocidad de secado.

Figura 5. **Curvas de velocidad y humedad de secado**



Fuente: McCabe, Smith, & Harriott, (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*.

8.5.1. Agua Removida

Cuando hablamos de la cantidad de agua removida hablamos de la cantidad de agua que se logró remover del sólido que se está secando y se determina mediante:

$$m_w = m_{s1}(X_{BS1} - X_{BS2})$$

Dónde:

m_w = Flujo de agua removida del sólido

m_{s1} = Flujo de combustible húmedo

X_{BS1} = Porcentaje de humedad en base seca al inicio

X_{BS2} = Porcentaje de humedad en base seca al final

8.5.2. Tipos de secadores

El secador es definido por algunos expertos como el escenario en el que se lleva a cabo el proceso, por lo que este debe ser diseñado según las necesidades que presenta el material a secar, cuando se habla de necesidades se refiere al porcentaje de humedad final, tiempo de secado.

Los secadores se dividen en varias formas, por método de operación y según el tipo de contacto del aire con la partícula del sólido. En el caso del carbón, las formas de secado son:

8.5.2.1. Secador en operación continua

El sistema de secado se adecua a las necesidades del proceso como tal, sin un almacenamiento intermedio, manteniendo así la humedad constante, el equipo en el que se lleva a cabo el secado puede ser de contacto directo o indirecto.

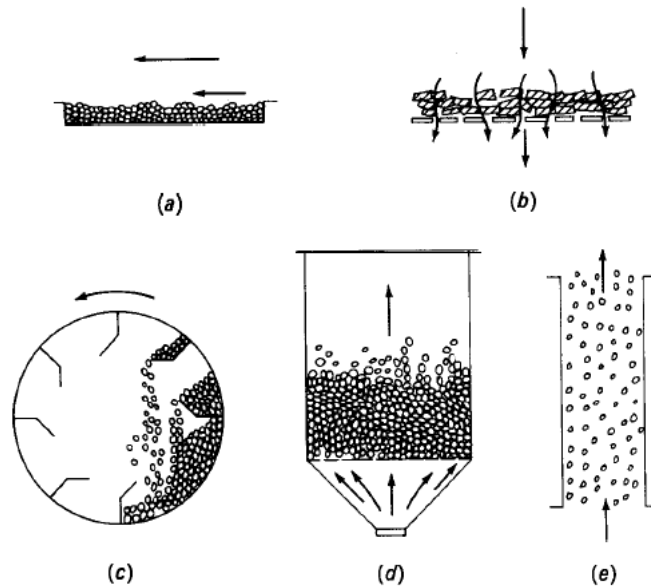
8.5.2.2. Secador por contacto directo

En este equipo el secado del material en este caso el carbón se lleva a cabo el contacto directo del aire caliente con el sólido, para que el calor se transfiera por convección, este tipo de secador se adapta perfectamente a la operación continua.

Para el secado por contacto directo del carbón, debe ser a temperaturas controladas, monitoreando que la temperatura del aire que ingrese en contacto con el material no supere su temperatura de ignición 400°C, por motivos de seguridad de producción.

En los secadores el único gas a separar es el agua o disolvente que se vaporiza. En los secadores por contacto directo difieren básicamente en la forma en la que los sólidos se exponen a la fuente de calor, en la figura 8, se observan (a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos; (b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos; (c) acción en un secador rotatorio; (d) lecho fluidizado de sólidos; (e) flujo en paralelo gas-sólido en un secador flash de transporte neumático, (McCabe, Smith, & Harriott. 1991. p.823).

Figura 6. **Contacto de sólidos con el medio en secadores**



Fuente: McCabe, Smith, & Harriott, (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*.

8.5.3. **Secado y molienda simultanea**

En la industria de producción de óxidos de calcio y magnesio, se trabaja con la molienda de los combustibles para que estos sean más fáciles de quemar dentro del horno rotatorio, es por este motivo que el proceso de secado y molido del combustible puede realizarse de manera simultánea. Estos procesos pueden realizarse combinando dos equipos diferentes, uno para la molienda y otro para el secado.

Sin embargo, la sinergia del secado de combustibles mediante su molienda consiste en la combinación de ambos procesos en un solo equipo, el cual necesite pocas modificaciones en su diseño para poder realizar ambos procesos.

8.5.4. Balance de aire

El balance de aire nos ayuda a realizar un balance de todos los fenómenos involucrados al secar un sólido.

$$\dot{m}_A (h_2 - h_1) = \dot{m}_{s2} (X_{BS1} - X_{BS2})$$

Dónde:

\dot{m}_A = Flujo de agua removida del sólido

h_1 = Humedad en el aire al entrar

h_2 = Humedad en el aire a la salida

\dot{m}_{s2} = Flujo de combustible seco

X_{BS1} = Porcentaje de humedad en base seca al inicio

X_{BS2} = Porcentaje de humedad en base seca al final

8.5.5. Eficiencia del proceso

Este parámetro permite calcular la eficiencia del proceso de secado.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{s1} + \dot{m}_{s2}}{G_{ar} * C_p * \Delta t_{aire}}$$

Dónde:

\dot{m}_{s1} = Flujo de combustible húmedo

\dot{m}_{s2} = Flujo de combustible seco

G_{ar} = Requerimiento de aire recomendado

C_p = Capacidad calorífica del aire

Δt_{aire} = Cambio de temperatura en el aire

8.6. Fuentes de energía alternativas

La prueba de que las fuentes de combustibles fósiles necesarios para la generación de energía se están volviendo escasos y que el uso de estos está afectando en gran medida al cambio climático debido a que está relacionado con las emisiones de carbono a la atmósfera, ha incrementado el interés en el ahorro energético y protección del medio ambiente. La primera estrategia para reducir la dependencia de los recursos fósiles se basa en la en la utilización de fuentes alternativas de energía, no sólo para la producción de energía a gran escala. Estas fuentes de energía alternativa y son todas aquellas fuentes de energía que no necesitan quemar combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón.

Las principales fuentes renovables de energía son expuestas a continuación:

- Energía eólica.
- Energía geotérmica.
- Energía hidráulica o hidroeléctrica.
- Energía solar.

8.7. Energía solar

La energía solar es la energía que llega a la tierra por medio de ondas desde el sol. La cantidad de energía que llega a la atmosfera se estima mediante un valor conocido como constante solar la cuál es 1353 W/m². Esta energía se clasifica como renovable ya que cada día llega a la superficie a la tierra, se espesa habitualmente con unidades de energía/ área/ día, (kWh/m²/día).

La radiación solar que percibimos en la tierra tiene dos orígenes. El primer origen es de los rayos que provienen directamente del sol y que son absorbidos parcialmente por la atmosfera, y a este tipo de radiación se le denomina directa. El segundo tipo de radiación proviene de la dispersión de los rayos solares debido a los gases y partículas que conforman la atmosfera.

8.7.1. Colector cilíndrico parabólico

Los colectores cilíndrico parabólicos son captadores y concentradores solares, los cuales transforman la radiación solar directa en energía térmica, mediante el calentamiento de un fluido de trabajo el cuál puede alcanzar hasta los 400 °C. Por lo anterior descrito están clasificados como colectores solares de media temperatura.

8.7.2. Componentes de recolector cilíndrico parabólico

Es importante conocer los componentes de un recolector cilíndrico parabólico a continuación se detallan.

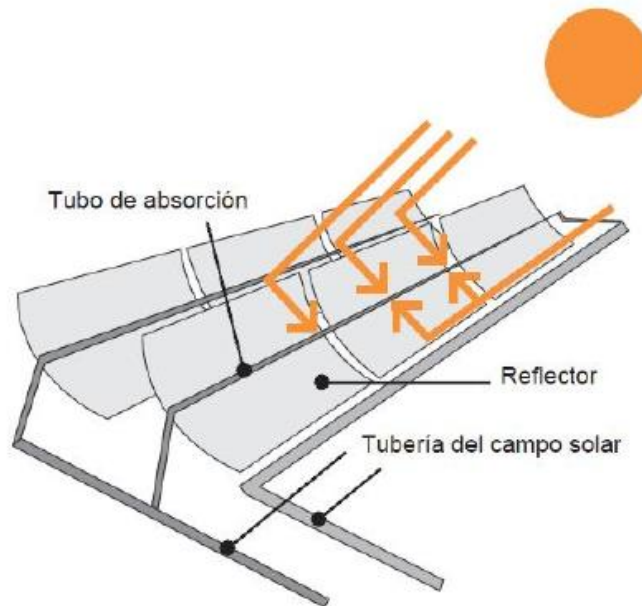
8.7.2.1. El reflector cilíndrico parabólico

Su finalidad es reflejar y concentrar sobre el receptor la radiación solar directa. Al describir su forma se indica que es un espejo curvo en forma de parábola, de tal manera que concentra en su línea focal la radiación reflejada.

8.7.2.2. El tubo de absorción o receptor

El rendimiento global del colector cilíndrico parabólico depende de la calidad de este componente, puede estar formado por uno o dos tubos concéntricos.

Figura 7. **Esquema de un colector cilíndrico parabólico**

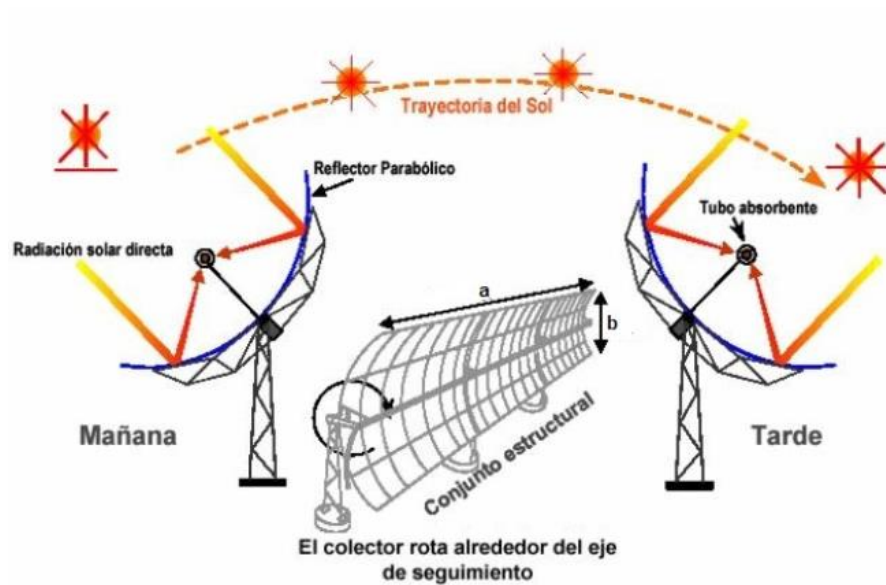


Fuente: Paredes, (2012). *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay.*

8.7.2.3. Sistema de seguimiento solar

Los colectores cilíndricos parabólicos se diseñan con seguimiento del Sol con el objetivo de aprovechar la mayor parte de horas posibles de luz, de forma que la radiación solar llegue lo más perpendicularmente posible al colector y se mantengan en el foco lineal continuamente.

Figura 8. Esquema de seguimiento colector cilíndrico parabólico



Fuente: Paredes, (2012). *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay.*

Los colectores cilíndrico parabólicos tienen una alta eficiencia termodinámica en comparación a otros colectores por lo cual son muy funcionales en usos industriales, siendo utilizados en la producción de acetona, industria láctea y en producción de electricidad.

Una desventaja del colector cilíndrico parabólico es que no capta la radiación difusa, por lo que es necesario invertir en sistemas de seguimiento.

A continuación se detalla toda la fase de cálculo de eficiencia de un colector cilíndrico parabólico.

8.7.3. Concentración geométrica colector cilíndrico parabólico

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

Donde:

C = Concentración geométrica colector cilíndrico parabólico

A = Área de apertura del colector

L = Longitud del colector

D = Diámetro del tubo receptor de calor

8.7.4. Pérdidas térmicas del colector cilíndrico parabólico

$$Q_L = U_L * \pi * D * L * (T_{abs} - T_{amb})$$

Donde:

Q_L = Pérdidas térmicas del colector cilíndrico parabólico

U_L = Coeficiente global de transferencia

D = Diámetro del tubo metálico absorbente

L = Longitud del tubo metálico absorbente

T_{abs} = Temperatura media del tubo absorbente

T_{amb} = Temperatura ambiente

8.7.5. Energía solar incidente en el colector cilíndrico parabólico

$$Q_{sol} = S_C * I_0 * \text{Cos}\theta$$

Donde:

Q_{sol} = Energía solar incidente en el colector cilíndrico parabólico

S_C = Área de apertura de la superficie reflexiva del colector

I_0 = Radiación solar directa

$\text{Cos}\theta$ = Ángulo de incidencia.

8.7.6. Energía térmica útil del colector cilíndrico parabólico

$$Q_{util} = Q_m * (h_{out} - h_{in})$$

Donde:

Q_{util} = Energía útil del colector cilíndrico parabólico

Q_m = Caudal másico del fluido de trabajo

h_{out} = Entalpía de salida del fluido de trabajo

h_{in} = Entalpía de ingreso del fluido de trabajo

8.7.7. Rendimiento del colector cilíndrico parabólico

$$n_{global} = \frac{Q_{util}}{Q_{sol}}$$

Donde:

n_{global} = rendimiento del colector cilíndrico parabólico

Q_{util} = Energía útil del colector cilíndrico parabólico

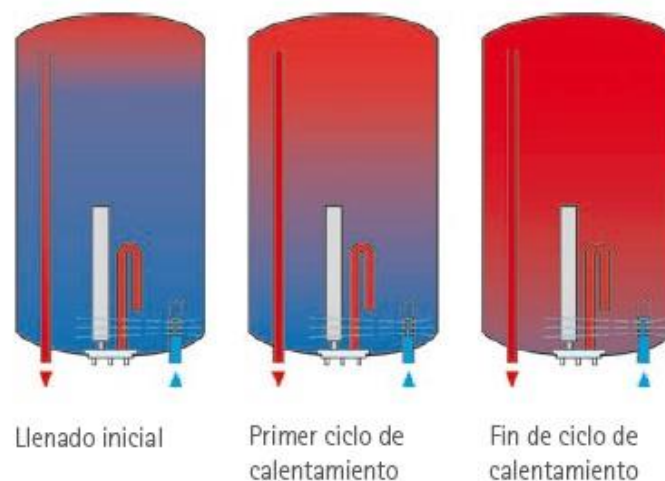
Q_{sol} = Energía solar incidente en el colector cilíndrico parabólico

8.8. Termo eléctrico

Los termos eléctricos son equipos diseñados para proporcionar agua caliente. Su funcionamiento es muy sencillo, el interior del termo denominado calderín siempre se encuentra lleno de agua y a una determinada presión. Cuando el agua dentro del calderín detecta que está a la temperatura deseada el termostato interrumpe la alimentación de corriente a la resistencia.

El principio de funcionamiento de un termo se basa en la estratificación de diferentes temperaturas del agua, es decir, el agua forma capas a diferentes temperaturas que no se mezclan entre sí. Lo anterior debido a que cuando el agua está caliente se expande por lo que su densidad es baja mientras que cuando está frío su densidad es mayor.

Figura 9. Funcionamiento de un termo eléctrico



Fuente: Construmática, (2019). *Funcionamiento básico del termo eléctrico*.

8.9. Valor presente neto

El valor presente neto (VPN) es un método muy conocido utilizado para evaluar proyectos de inversión a largo plazo. El valor presente neto es una herramienta que permite determinar si una inversión logra cumplir con el objetivo básico financiero: el cual es maximizar la inversión. El valor presente neto determina si la inversión puede incrementar o reducir el valor de las pequeñas y medianas empresas.

Es importante tener en cuenta que el valor del valor presente neto depende de las siguientes variables: La inversión inicial previa, las inversiones durante la operación, los flujos netos de efectivo, la tasa de descuento y el número de periodos que dure el proyecto.

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

Donde:

V_t = Flujos de caja en cada periodo

k = Tasa de interés utilizada

t = Periodo

n = Periodo o tiempo de cada etapa del proyecto

I_0 = Inversión inicial de proyecto

9. ÍNDICE DE CONTENIDO PROPUESTO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN.

1. MARCO TEORICO

1.1 ASPECTOS GENERALES DE LA INDUSTRIA DE MINERALES

1.1.1 Campo de la industria de minerales

1.1.2 Proceso de descarbonatación

1.1.3 Hornos

1.1.4 Combustibles

2. ESCENARIO INICIAL

2.1 Descripción de proceso actual para la preparación de combustibles

2.2 Tipos de secado

2.3 Propuesta de tipos de Secadores

3. DISEÑO DE SECADOR

3.1 Secado de carbón mineral

- 3.2 Consideraciones
 - 3.2.1 Cuidados de almacenamiento de carbón mineral
 - 3.2.2 Temperatura de aire de secado
 - 3.2.3 Diseño de sistema híbrido
 - 3.2.4 Cantidad de parábolas solares
 - 3.2.5 Cantidad de resistencias
 - 3.2.6 Secado en molino de bolas

- 4. IMPACTO AMBIENTAL
 - 4.1 Disminución en emisión de vapor
 - 4.2 Disminución en emisión de monóxido de carbono
 - 4.3 Implementación de bosques energéticos

- 5. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 6. MARCO METODOLÓGICO
 - 6.1 Concentración geométrica colector cilíndrico parabólico
 - 6.2 Perdidas térmicas del colector cilíndrico parabólico
 - 6.3 Energía solar incidente en el colector cilíndrico parabólico
 - 6.4 Energía térmica útil del colector cilíndrico parabólico
 - 6.5 Rendimiento del colector cilíndrico parabólico
 - 6.6 Agua removida
 - 6.7 Balance de aire
 - 6.8 Eficiencia del proceso
 - 6.9 Valor presente neto

- 7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
 - 7.1 Diseño secador de carbón subbituminoso
 - 7.2 Análisis financiero

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS
9. CONCLUSIONES
10. RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS

10. METODOLOGÍA

Será un estudio que busca mediante la investigación de conceptos de transferencia de calor obtener un dato cuantitativo para el diseño de un sistema de secado para el carbón subbituminoso, utilizado como combustible en procesos de calcinación en la industria de minerales mediante el uso combinado de parábolas solares y resistencias eléctricas.

10.1. Datos y variables

Para el diseño del sistema de secado, se utilizarán datos históricos de operación de un horno giratorio ubicado en el municipio de Palencia, en la aldea el Fiscal. Estos datos serán el punto de partida para el cálculo de las diferentes variables cuantitativas, también llamadas datos de diseño, que serán la base para la determinación de la viabilidad del proceso, basados en los costos de implementación, en el análisis financiero.

10.1.1. Datos

Los datos base serán recaudados a partir de los datos de producción de una calera en Guatemala, que utiliza como combustible el carbón subbituminoso, sin proceso de secado previo; los datos serán tanto de producción como de resultados de análisis del carbón, dentro de los que podemos mencionar:

- Temperaturas
- Alimentación de materia prima
- Alimentación de combustible

- Humedad del combustible
- Presión del sistema
- Flujo de aire

10.1.2. Variables

Para diseñar el proceso se deben de calcular las siguientes variables:

- Capacidad de transferencia de calor de las parábolas
- Capacidad de transferencia de calor de las resistencias
- Balance de aire
- Perdidas al calentar el secador
- Perdidas al calentar el sólido
- Agua a remover.

10.2. Delimitación de campo de estudio

- Campo: Diseño de proceso.
- Área: Operaciones unitarias
- Línea: Secado
- Proyecto: Diseño de investigación del proceso de secado del carbón subbituminoso utilizado como combustible en un proceso térmico de descarbonatación en empresas de la industria de minerales.
- Industria: Industria de minerales.

10.3. Recursos humanos disponibles

Se enumeran a continuación el capital humano a utilizar para la elaboración del diseño de investigación.

10.3.1. Recursos humanos

- Investigadora: Maira Ninett Cecaida Mijangos
- Asesor: Ing. Juan Amílcar López
- Director de escuela de Ingeniería química: Ing. Williams Álvarez
- Consultor: Ing. Víctor Orozco

10.3.2. Recursos materiales disponibles

Para elaborar el diseño de investigación se necesitan diferentes recursos los cuales se dividen en las siguientes categorías:

10.3.2.1. Equipo de medición

- Medidor de temperatura
- Medidor de presión

10.3.2.2. Fuentes de información

- Tesis y documentos de secado de carbón
- Datos de análisis de funcionamiento
- Especificaciones

10.3.2.3. Equipo

- Computadora

10.4. Técnica cualitativa o cuantitativa

Consiste en una investigación cuantitativa que busca obtener datos para el diseño de un sistema de secado aplicable en la industria.

10.5. Recolección y ordenamiento de la información

- Se analizará el comportamiento de la temperatura de un horno de calcinación durante su funcionamiento, sin un proceso de secado de carbón.
- Se tomará en cuenta la humedad promedio del carbón durante la operación.
- Se analizará el tamaño del molino con el tiempo de retención del carbón en este.
- Se decidirá una temperatura adecuada para el debido secado del carbón.
- Cálculo de la cantidad de agua que se desea remover del sólido.
- Determinación del volumen de aire que ingresa al sistema según la succión del motor.
- Determinación de la temperatura del agua y su cantidad para la transferir el calor necesario para el calentamiento del aire en el proceso de secado.
- Determinación de la eficiencia teórica del sistema de secado.
- Comparación de resultados con estudios previos con secado de carbón a partir de gases de chimenea.
- Cálculo de la factibilidad del proyecto.

10.6. Fase de investigación

Como parte del diseño del sistema de secado para el carbón subbituminoso, se analizará la opción y los costos de un secado de carbón con gases de chimenea, utilizado en la misma industria, para este proceso se analizarán diferentes documentos, libros y tesis para posteriormente realizar una comparación de viabilidad, y costos de producción con la propuesta y el uso de un sistema híbrido de secado de energía eléctrica y energía solar.

10.7. Fase de análisis

En esta etapa se plantea un borrador de la explicación y la discusión de los mismos, tratando de generar una explicación de los cálculos realizados para concretizar las especificaciones de los equipos, las modificaciones, los costos de implementación y la viabilidad de secador de carbón subbituminoso, para una pequeña empresa de la industria de minerales, específicamente la industria de producción de óxidos.

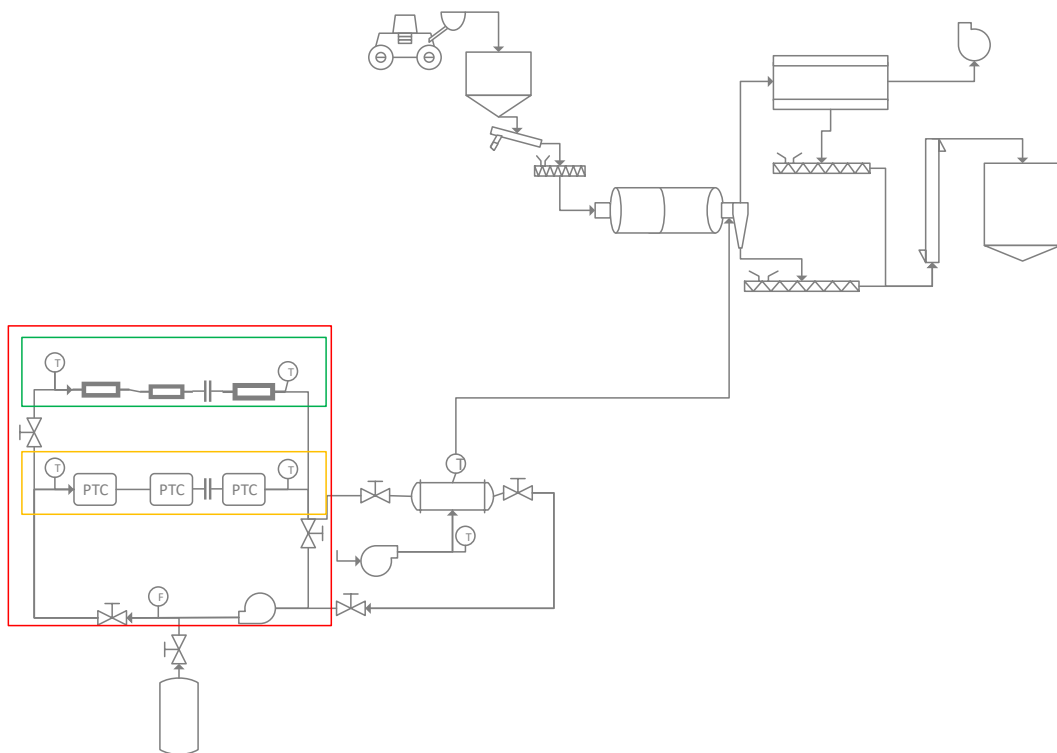
10.8. Programas a utilizar para análisis de datos

Como programa herramienta para la realización de este diseño de investigación se trabajará con Microsoft Office especialmente con Word para la redacción de los informes, Excel para el cálculo y Visio para el desarrollo de diagramas de proceso de ser necesarios.

10.9. Diagrama del proceso propuesto




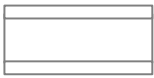
Se presenta a continuación un esquema del diagrama de proceso propuesto para el diseño de investigación.

Figura 10. Diagrama del proceso propuesto


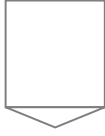


Fuente: elaboración propia, empleando Office Visio.

Tabla II. Descripción de elementos de diagrama de proceso propuesto

Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo
Medidor de temperatura		Intercambiador de calor	
Medidor de flujo		Bomba	
Válvulas de paso		Ventilador	
Calentador eléctrico		Calentadores parabólicos solares	
Tanque de agua		Zona de precalentamiento	
Zona sistema eléctrica		Zona sistema solar	
Máquina de alimentación		Tolva de alimentación	
Alimentador vibratorio		Transporte helicoidal	
Molino de bolas		Filtro de mangas	

Continuación tabla II

Elevador transportador		Silo de almacenamiento	
------------------------	---	------------------------	---

Fuente: elaboración propia.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el diseño del proceso de secado del carbón subbituminoso utilizado como combustible en un proceso térmico de descarbonatación en empresas de la industria de minerales, se necesitarán del cálculo y el análisis de variables por lo que se trabajará bajo los principios de las operaciones unitarias.

Los conceptos que se utilizarán de las operaciones unitarias estarán basados en los fenómenos de transferencia de masa y calor, y la combinación de los mismos, ya que se analizaran dos etapas, la primera la transferencia de calor por convección con el calentamiento del aire y la segunda etapa es donde se combinan las operaciones unitarias de transferencia de masa y calor, las cuales suceden en simultáneo en el proceso de secado, y las variables que se manejan dan la pauta para para el funcionamiento y diseño del proceso.

Además, se deben de analizar la factibilidad del proyecto se basará en el análisis de los costos de las modificaciones necesarias para la implementación del proceso, para lo que se usará el valor presente neto como herramienta.

12. CRONOGRAMA

Tabla III. **Cronograma de actividades para realización de diseño de investigación**

Actividad	Febrero			marzo				abril				mayo					junio			
	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Diseño de recolección parábola																				
Sistema de calentamiento de aire																				
Diseño sistema de secado																				
Análisis financiero																				
Análisis de datos																				
Elaboración de informe final																				

Fuente: elaboración propia.

13. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Tabla IV. **Costos de recursos necesarios para el diseño de investigación**

INSUMO	Costo Unitario	Meses	Costo Total
Recurso humano			
Asesor maestro	Q 200,00	6	Q 1 200,00
Ingeniero de pregrado estudiante	Q -	6	Q -
Equipo			
Energía eléctrica	Q 50,00	6	Q 300,00
Teléfono celular e internet	Q 75,00	6	Q 450,00
Tinta y hojas para impresora	Q 50,00	2	Q 100,00
Útiles de librería	Q 50,00	1	Q 50,00
Computadora	Q -	6	Q -
Impresora	Q -	6	Q -
Total			Q 2 100,00

Fuente: elaboración propia.

13.1. Factibilidad

En la tabla 2 se puede observar los costos aproximados para realizar el diseño de investigación del secador de carbón subbituminoso, los cuales son factibles para que el ingeniero de pregrado, estudiante de maestría pueda cubrirlos en su totalidad, por lo que el proyecto es factible.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aldamiz, J. (1934). *La central de figols de la energia electrica de cataluña*. Barcelona, España: Dyna.
2. Brown, T., LeMay, H., & Bursten, B. (2004). *Química la ciencia central*. México: Pearson Educación.
3. Calderon, C. (2005) *Estudio de prefactibilidad económica para la utilización de carbón mineral en la fabricación de cal viva*. Tesis ingeniería química. Universidad de San Carlos. Facultad de ingeniería.
4. Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. México: Mc Graw Hill.
5. Dangond, J. & Baute, A. (2007). *Diseño básico de un sistema secador de carbón utilizando gases de combustión*. Tesis ingeniería química. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería.
6. Duda, W. (1977). *Cemento, manual tecnológico*. Barcelona: Editores técnicos asociados, S.A.
7. Green, D. & Perry, R. (2008). *Manual del ingeniero químico*. Estados Unidos: McGraw-Hill.

8. Hasen, K. (2008). *Water vapor confirmed as major player in climate change*. Estados Unidos: NASA's Goddard Space Flight Center.
9. Hernández, L., Mejía, J., Vanegas, M., Alvarado, M. & Barranco, R. (2012). *Variables influyentes en el secado discontinuo del carbón asistido con microondas*. Colombia: Prospect.
10. Kamat, P. (2007). *Meeting the clean energy demand: nanostructure architectures for solar energy conversion*. *journal of physical chemistry*. Estados Unidos: American Chemical Society.
11. Labahn, O. (1985). *Prontuario de cemento*. Barcelona, España: Editores técnicos asociados, S.A.
12. McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Madrid: McGraw-Hill.
13. Nonhebel, G. & Arnold, A. (1971). *Drying of solids in the chemical industry*. London: Butterworths.
14. Paredes, C. (2012). *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*. Tesis ingeniería de técnico en minas. Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Departamento de física aplicada a los recursos naturales.
15. Parekh, B. & Groppo, J. (1998). *Enhanced ultrafine coal dewatering using flocculation filtration processes*. Kentucky. Estados Unidos: Department of Mining Engineering.

16. Wilson, J. & Honaker, R. (1994). *Ultrafine coal single stage dewatering and briquetting process*. Estado de Illinois. Estados Unidos: Geological Survey, Champaign, IL.

