



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE
REINYECCIÓN DE CENIZA EN UNA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA-CARBÓN**

Kevin René Ocaña Mejía

Asesorado por el Msc. Ing. José Andrés Escobar Iriarte

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE
REINYECCIÓN DE CENIZA EN UNA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA-CARBÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KEVIN RENÉ OCAÑA MEJÍA

ASESORADO POR EL MSC. ING. JOSÉ ANDRÉS ESCOBAR IRIARTE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

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. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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 DEL IMPACTO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE REINYECCIÓN DE CENIZA EN UNA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA CARBÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de enero de 2022.

Kevin Rene Ocaña Mejía



EEPFI-PP-0070-2022

Guatemala, 12 de enero de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

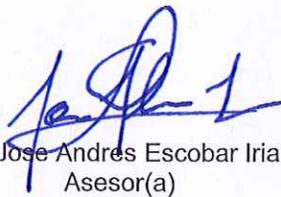
Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **IMPACTO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE REINYECCIÓN DE CENIZA EN UNA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA CARBÓN**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Todas las áreas - Nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica**, presentado por el estudiante **Kevin René Ocaña Mejía** carné número **201403952**, 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 Gestión De Mercados Eléctricos Regulados.

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, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

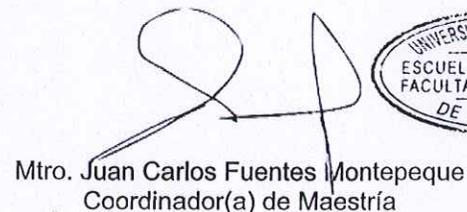
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

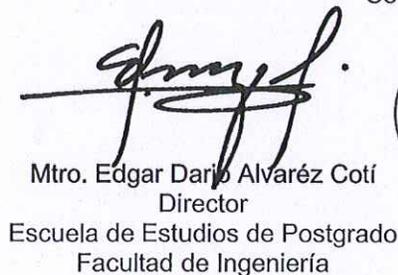


Mtro. José Andrés Escobar Iriarte
Asesor(a)

José Andrés Escobar I.
Ingeniero Electricista
Col. 13177



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0070-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **IMPACTO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE REINYECCIÓN DE CENIZA EN UNA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA CARBÓN**, presentado por el estudiante universitario **Kevin René Ocaña Mejía**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, followed by a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

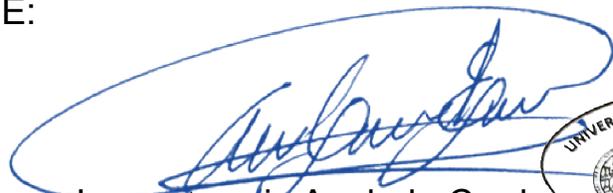
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.228.2022

La Decana 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 Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE REINYECCIÓN DE CENIZA EN UNA CENTRAL TÉRMICA DE BIOMASA-CARBÓN**, presentado por: **Kevin René Ocaña Mejía**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ingra. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por sobre todas las cosas.
Mis padres	Miriam Mejía y Edgar Ocaña. Por su apoyo incondicional y ser guía durante mi vida.
Mi hermana	Victoria Ocaña. Por su gran apoyo y compañía en mi vida.
Mis amigos	Por su amistad sincera y quienes me han ayudado cuando lo he necesitado.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme realizar mis estudios universitarios.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme el conocimiento necesario para realizar este trabajo de graduación.
Mi familia	Tíos y primos cercanos que han estado conmigo en muchos momentos de mi vida y con quienes puedo contar.
Mis amigos de la facultad	Por su ayuda y momentos compartidos durante todo el proceso de la carrera de estudio.
Mi asesor	Ing. José Andrés Escobar, por su ayuda y asesoría para la culminación de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	7
3.3. Formulación del problema	8
3.4. Delimitación del problema	9
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Generalidades de una central térmica convencional	17

7.1.1.	Tipos de centrales térmicas de vapor.....	18
7.1.2.	Funcionamiento de una central térmica de vapor....	20
7.1.3.	Elementos de una central térmica de vapor	23
7.1.3.1.	Hogar.....	24
7.1.3.2.	Parrilla (Stoker)	24
7.1.3.3.	Paredes de tubos de agua	25
7.1.3.4.	Sobrecalentadores (superheaters)	25
7.1.3.5.	Economizador	26
7.1.3.6.	Chimenea	26
7.1.3.7.	Turbina de vapor	27
7.1.3.8.	Condensador.....	28
7.2.	Eficiencia de una caldera de vapor	28
7.2.1.	Proceso de combustión y sus pérdidas	29
7.2.1.1.	Pérdidas de energía en las cenizas	31
7.3.	Proyecto de reinyección de ceniza.....	32
7.3.1.	Modificaciones sobre la caldera de vapor	33
7.4.	Mercado eléctrico nacional.....	35
7.4.1.	Estructura del mercado eléctrico nacional.....	36
7.4.2.	Tipos de mercado.....	38
7.4.2.1.	Mercado a término	38
7.4.2.2.	Mercado de oportunidad (Mercado spot)	39
7.4.3.	Matriz energética nacional.....	39
7.5.	Precio de venta de la energía	41
7.5.1.	Costos variables de generación	42
7.5.2.	Pérdidas de transmisión.....	43
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	45

9.	METODOLOGÍA.....	49
9.1.	Características del estudio	49
9.2.	Unidades de análisis	49
9.3.	Variables.....	50
9.4.	Fases del estudio	51
9.4.1.	Fase 1: Cuantificación de carbón utilizado para la generación de energía	51
9.4.2.	Fase 2: Determinación del cambio de eficiencia en la central	52
9.4.3.	Fase 3: Determinación y comparación de los costos variables de generación de la central	53
9.4.4.	Fase 4: Recolección de datos de energía vendida en el mercado de oportunidad	53
9.5.	Resultados esperados	54
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	57
11.	CRONOGRAMA.....	61
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	63
13.	REFERENCIAS.....	65
14.	APÉNDICES.....	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución del trabajo de investigación.....	16
2.	Ciclo Rankine simple.....	22
3.	Proceso de quema del carbón	30
4.	Formas de recirculación de cenizas en centrales térmicas	34
5.	Estructura del mercado nacional.....	37
6.	Generación de energía año 2020.....	41

TABLAS

I.	Clasificación del carbón	20
II.	Clases de tiro en las chimeneas de las calderas	27
III.	Formas de recircular cenizas en calderas de vapor.....	33
IV.	Tipos de contratos en el mercado a término guatemalteco.....	38
V.	Variables de estudio.....	50
VI.	Descripción de las variables de estudio	51
VII.	Tabla de cantidad de carbón utilizado.....	52
VIII.	Determinación del cambio de eficiencia de la central	53
IX.	Tabla de cantidad de energía generada.....	54
X.	Cronograma de actividades	61
XI.	Recursos necesarios para la investigación	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BTU	<i>British thermal unit</i> (unidad térmica británica)
USD	Dólar estadounidense
kV	Kilovoltio
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
m	Metro
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
t	Tonelada métrica
W	Vatio

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista. Ente encargado de la operación y coordinación de las transacciones de los participantes del mercado mayorista.
CENGICAÑA	Centro guatemalteco de capacitación e Investigación de la caña de azúcar.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
CVG	Costo Variable de Generación. Son los costos asociados a la operación y mantenimiento de una central generadora.
MEM	Ministerio de Energía y Minas. Es el órgano del Estado responsable de coordinar y formular las políticas, planes y programas relativos al sector eléctrico de Guatemala.
Spot	Es el costo marginal de corto plazo de la energía eléctrica en cada hora.

RESUMEN

En un mercado mayorista las centrales generadoras buscan reducir los precios de venta de la energía despachada con el objetivo de ser más competitivas en el mercado. La implementación de un sistema de reinyección de cenizas se presenta como una posible solución para lograr dicho objetivo.

La presente investigación busca determinar el impacto económico del proyecto de reinyección de ceniza de una central térmica de biomasa/carbón que oferta en el mercado de oportunidad de Guatemala.

Para determinar el impacto económico global se hará un estudio ex post facto para comparar el antes y el después de la implementación del sistema de reinyección analizando las variables de cantidad de combustible utilizado, eficiencia energética de la central, costos variables de generación y cantidad de energía despachada.

Se espera encontrar que después de la implementación del sistema de reinyección hubo cambios significativos en todas las variables en estudio y que la cantidad de energía despachada en el mercado de oportunidad sufrió un cambio lo cual permitiría concluir que si existe un impacto económico significativo y que existe en principio una correlación entre las variables.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación busca determinar el impacto económico de la implementación de un sistema de reinyección de ceniza en una central térmica de biomasa-carbón ubicada en el departamento de Escuintla que oferta en el mercado de oportunidad nacional.

La importancia de la implementación del sistema en la central térmica radica en que permite a la central ser más competitiva para poder despachar mayor cantidad de energía y de esta forma poder aprovechar eficientemente sus instalaciones.

El desarrollo de la investigación se llevará a cabo haciendo una comparación de variables antes de la implementación del sistema de reinyección en los años 2018, 2019, 2020 y 2021. En su primera fase se recopilarán datos de la cantidad de carbón utilizado de la central, luego se procederá a realizar el cálculo de la eficiencia energética de la central, posteriormente se revisará y calcularán los nuevos costos variables de generación y por último se recopilarán datos de la cantidad de energía vendida en el mercado de oportunidad. Al final se determinará la variabilidad de las variables de estudio antes y después de la implementación del sistema y se hará un análisis financiero del mismo.

La investigación pretende ahondar en el impacto económico global de la implementación del sistema de ceniza ya que en la actualidad se conoce que puede representar un ahorro de combustible utilizado. Sin embargo, aún no existen estudios que aborden otros factores como lo son la eficiencia de la central, los costos variables de generación y los precios de venta energía en un

mercado mayorista como al que pertenece la central térmica en estudio. Esto con el objetivo de brindar un mejor panorama del impacto económico sobre como aumentar la competitividad de la central en el mercado mayorista.

El estudio es factible pues las herramientas necesarias pueden ser cubiertas por el investigador y la información necesaria es de dominio público o en su defecto será facilitada por la central térmica en estudio.

En los antecedentes se hará una recopilación de estudios previos y antecedentes relacionados al tema de reinyección de ceniza. El marco teórico presentara los conceptos teóricos sobre centrales térmicas, sus componentes, las modificaciones necesarias para la reinyección de ceniza, finalizando con una descripción del mercado eléctrico guatemalteco y los precios de venta de la energía. Se describe la metodología y las fases de investigación a seguir.

2. ANTECEDENTES

Sarceño (2020) en su tesis de ingeniería realiza la propuesta de un proyecto para la recuperación de ceniza y su posterior reutilización para el ahorro de combustible de la central térmica del Ingenio Santa Ana ubicada en Escuintla, aquí se analiza de forma teórica la cantidad de combustible que se ahorra la central y los elementos necesarios para su implementación. Aquí se dan las pautas a nivel propuesta sobre la implementación de este sistema en una central térmica en Guatemala.

Muñoz (2019) describe los distintos métodos para realizar la recirculación de ceniza en centrales térmicas de vapor, recomendando la recirculación de los residuos del sobre calentador. Según menciona la rentabilidad de la recirculación dependerá de la tecnología a utilizar y del volumen total de residuos a recircular, sin embargo, no recircularlos representará una pérdida de combustible y una menor eficiencia en la disposición de los desechos del proceso.

En la Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadores de vapor, Muñoz (2015), se describe el proceso de generación de energía de una central térmica cogeneradora y sus pérdidas de energía más comunes. Describe métodos para su cálculo y recomendaciones para disminuir estas pérdidas energéticas.

En su informe anual el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña (CENGICAÑA) (2020), presenta los avances, investigaciones y resultados llevados a cabo por dicha institución, todos ellos relacionados con la industria cañera en el país. Dentro del informe se presentan

propuestas para la mejora de la eficiencia en centrales cogeneradoras entre las que se menciona la aplicación de sistemas de reinyección de ceniza como proyectos factibles para la mejora de la eficiencia energética en las centrales térmicas cogeneradoras de Guatemala.

Álvarez (2010), en su tesis de maestría habla sobre las oportunidades que ofrece el mercado eléctrico regional centroamericano al mercado eléctrico nacional guatemalteco. Aquí se resume de buena manera la estructura y funcionamiento del mercado eléctrico nacional que es de importancia para el presente trabajo de investigación.

Navarro (2015), en su trabajo de graduación recopila información de las causas y soluciones para la reducción del porcentaje de inquemados existentes en las cenizas generadas con la quema del combustible en la central térmica Duke Energy ubicada en Escuintla. Se plantean propuestas para su reducción y se hace un análisis económico de dichas soluciones presentadas.

Dammert, Garcíay Molinelli (2010), describen el funcionamiento de un mercado eléctrico mayorista, sus problemas, sus retos y sus ventajas. Analizan los costos de la generación de energía y cómo esto afecta el mercado.

Ramírez (1995), describe los elementos que constituyen las centrales eléctricas y su estructura interna. Se estudian las centrales hidráulicas, térmicas y nucleares, en cada una de ellas se describen sus componentes y el principio de funcionamiento de cada uno de ellos.

Severns (1982) describe los tipos y funcionamiento de las centrales térmicas de vapor, gas y centrales combinadas. Se estudian los elementos que

las conforman y su funcionamiento. Se analizan las ventajas y desventajas de los distintos tipos de combustibles y el funcionamiento de una central real.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

El presente trabajo de investigación se enfoca en la necesidad de las centrales térmicas de carbón que ofertan en el mercado de oportunidad de reducir sus precios de la energía que son directamente proporcionales a sus costos variables de generación. Los costos variables de generación de una central térmica, según el artículo 44 del Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, deberán estar asociados al tipo de combustible, costo de operación y mantenimiento, al costo de arranque y parada de las máquinas, así como a su eficiencia.

Ante esta necesidad, la implementación de un sistema de reinyección de ceniza se presenta como una posible solución al mejorar la eficiencia de la central, sin embargo, no se cuenta con la suficiente información sobre el impacto generado por un proyecto de este tipo en el contexto del mercado nacional. Este es el punto de partida para analizar la implementación de un sistema de reinyección de ceniza en una central térmica de carbón y poder cuantificar sus impactos económicos generados.

3.2. Descripción del problema

Altos precios de venta de la energía y costos variables de generación causados por la gran cantidad de combustible utilizado, alto costo del mismo e ineficiencia energética de la central. Como consecuencia la central se vuelve poco competitiva en el mercado eléctrico nacional.

3.3. Formulación del problema

La formulación del problema se basa en preguntas de investigación que se desglosan de la siguiente manera.

- Pregunta central

¿Cuál es el impacto económico de un sistema de reinyección de ceniza en una central de biomasa-carbón que oferta en el mercado de oportunidad nacional?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuánto se reduce la utilización de carbón utilizando el sistema de reinyección de ceniza?
- ¿Qué cambios provoca en la eficiencia energética la adición de un sistema de reinyección de ceniza?
- ¿Cuáles son los costos variables de generación en la central con el sistema de reinyección de ceniza?
- ¿Cuál es la diferencia de cantidad de energía vendida en el mercado de oportunidad con la adición del sistema de reinyección de ceniza?

3.4. Delimitación del problema

El problema se limita a la implementación de un sistema reinyección de ceniza a un bloque de generación en central térmica convencional de biomasa-carbón que oferta energía en el mercado de oportunidad de Guatemala, ubicada en el departamento de Escuintla. El sistema fue implementado en el año 2021 y se considerará la información de los tres años anteriores antes de la implementación del sistema de reinyección.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación se encuentra bajo la línea de investigación de análisis de impactos de la innovación tecnológica de la maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

En el mercado eléctrico guatemalteco las centrales de generación que operan en el mercado de oportunidad, para poder ser más competitivas, se encuentran en la constante necesidad de reducir los costos asociados a la generación para reducir el precio de venta de la energía. En una central térmica de biomasa-carbón, la implementación de un sistema de reinyección de ceniza se presenta como una alternativa para aumentar la eficiencia energética de la central y de esta manera poder reducir dichos costos.

Actualmente se desconocen los impactos económicos de la implementación de dicho sistema en el contexto del mercado de oportunidad guatemalteco, en donde los precios de la energía son bastante competitivos debido a las distintas alternativas de generación de energía con las que cuenta el país. Dichos impactos se pretenden determinar mediante la cuantificación y comparación de indicadores económicos y energéticos antes y después de la implementación del sistema de reinyección de ceniza, conociendo la inversión económica real del mismo.

A partir de los resultados, se pretende beneficiar a la central térmica estudiada ya que podrá determinar si la implementación del sistema de reinyección causa una diferencia en su eficiencia, en sus costos variables de

generación y la cantidad de energía despachada por la central, operando en el mercado de oportunidad nacional.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el impacto económico de un sistema de reinyección de ceniza en una central térmica de biomasa-carbón que oferta en el mercado de oportunidad nacional.

5.2. Específicos

- Cuantificar la cantidad de carbón que se reduce con el sistema de reinyección de ceniza.
- Determinar el cambio en la eficiencia energética de la central con el sistema de reinyección de ceniza.
- Calcular los costos variables de generación de la central con el sistema de reinyección de ceniza.
- Determinar la diferencia en la cantidad de energía vendida en el mercado de oportunidad con la adición del sistema de reinyección de ceniza.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

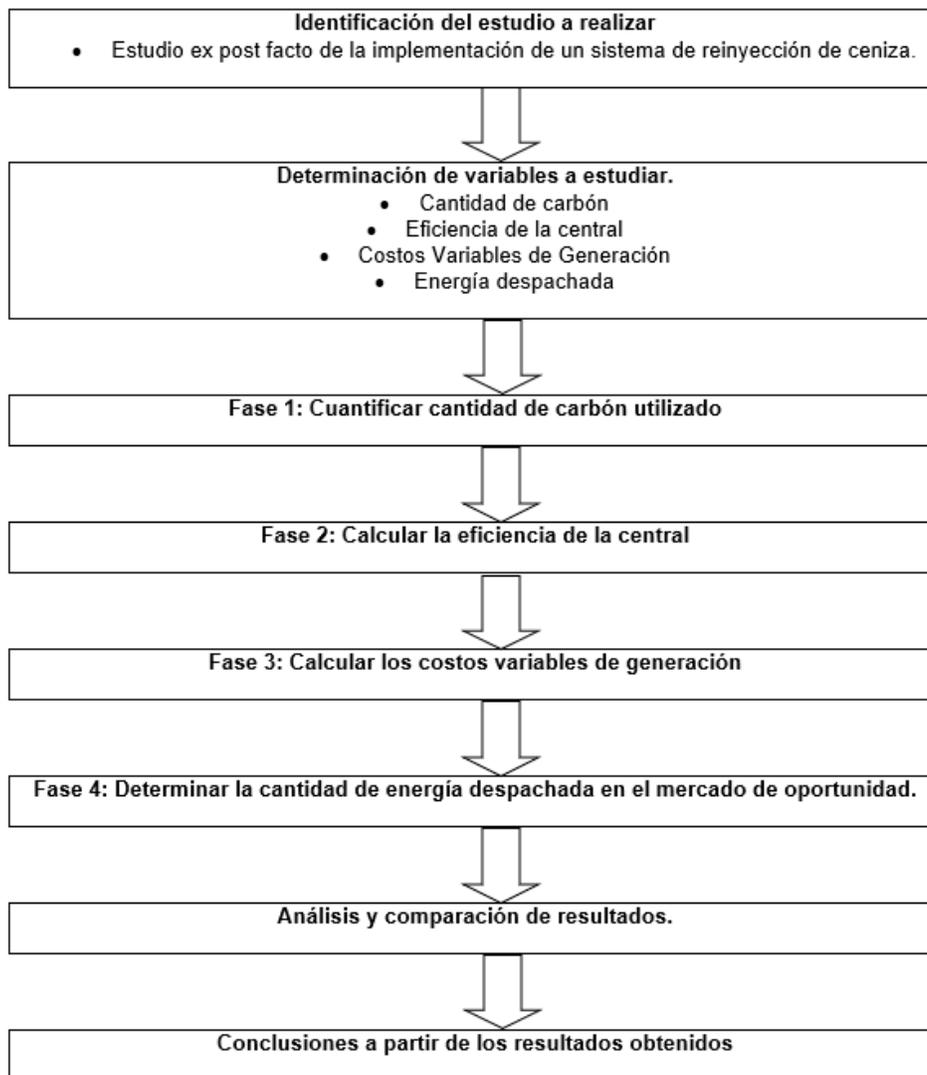
En el presente trabajo de investigación se determinará el impacto económico de la implementación del sistema de reinyección de ceniza en la central térmica de biomasa-carbón estudiada.

Con base a estudios realizados en otras centrales similares se conoce que la implementación del sistema presentaría una reducción de la cantidad de combustible (carbón) utilizado, sin embargo, con la implementación del sistema de reinyección de ceniza se pretende cubrir la necesidad de la central de ser más competitiva en el mercado eléctrico nacional y obtener información sobre otros aspectos relacionados como el efecto en la eficiencia energética global de la central y sus costos variables de generación lo cual está directamente ligado al precio de venta de energía y la cantidad de energía despachada en el mercado de oportunidad nacional guatemalteco.

Con esto en consideración el estudio abarcará no solo aspectos internos sino cómo la afectan aspectos externos de la central como lo son los precios de venta de energía de las demás centrales que operan en el país con los distintos tipos de tecnologías instaladas y tomando en consideración los aspectos climáticos estacionales propios de la región, y otros como los precios de venta de carbón y la legislación y normativas aplicables a las centrales de generación térmicas en Guatemala para obtener un panorama completo sobre como la implementación del sistema puede aumentar la competitividad de la central en el mercado nacional.

El esquema de solución propuesto como diagrama de flujo se plantea de la siguiente manera.

Figura 1. **Esquema de solución del trabajo de investigación**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

7. MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico se divide en cinco capítulos que se desglosan de la siguiente manera. Se describen las generalidades de una central térmica convencional, los tipos de centrales que existen, su funcionamiento y los elementos que la conforman. Se trata el tema de la eficiencia en las calderas que es el elemento más importante de la central térmica, y sobre las pérdidas que existen en la misma y su manera de calcularlas. Se habla sobre la reinyección de ceniza en las calderas, se describe en qué consiste y de qué manera debe modificarse la caldera para poder aplicarse. Se describe el mercado eléctrico guatemalteco, sus participantes y sobre cómo se comercia la energía eléctrica en el país. Por último, se describe como una central generadora establece los precios de venta de energía en el país y de qué dependen los mismos para poder ser competitivos en el mercado.

7.1. Generalidades de una central térmica convencional

Una central eléctrica son los conjuntos completos de maquinaria de accionamiento, generadores, dispositivos de control y protección, entre otros. Utilizado para producir electricidad. Cuando la electricidad es producida por una máquina termoeléctrica, la planta de energía se llama planta de energía térmica. (Ramírez, 1995, p. 15)

Las centrales térmicas convencionales, también llamadas termoeléctricas convencionales, utilizan combustibles fósiles (gas natural, carbón o fueloil) para generar energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor. El

término convencional se utiliza para diferenciarlas de otras centrales térmicas, como las de ciclo combinado o las nucleares (Fundación Endesa, 2021).

Basándose en la clase de medio y el punto donde tiene lugar la combustión, las centrales térmicas se clasifican en tres grupos: centrales de vapor, centrales de motores de combustión interna y centrales de turbina de gas. Cada grupo requiere para su buen funcionamiento un equipo adecuado. Cada máquina principal de una central térmica utilizada para la conversión de energía calorífica en trabajo mecánico útil se denomina máquina motriz. (Severns, 1982, p. 18)

7.1.1. Tipos de centrales térmicas de vapor

Todas las centrales térmicas de vapor poseen un funcionamiento similar y se pueden diferenciar por el tipo de combustible que utilizan para su funcionamiento. El combustible más comúnmente utilizado es el carbón.

Otras fuentes de calor incluyen diversos materiales de biomasa y subproductos de procesos industriales, como turba, madera y sus desechos, paja, posos de café, desechos de minas de carbón, calor residual de plantas de acero, energía geotérmica y solar, así como por productos de ciertos procesos de generación de vapor relacionados con el reciclaje, como la fabricación de celulosa, residuos sólidos urbanos y destrucción de residuos sanitarios peligrosos. (Fernández, 1996, p. 1)

Cómo menciona Gadea (2008), “las centrales térmicas clásicas cuyo diseño les permite quemar vagamente diferentes combustibles fósiles (carbón o gas natural, carbón, entre otros) se denominan centrales térmicas híbridas” (p. 6).

Las centrales térmicas mixtas de biomasa/carbón o biomasa/búnker son comunes en Guatemala, ya que estas, durante la época de zafra funcionan con biomasa y en la época de no zafra quemán el combustible alternativo.

A continuación, se describen los combustibles más utilizados en el país para centrales térmicas de vapor, los cuales son el carbón y la biomasa.

- Carbón

Para ECOCARBON (1998):

El carbón es una mezcla de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, agua y cenizas. La proporción de estos elementos en la roca y sus propiedades no son fijas, ya que varían dependiendo del yacimiento de donde se extraiga.

Algunas propiedades del carbón han sido propuestas como base para realizar una clasificación, entre las que se encuentran la capacidad calorífica, la estructura, el tamaño, entre otras. La más común es la establecida por la *American Society of Testing Materials (ASTM)*, se basa en un contenido de carbono fijo y un valor calorífico, calculado para una base libre de material mineral. (pp. 21- 22)

- Biomasa

Materia orgánica de origen vegetal o animal, incluido los residuos y desechos orgánicos, que puede ser aprovechada energéticamente. La biomasa se puede clasificar en 3 grupos: biomasa natural, que es la producida sin intervención humana (leñas y ramas), biomasa residual,

residuos orgánicos que provienen de residuos de las personas (serrín, cáscaras, residuos ganaderos), biomasa producida, que son cultivos energéticos que son campos de cultivo con su única finalidad de su aprovechamiento energético. (González, 2017, pp. 11-12)

Tabla I. **Clasificación del carbón**

Clase	Grupo	Carbono Fijo %	Poder calorífico (cal/gr)
Antracita	Meta-antracita	> 98	
	Antracita	92-98	
	Semi-Antracita	86-92	
Bituminoso	Bituminoso bajo volátil	78-86	
	Bituminoso medio volátil	< 69	
	Bituminoso alto volátil A	< 69	7780
	Bituminoso alto volátil B	< 69	7220-7880
	Bituminoso alto volátil C	< 69	6380-7220
Sub-Bituminoso	Sub-Bituminoso A	< 69	5380-6380
	Sub-Bituminoso B	< 69	5280-5830
	Sub-Bituminoso C	< 69	4610-5280
Lignito	Lignito A	< 69	3500-4610
	Lignito B	< 69	3500

Fuente: ECOCARBON (2020). *Calderas de carbón*.

7.1.2. Funcionamiento de una central térmica de vapor

Las centrales térmicas de vapor utilizan como máquinas motrices comúnmente turbinas de vapor las cuales son las encargadas de accionar los generadores eléctricos principales para proporcionar energía a la red,

además estas máquinas motrices también se utilizan para impulsar equipos auxiliares como bombas, hogares mecánicos, ventiladores y excitadores de vibración. (Ramírez, 1995, p. 273)

“En general, una turbina de vapor es un motor térmico rotativo que convierte la energía térmica contenida en el vapor en energía mecánica o eléctrica” (Connor, 2020, párr. 1).

El equipo base de una central térmica convencional es la caldera ya que produce el vapor necesario para el sistema. “En términos generales, se hace referencia a una caldera como cualquier sistema de presión en el que el agua se convierte en vapor como producto final mediante la transferencia de calor desde una fuente de temperatura más alta” (Ramírez, 1995, p. 297).

“El vapor de agua es el fluido de trabajo usado más comúnmente en ciclos de potencia de vapor debido a sus muchas y atractivas características, como bajo costo, disponibilidad y alta entalpía de vaporización” (Cengel y Boles, 2011, p. 559).

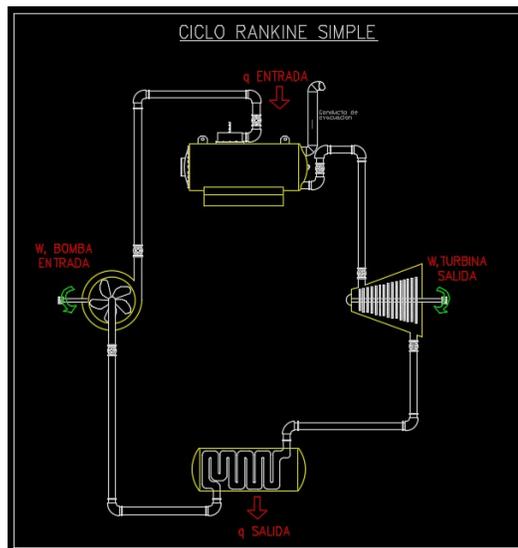
La planta de energía de vapor puede funcionar sin condensador o con condensador. Cuando trabajan sin condensador el vapor de escape de las máquinas motrices es descargado a la atmósfera a presiones superiores a la atmosférica. En las centrales con condensador el vapor de escape es descargado en condensadores en el interior de los cuales la presión es inferior a la atmosférica y donde el vapor es transformado en agua. (Severns, 1982, p. 18)

En un ciclo con condensador, el combustible sólido se introduce en el hogar de la caldera, en donde se quema, con la consiguiente liberación de energía

en forma de calor. La energía calorífica producida al quemar el combustible y la de los productos de la combustión son transmitidas al agua introducida a la caldera por medio de una bomba de alimentación. El vapor abandona el recalentador a una presión determinada y es conducido por canalizaciones a la entra de una turbina. El vapor se expansiona disminuyendo su presión y temperatura y la energía producida se utiliza para mover un generador eléctrico. En las instalaciones con condensador el vapor de escape de la máquina motriz se transforma en agua en un condensador refrigerado con agua. (Severns, 1982, pp. 20-21)

Una central con condensador sigue lo que se conoce como ciclo Rankine simple. “El ciclo Rankine es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor” (Cengel y Boles, 2011, p. 561)

Figura 2. **Ciclo Rankine simple**



Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD 2014.

7.1.3. Elementos de una central térmica de vapor

Los intercambios de energía de la central térmica de vapor se realizan en 3 circuitos principales.

- Circuito de combustible

El combustible se quema en el hogar que es un muro cerrado por paredes de mampostería donde generalmente se encuentran los canales de circulación de aire para la combustión. Una vez que se calienta la caldera, el gas de combustión restante o el gas de combustión se descarga al exterior a través de la tubería. Dado que estos gases todavía están calientes, la energía térmica contenida en ellos se puede utilizar en el circuito principal de uno o más sobrecalentadores de vapor y en el circuito principal de uno o más economizadores de agua de alimentación de calderas. Desde aquí pasa la chimenea por donde salen al exterior. (Ramírez, 1995, p. 276)

- Circuito de agua a vapor

La vaporización del agua se da en la caldera. “La caldera es básicamente un gran intercambiador de calor donde el calor que se origina en los gases de combustión se transfiere al agua” (Cengel y Boles, 2011, p. 562).

El vapor a la salida de la caldera todavía contiene partículas de agua por lo cual se suele pasar por un circuito secundario de uno o más recalentadores. De aquí el vapor a presión y alta temperatura, se conduce hasta la turbina, donde se expansiona produciendo energía mecánica. A la salida de la turbina, el vapor se hace pasar por un condensador donde el vapor se

condensa y se transforma nuevamente en agua. El agua resultante de la condensación y proveniente de la turbina se impulsa nuevamente a la caldera mediante bombas de alimentación. (Ramírez, 1995, p. 278)

- **Circuito eléctrico**

El generador eléctrico que es el elemento final para la producción de energía eléctrica es accionado por la turbina de vapor. Del generador eléctrico la energía se lleva a un transformador para elevar su nivel de voltaje y así inyectar dicha energía a la red de transmisión eléctrica. (Ramírez, 1995, p. 278)

7.1.3.1. Hogar

“Es el recinto donde se quema el combustible. Es un espacio libre, amplio y cerrado, para quemar combustible y enfriar el humo antes de que ingrese al canal de convección o zona de recuperación” (Fernández, 1996, p. 13).

El hogar está constituido por dos elementos: la cámara de combustión y el cenicero. En la primera se libera el calor por la reacción exotérmica de la quema del combustible produciendo gases calientes. En el segundo se recogen los residuos de la combustión. (ECOCARBON, 1998, p. 9)

7.1.3.2. Parrilla (*stoker*)

La parrilla es una estructura metálica destinada a sostener el combustible del hogar y a dar paso al aire primario de la combustión. Un hogar mecánico (*stoker*) consiste en una combinación de parrilla y de un dispositivo

alimentador de combustible movido mecánicamente. (Severns, 1982, pp. 158-159)

7.1.3.3. Paredes de tubos de agua

Como menciona Ramírez (1995):

Estas también son llamadas superficies de vaporización, que son las que conducen el calor al agua de la caldera para producir vapor saturado. Aquí se genera el vapor para su admisión a la turbina. Estas cubren parcial o totalmente las paredes de la caldera. Está conformado por conjuntos de serpentines evaporadores ubicados en el hogar de la caldera. Los serpentines evaporadores proveen una superficie de transferencia de calor para la producción de vapor, aprovechando la energía térmica contenida en la combustión en el hogar de la caldera. (p. 298)

7.1.3.4. Sobrecalentadores (*superheaters*)

“Los sobrecalentadores son intercambiadores de calor que están destinados a comunicar energía adicional al vapor saturado procedente de la caldera, además de la que posee en estado de saturación a una presión dada” (Ramírez, 1995, p. 415).

Estos pueden ser de dos tipos, sobrecalentadores de convección y sobrecalentadores de radiación.

7.1.3.5. Economizador

Según Oelker (2018) un economizador es un intercambiador de calor de tubos aletados, que permite recuperar parte del calor sensible de los productos de la combustión que emite una caldera, transfiriéndolo al agua de alimentación y aumentando de esta manera la eficiencia térmica. El economizador provee la superficie de transferencia de calor para precalentar el agua de alimentación.

7.1.3.6. Chimenea

“Es un sistema que se utiliza para descargar el calor y el humo de las calderas, calentadores, estufas, hornos, estufas o casas a la atmósfera” (Cedron, 2013, p. 1).

Para entender el funcionamiento de la chimenea es importante conocer qué es el tiro. De acuerdo con lo mencionado por Ramírez (1995), cuando se calienta cualquier columna de gas vertical cerrada conectada al exterior por los extremos inferior y superior, generará un flujo de aire ascendente. Este fenómeno se da debido a que la densidad del gas disminuye al someterlo a calor, por lo tanto, el gas externo que se encuentra a menor temperatura ahora es más pesado, obligando a la porción de gas de menor temperatura a bajar y al de mayor temperatura a subir por dicha columna. En el caso de una central térmica, el gas calentado en el hogar de la caldera es empujado por el aire de combustión y descargado a través de una columna cerrada. Esta columna se llama chimenea.

“Tomando esto en consideración las chimeneas por lo tanto pueden ser de dos tipos de tiro natural o de tiro mecánico” (Ramírez, 1995, p. 404).

Tabla II. **Clases de tiro en las chimeneas de las calderas**

Tiro natural	Tiro mecánico
Es provocado exclusivamente por el efecto creado por una chimenea.	Es cuando se aumenta la natural diferencia de presiones, bien soplando aire en el interior del hogar (tiro forzado), o bien aspirando aire desde la chimenea (tiro inducido)

Fuente: Ramírez (19950. *Centrales eléctricas: Enciclopedia CEAC de electricidad*.

En la ventilación mecánica, se suele utilizar un ventilador, a veces se utiliza para empujar el gas, en la ventilación forzada (el propio ventilador o impulsor), a veces se utiliza para inhalar estos gases, en la ventilación inducida (aspirador o extractor). Básicamente, un ventilador consta de un impulsor, rodeado por una carcasa estática. En un ventilador, la energía se transfiere al gas a través del impulsor, creando así una diferencia de presión y generando flujo de aire. La diferencia entre el impulsor y el extractor de aire es que el impulsor expulsa el gas superando una cierta presión en la salida, mientras que el extractor de aire extrae el gas de la carcasa por inhalación y lo descarga en el tubo de escape bajo presión. (Ramírez, 1995, p. 407)

7.1.3.7. **Turbina de vapor**

Una turbina de vapor es un motor de turbina motorizado, que convierte la energía del flujo de vapor en energía mecánica a través del intercambio de momento entre el fluido de trabajo (vapor) y el impulsor. El impulsor es el

órgano principal de la turbina. El impulsor tiene álabes o una forma especial de las palas. Intercambio de energía. (Energiza.org, 2011, p. 3)

El vapor circula en la turbina en forma de chorro, y su conversión en trabajo ocurre cuando circula en una combinación de pasadizos o conductos estacionarios llamados toberas y en elementos giratorios llamados álabes; a esta combinación se le conoce como etapa, y una turbina dependiendo de su diseño y aplicación puede ser de una o más etapas. (Sarceño, 2020, p. 38)

7.1.3.8. Condensador

El sistema de condensador está diseñado para condensar y desgasificar el vapor descargado de la turbina de vapor principal y proporcionar un radiador para el sistema de derivación de la turbina de vapor. El vapor extraído de la turbina se condensa al pasar por una tubería que contiene agua del sistema de refrigeración. (Connor, 2019, párr. 1)

7.2. Eficiencia de una caldera de vapor

La norma UNE-EN 12593 parte 11, define el rendimiento neto de una caldera como la relación entre la energía útil generada y la suministrada. La diferencia por tanto serán todas las pérdidas presentes en el conjunto. Esta forma de definir el rendimiento es lo que se denomina método directo para el cálculo del rendimiento.

Según esta misma norma, otra forma de calcular el rendimiento es mediante el método indirecto que se define como rendimiento neto de la caldera (η) al rendimiento teórico al 100 % menos las pérdidas producidas a través de los gases

de combustión (I_G), las pérdidas de energía hacia el aire circundante por radiación y convección (I_{RC}) y las pérdidas por inquemados gaseosos en el caso de calderas de combustibles sólidos (I_{SF}).

$$\eta = 100 \% - I_G - I_{RC} - I_{SF} \quad (\text{Ec. 1})$$

Las pérdidas en gases de combustión o gases de chimenea dependen del combustible y pueden variar entre el 10 % y 30 % del total de energía aportada por el combustible. Las pérdidas por radiación y convección o pérdidas en las paredes se dan debido a la diferencia de temperatura entre las paredes de un equipo y su medio circundante. Por su parte las pérdidas por inquemados (cenizas) en los productos de combustión representa una porción del combustible no quemada y por lo tanto es energía que no transfirió al proceso. (ECOCARBON, 1998, pp. 92-94)

“La eficiencia en calderas con base en carbón puede variar desde valores bajos del orden del 60 % para calderas con alimentación manual hasta más del 90 % de eficiencia para calderas de carbón pulverizado y lecho fluidizado” (ECOCARBON, 1998, p. 85).

7.2.1. Proceso de combustión y sus pérdidas

“Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de hidrógeno y carbono” (Cengel y Boles, 2011, p. 772).

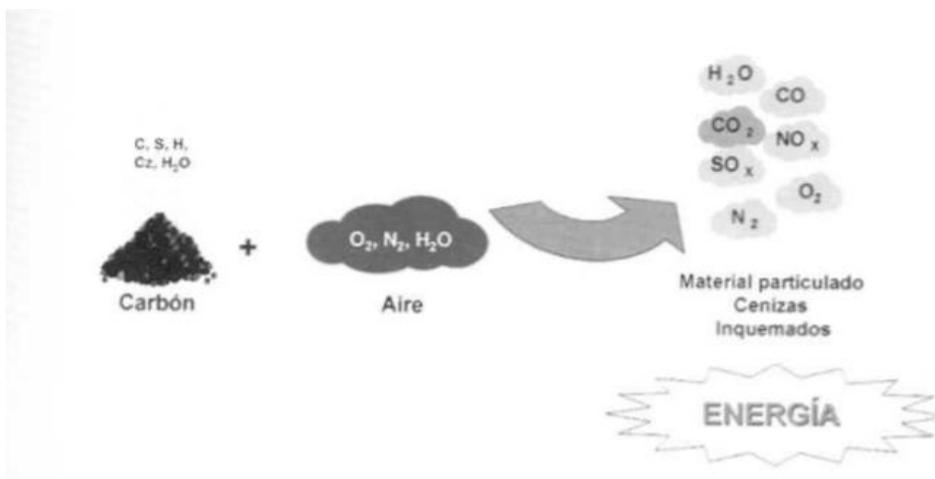
Los combustibles más comunes son el carbón, la gasolina y el gas natural.

Como explica Cengel y Boles (2011), “la combustión es una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía. El oxidante empleado con mayor frecuencia es el aire” (p. 273).

Como explica Muñoz (2015), “los combustibles sólidos, tales como el carbón duro, carbón bituminoso, turba, madera, paja y bagazo, contienen esencialmente carbono (C), hidrógeno (H₂), oxígeno (O₂), agua (H₂O), pequeñas cantidades de azufre (S) y nitrógeno (N₂)” (p. 12).

En el caso del carbón estos elementos y compuestos se transforman en dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), y en otros compuestos como los monóxidos de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógenos (NO_x), partículas de combustible no oxidado y cenizas. (ECOCARBON, 1998, p. 41)

Figura 3. **Proceso de quema del carbón**



Fuente: ECOCARBON (1998). *Calderas a carbón*.

7.2.1.1. Pérdidas de energía en las cenizas

“La pérdida en las cenizas de combustión se refiere al combustible que se pierde porque no entra en las reacciones de combustión dentro del horno o lo hace, pero parcialmente” (Muñoz, 2015, p. 40).

“Investigaciones anteriores han determinado que existe un potencial energético en la quema de desechos de las calderas carboneras, esto por la presencia de combustible sin quemar” (CENGICANA, 2021, p. 118).

Según Muñoz (2015), “las razones más importantes para que se presente una cantidad considerable de combustible sin quemar en los residuos de cenicero están relacionadas con una baja velocidad de combustión” (p. 33).

Para determinar las pérdidas por cenizas deberá tomarse muestras periódicas de los residuos de cada cenicero de la caldera. Las muestras se enfrían al ambiente y se guardan en bolsas con cierre hermético. Calcinar en un horno de convección. De esta manera se determinará el peso total de cenizas y el combustible sin quemar presentes en cada muestra de residuo. (Muñoz, 2015, p. 46)

Con base en esto, las pérdidas en cenizas en kJ/kg de residuos están definidas por:

$$PI = (\% \frac{comb}{r} * mr * PCcsq) / Fc \quad (Ec. 2)$$

Dónde:

PI = Pérdida en ceniceros por combustible sin quemar

% comb/r = Porcentaje de combustible no quemado en los residuos
mr = Flujo extraído del cenicero en residuos (kg/h)
PCcsq = Poder calorífico del combustible sin quemar extraído de los
residuos (kJ/kg)
Fc = Flujo de combustible

7.3. Proyecto de reinyección de ceniza

Según Muñoz (2019) en las calderas de biomasa/carbón de los ingenios en Guatemala se ha notado la presencia de carbón sin quemar en las cenizas que se recolectan en los ceniceros e incluso en los silos de disposición de las cenizas y esta presencia de carbón sin quemar representa una pérdida económica además de energética para la central.

El Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña (CENGICAÑA) que es un centro especializado en investigación de la caña de azúcar en Guatemala, realiza la siguiente propuesta a los ingenios cogeneradores en el país.

Recircular los residuos del evaporador y economizador de calderas carboneras/bagaceras (utilizando los *hopper*), enviándolos a los laterales del horno. Sin importar la mezcla de combustibles y el volumen de residuos, se evidenció que existe rentabilidad y ahorro en todas las calderas de este tipo en los ingenios de Guatemala. (CENGICAÑA, 2021, p. 118)

Cabe mencionar que el evaporador y el economizador son los elementos donde usualmente se concentra la mayor cantidad de ceniza con contenido de combustible sin quemar ya que a través de ellos circulan los gases de combustión y estos transportan la ceniza a través de ellos.

7.3.1. Modificaciones sobre la caldera de vapor

Según explica Muñoz (2019) actualmente hay tres maneras de recircular los residuos en calderas de vapor como se resume en la tabla III.

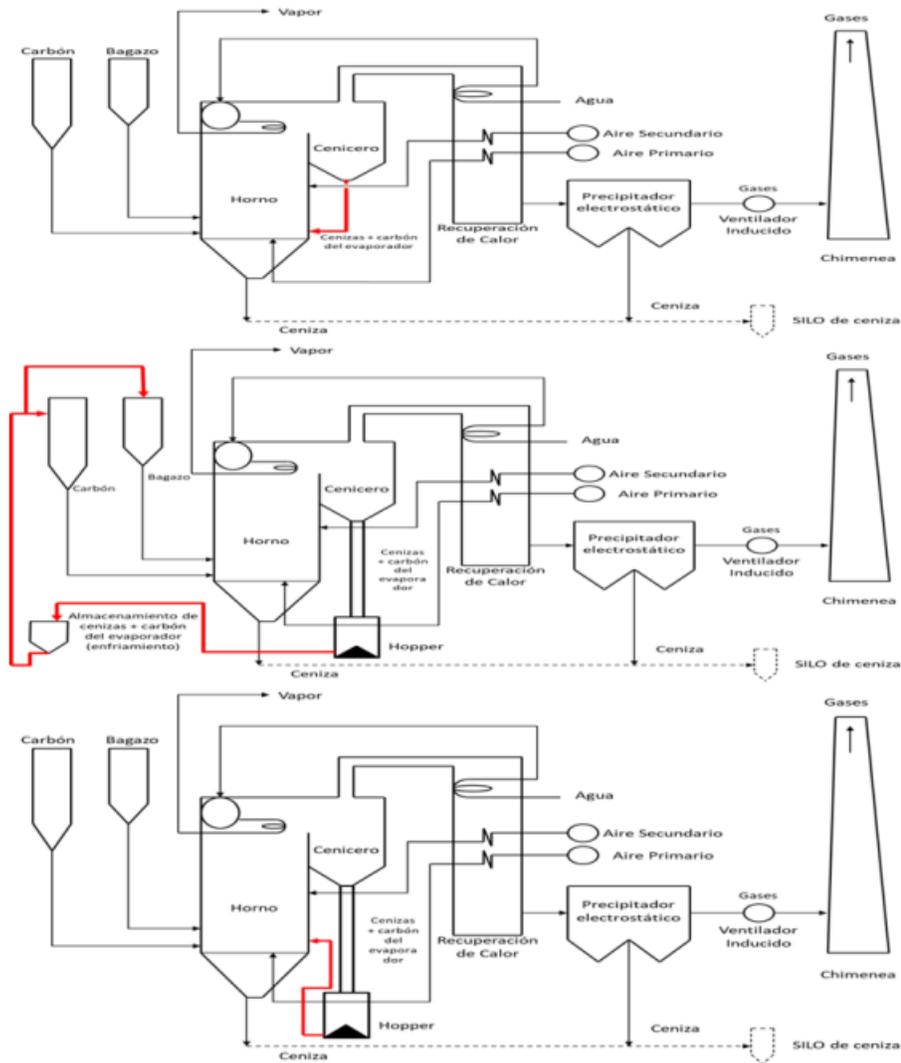
Tabla III. Formas de recircular cenizas en calderas de vapor

Primer caso	Los residuos pasan desde los ceniceros al horno, para esto es necesario colocar cheques para evitar que el tiro del ventilador inducido extraiga gas caliente del horno.
Segundo caso	Los residuos se extraen de los ceniceros y se dejan enfriar en una tolva externa a la caldera, ya fríos se integran nuevamente al sistema de alimentación de carbón o bagazo.
Tercer caso	Los residuos calientes entran en la parte trasera inferior del horno impulsados por el sistema neumático de los ceniceros, para esto es necesario ajustar la presión de aire, de manera que los residuos no sean atomizados en el horno sino sean solo depositados para que sobre la parrilla se terminen de quemar, las cenizas sin combustible deberán salir por el cenicero frontal.

Fuente: elaboración propia, con información de Muñoz (2019). *Recirculación de residuos de combustión al horno en calderas carboneras de ingenios azucareros.*

Las modificaciones que se deben de realizar en las calderas son mostradas en la figura 4.

Figura 4. Formas de recirculación de cenizas en centrales térmicas



Fuente: Muñoz (2019). *Recirculación de residuos de combustión al horno en calderas carboneras de ingenios azucareros.*

El proyecto de reinyección de ceniza tiene como objetivo aprovechar el carbón que se pierde en la ceniza del economizador y va dirigido a incrementar la generación total en kWh por tonelada de carbón.

La restricción del proyecto se limita a que este sistema sólo podrá utilizarse cuando la caldera se encuentre quemando únicamente carbón.

7.4. Mercado eléctrico nacional

En el año de 1996 mediante el Decreto No. 93-96 se crea la Ley General de la Electricidad en Guatemala, en donde se establecen los principios que rigen el mercado eléctrico de Guatemala, denominado mercado mayorista.

En el mercado mayorista se transa dos productos:

- **Potencia:** la velocidad a la que la energía se convierte en otra forma de energía.
- **Energía:** una propiedad física que se puede convertir en trabajo útil o en otra forma de energía. Cuando la corriente fluye en cualquier circuito, puede transferir energía realizando trabajo mecánico o termodinámico.

Estas transacciones de potencia o energía se realizan en condiciones de libre competencia entre sus agentes (generadores, transportistas, distribuidores y comercializadores) tanto a corto como a largo plazo.

El mercado eléctrico guatemalteco es un mercado de costos, en donde las centrales generadoras son más baratas, es decir, con menos costos de generación, con despacho prioritario hasta que se satisfaga la demanda.

7.4.1. Estructura del mercado eléctrico nacional

El funcionamiento del mercado eléctrico se realiza a través de diversas instituciones.

El órgano de gobierno es el Ministerio de Energía y Minerales (MEM), cuya función principal es formular políticas energéticas y planes de expansión de generación y transmisión de energía.

Definido en el artículo 4 de la Ley General de la Electricidad como el órgano técnico del MEM y ente regulador se encuentra la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) que tiene como función principal hacer cumplir las leyes y reglamentos establecidos, especialmente en las actividades de transmisión y distribución.

Como ente operador del sistema y del mercado se encuentra el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) que está a cargo de la operación del sistema eléctrico nacional en tiempo real al costo más bajo de operar todo el mercado mayorista.

Por último, se encuentran los agentes del mercado mayorista conformados por generadores, distribuidores, comercializadores, transportistas los cuales operarán sus instalaciones de acuerdo con las disposiciones que emita el AMM. Estos se encuentran definidos en artículo 6 la Ley General de la Electricidad y sus límites se encuentran establecidos en el artículo 39 del Reglamento de la Ley General de la Electricidad, como se resume a continuación.

- **Generador:** central eléctrica que vende la totalidad o parte de su producción de energía. Debe de tener una potencia máxima mayor a 5 MW.
- **Distribuidor:** instalaciones destinadas a distribuir comercialmente energía eléctrica. Debe tener un mínimo de 15,000 usuarios.
- **Comercializador:** su actividad principal consiste en la compra y venta de bloques de energía eléctrica como intermediario. Debe comprar o vender bloques de energía relacionados con una oferta estable efectiva o una demanda estable de al menos 2 MW.
- **Transportista:** posee instalaciones dedicadas a transmisión y transformación de energía eléctrica. Debe tener una capacidad mínima de transporte de 10 MW.

Como caso especial se encuentran los grandes usuarios y los generadores distribuidos renovables.

Figura 5. **Estructura del mercado nacional**



Fuente: AMM (2020). *Mercado eléctrico de Guatemala*.

7.4.2. Tipos de mercado

En el mercado eléctrico guatemalteco existen 2 tipos principales de mercado. El mercado de a término el cual es basado en contratos y el mercado de oportunidad el cual consiste en la compra y venta de energía a precio spot.

7.4.2.1. Mercado a término

Se encuentra definido en el artículo 1 de la Norma de Coordinación Comercial No. 13 del AMM como:

Es aquel constituido por contratos entre agentes o grandes usuarios del mercado mayorista, con precios, cantidades y duración pactados entre las partes. Poseer un contrato en el mercado a término implica también participar en el mercado de oportunidad para poder realizar las transacciones de excedentes o faltantes de lo contratado. (AMM, 2000e, p. 7)

Estos contratos pueden ser de varios tipos.

Tabla IV. **Tipos de contratos en el mercado a término guatemalteco**

Contratos de abastecimiento	<ul style="list-style-type: none">• Por diferencias con curva de carga• De potencia sin energía asociada• De opción de compra de energía• Por diferencias por la demanda faltante
Contratos de reserva de potencia	<ul style="list-style-type: none">• De respaldo de potencia• De respaldo de energía generada

Fuente: elaboración propia, con información de AMM (2000e). *Norma de Coordinación Comercial No. 13 – Mercado a Término.*

Otros tipos de contrato son los contratos de respaldo definidos en la Norma de Coordinación Comercial No. 10 del AMM y los contratos de oferta firme eficiente para el cubrimiento de transacciones internacionales de corto plazo.

7.4.2.2. Mercado de oportunidad (mercado spot)

Según AMM (2000a), el mercado de oportunidades de energía se organiza todos los días para mantener el principio del mercado de costos. Las centrales eléctricas deben proporcionar información periódica sobre sus CVG para enumerar las ventajas de cumplir con los requisitos, las reservas y los compromisos internacionales del SNI.

Este mercado se optimiza a través del despacho económico, que incluye el uso de los suministros disponibles (energía y electricidad) para abastecer la demanda esperada (energía y electricidad) en un período de tiempo determinado, minimizando así los costos operativos totales. La programación de generación de energía se optimiza cada hora, y uno de los resultados es el precio de oportunidad de energía (POE) o precio spot, determinado por el CVG del grupo electrógeno marginal (la última central eléctrica requerida para satisfacer la demanda y las reservas de SNI).

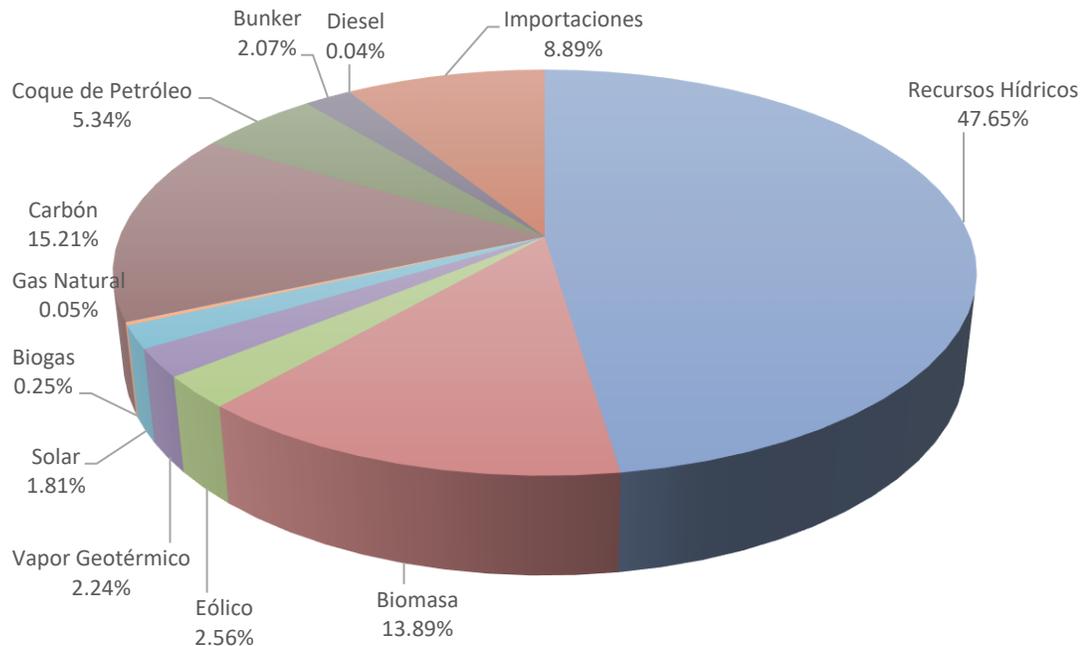
7.4.3. Matriz energética nacional

A diciembre del año 2020 la matriz energética de Guatemala posee una potencia instalada de 4,109.53 MW de los cuales un 55.2 % son centrales térmicas convencionales. De estas centrales térmicas, aproximadamente el 67 % son centrales de turbina de vapor.

Según información del informe estadístico del Administrador del Mercado Mayorista, los principales combustibles utilizados en las centrales de turbina de vapor en Guatemala son carbón y biomasa, este último debido a la gran cantidad de ingenios azucareros que utilizan el bagazo de caña como principal combustible durante el período de zafra. Durante el período de no zafra estas centrales suelen utilizar otro tipo de combustible que generalmente suele ser carbón o bunker, lo cual las convierte en centrales de biomasa/carbón o biomasa/búnker ya que dependiendo la época del año operan con uno o con otro combustible.

Las centrales térmicas de carbón o de biomasa/carbón, poseen una gran importancia en la matriz energética nacional. Según datos del informe estadístico del Administrador del Mercado Mayorista del año 2020 la producción total de energía durante ese año, contando las importaciones, fue de 12,206.63 GWh, de los cuales un 15.21 % fue generado utilizando carbón como combustible, lo cual lo sitúa como el segundo combustible más utilizado para generar energía eléctrica en el país por detrás de las centrales hidráulicas. El porcentaje es aún menor al de años anteriores debido a la baja en la demanda de energía ese año, a causa de la pandemia COVID-19.

Figura 6. **Generación de energía año 2020**



Fuente: elaboración propia, con información del AMM (2020a). *Mercado eléctrico de Guatemala*.

7.5. Precio de venta de la energía

El precio de venta de la energía en un mercado eléctrico mayorista como lo es el de Guatemala depende en gran medida de dos factores: los costos variables de generación de cada generador y los factores de pérdidas nodales.

Como mencionan Dammert, García y Molinelli (2010):

La teoría económica cree que, para lograr el objetivo de maximizar el bienestar social, se requiere una asignación efectiva de recursos. Para ello es necesario utilizar racionalmente todos los recursos de la sociedad, producir al menor costo posible y cobrar a los usuarios el costo marginal de

producción, resultado que se logra en un sistema perfectamente competitivo, no en otras estructuras de mercado. (p. 20)

Un mercado eléctrico mayorista pretende seguir el modelo anteriormente descrito.

Cuando la curva de oferta total (el precio de generación de energía desde el precio más bajo al más alto) es igual a la curva de demanda total de la red, el precio al contado se calcula en un período de una hora. En el corto plazo, la demanda no reaccionará ante cambios en los precios de cierre, por lo que se considera que tiene un comportamiento inelástico. Este precio se encuentra a través del despacho ideal de energía, es decir, ignorando la influencia y limitaciones del sistema de transmisión. (Cañaverall, 2018, p. 1)

7.5.1. Costos variables de generación

Según Dammert, García y Molinelli (2010), normalmente los costos de generar electricidad se dividen en dos partes: en primera instancia se encuentra el costo fijo, que consiste en la inversión inicial más los costos de operación y mantenimiento necesarios para mantener la central de generación disponible, en segunda instancia se encuentran los costos variables, que hacen referencia a los costos de operación y mantenimiento que cambia con la cantidad de energía producida.

El Administrador del Mercado Mayorista (2000a), define el costo variable como el costo calculado por el AMM, con base a la metodología de costos variables de generación declarada por el generador en la programación de largo plazo, incluyendo el costo del combustible, el costo relacionado con el consumo propio de la máquina y distintos del combustible. El costo del insumo variable y

cualquier otro costo variable requerido y declarado en el enfoque de costo de generación de energía variable. El costo está representado por el tipo de máquina instalada en la fábrica y cada combustible que la máquina puede consumir, considerando el tipo de combustible determinado para la definición del precio de referencia del combustible.

El número de valores que definen el costo variable de una central térmica depende en consecuencia del número de tipos de máquinas instaladas en la central eléctrica y del número de diferentes tipos de combustible que se pueden consumir.

7.5.2. Pérdidas de transmisión

Según menciona la Norma de Coordinación Comercial No. 6, en AMM (2000c), al incluir el factor de pérdida de nodo en el precio de nodo, la pérdida de transmisión marginal se descuenta implícitamente en la transacción en el mercado de oportunidades.

En las transacciones realizadas en el mercado a plazo, el productor o consumidor participante especificado en el contrato debe pagar estas pérdidas a través de una tarifa que se denomina claramente costo de pérdida de transmisión marginal en el contrato. El costo asignado a cada contrato se calculará con base en la energía y la demanda efectiva de suministro efectivamente producida en el contrato, así como el precio de nodo del nodo correspondiente y la energía en el mercado.

Como se mencionó anteriormente las pérdidas marginales de transmisión van implícitas en al incluir los precios nodales al precio de venta la energía. Según se menciona en la Norma de Coordinación Comercial No. 7, en AMM (2000d), la

energía eléctrica se evalúa en cada punto de la red a través de la energía en el nodo. El valor de la energía transferida al nodo será el precio de la energía de mercado (PM) afectado por el coeficiente de pérdida de energía del nodo.

Según Méndez y Rudnick (2004) la implementación del precio nodal (*local marginal price*) es el resultado directo del despacho económico del operador de la red regional en donde los precios del nodo (o barra) pueden dar información clara de la operación horaria del sistema. Usualmente la información que el precio nodal contiene está relacionada con las unidades de generación presentes en el sistema, la congestión de las líneas de transmisión y las pérdidas en el sistema de transmisión.

La AMM (2000d) en la Norma de Coordinación Comercial No. 7 explica cómo se calcula el factor de pérdidas nodales de energía de un nodo i , con respecto al nodo de referencia, se define como la relación entre los costos marginales de dos nodos, cuando el costo marginal en el nodo i contiene la pérdida de transporte marginal al nodo de referencia y no hay restricción de transporte cuando están vinculados. Los costos marginales deben ser aquellos costos incurridos por el despacho económico de cargas para minimizar el costo total del sistema de generación de energía. Es mejor utilizar el mismo procedimiento que para la programación de carga diaria.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades de una central térmica convencional

2.1.1. Tipos de centrales térmicas de vapor

2.1.2. Funcionamiento de una central térmica de vapor

2.1.3. Elementos de una central térmica de vapor

2.1.3.1. Hogar

2.1.3.2. Parrilla

2.1.3.3. Paredes de tubos de agua

2.1.3.4. Sobrecalentadores

2.1.3.5. Economizador

2.1.3.6. Chimenea

- 2.1.3.7. Turbina de vapor
 - 2.1.3.8. Condensador
 - 2.2. Eficiencia en una caldera de vapor
 - 2.2.1. Proceso de combustión y sus pérdidas
 - 2.2.1.1. Pérdidas de energía en las cenizas
 - 2.3. Proyecto de reinyección de ceniza
 - 2.3.1. Modificaciones sobre la caldera de vapor
 - 2.4. Mercado eléctrico nacional
 - 2.4.1. Estructura del mercado eléctrico nacional
 - 2.4.2. Tipos de mercado
 - 2.4.2.1. Mercado a término
 - 2.4.2.2. Mercado de oportunidad (mercado *spot*)
 - 2.4.3. Matriz energética nacional
 - 2.5. Precio de venta de la energía
 - 2.5.1. Costos variables de generación
 - 2.5.2. Pérdidas de transmisión
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Diseño
 - 3.1.2. Enfoque
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.1.4. Unidad de análisis
 - 3.2. Variables
 - 3.3. Fases del desarrollo de la investigación
 - 3.3.1. Fase 1: Cuantificación de carbón utilizado para la generación de energía
 - 3.3.2. Fase 2: Determinación del cambio de eficiencia de la central

- 3.3.3. Fase 3: Determinación y comparación de los costos variables de generación de la central
- 3.3.4. Fase 4: Recolección de datos de energía vendida en el mercado de oportunidad

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 4.1. Carbón utilizado
 - 4.1.1. Tablas y gráficos de tendencia
- 4.2. Eficiencia de la central
 - 4.2.1. Cálculo de eficiencia de la central
 - 4.2.2. Tablas de gráficos comparativos
- 4.3. Costos variables de generación
 - 4.3.1. Cálculo de costos variables de generación
 - 4.3.2. Tablas y gráficos comparativos
- 4.4. Indicadores de energía despachada
 - 4.4.1. Precio de venta de la energía
 - 4.4.2. Horas que la central margina
 - 4.4.3. Cantidad de energía despachada
- 4.5. Análisis financiero
 - 4.5.1. Valor Presente Neto
 - 4.5.2. Tasa Interna de Retorno
- 4.6. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo ya que se pretende cuantificar los impactos económicos del sistema de reinyección de ceniza en la central térmica en estudio.

El alcance es explicativo ex post facto, dado que se pretende determinar si hubo un impacto económico significativo en la central después de la implementación del sistema de reinyección de ceniza además del ahorro de combustible como lo es la mejora en la eficiencia, los costos variables de generación y la cantidad de energía vendida en el mercado de oportunidad.

El diseño adoptado es no experimental, pues las condiciones de la central térmica serán solamente observadas antes y después de la implementación del sistema y no podrán ser manipuladas.

9.2. Unidades de análisis

La unidad en estudio será una central térmica ubicada en el departamento de Escuintla a la cual se le adecua un sistema de reinyección de ceniza, de la que se analizarán su eficiencia, sus costos variables, la cantidad de energía vendida y la cantidad de combustible utilizado.

9.3. Variables

Las variables que se adaptan a este estudio son las siguientes:

Tabla V. **Variables de estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Cantidad de carbón	Medición de la cantidad de carbón utilizada para producir energía en la central.	Este valor se da en toneladas (t).
Eficiencia	Es la relación entre la energía que deseamos obtener de la central y la energía consumida en su funcionamiento.	Esta relación se mide en porcentaje.
Costo variable de generación	Es el costo de operar una central de generación que se compone de los costos de combustible y los costos variables de operación y mantenimiento.	Este costo se da usualmente en dólares.
Energía	Atributo físico que puede ser convertido en trabajo útil o convertido a otra forma de energía.	Este atributo físico se mide en Megavatios hora (MW-h).

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel

Las variables en estudio se describen a continuación.

Tabla VI. **Descripción de las variables de estudio**

Variable	Categoría		Numérica		Observable	Nivel de medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua		
Cantidad de carbón				X	X	Nominal
Eficiencia				X	X	De razón
Costo variable de generación				X	X	Nominal
Energía				X	X	Nominal

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel

9.4. Fases del estudio

A continuación, se describirán las cuatro fases del estudio que se utilizarán para el desarrollo de la investigación, indicando las actividades a realizar y técnicas que aplicarán.

9.4.1. Fase 1: Cuantificación de carbón utilizado para la generación de energía

En la primera fase se hará una recolección de datos de la cantidad de carbón utilizado por la central en años anteriores específicamente los últimos tres años 2018, 2019, 2020 y 2021, utilizando información consultada en las bases de datos de la misma central térmica. Esto con el objetivo de determinar si hubo algún cambio significativo con la implementación del nuevo sistema de reinyección de ceniza.

Tabla VII. **Tabla de cantidad de carbón utilizado**

		Cantidad de carbón utilizado (Ton)			
Mes	Año	2018	2019	2020	2021
Enero					
Febrero					
Marzo					
Abril					
Mayo					
Junio					
Julio					
Agosto					
Septiembre					
Octubre					
Noviembre					
Diciembre					

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

9.4.2. Fase 2: Determinación del cambio de eficiencia en la central

En la segunda fase se hará el cálculo del cambio en la eficiencia de la central en base a lo formulado en la sección 7.2 del marco teórico. Se solicitará información necesaria a la central para poder utilizar las fórmulas descritas en dicha sección. Los resultados se pretenden determinar en una tabla similar a la siguiente.

Tabla VIII. **Determinación del cambio de eficiencia de la central**

	2018	2019	2020	2021
Variables	Variable 1 = --- Variable 2 = --- Variable 3 = ---	Variable 1 = --- Variable 2 = --- Variable 3 = ---	Variable 1 = --- Variable 2 = --- Variable 3 = ---	Variable 1 = --- Variable 2 = --- Variable 3 = ---
Fórmulas utilizadas	$PI = (\% \frac{comb}{r} * mr * PCcsq) / Fc$			(Ec. 3)
Eficiencia	% Eficiencia 1	% Eficiencia 2	% Eficiencia 3	% Eficiencia 4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

9.4.3. **Fase 3: Determinación y comparación de los costos variables de generación de la central**

En la tercera fase se hará una revisión de la fórmula utilizada para el cálculo de los costos variables de generación de la central y se hará el cálculo con la nueva eficiencia energética de la central y nueva cantidad de combustible utilizado por la central, según lo especificado en la sección 7.5.1 del marco teórico.

9.4.4. **Fase 4: Recolección de datos de energía vendida en el mercado de oportunidad**

En la cuarta fase se hará la recolección de datos de la cantidad de energía vendida por la central térmica en el mercado de oportunidad durante el período de tiempo estudiado haciendo uso de los datos publicados por el AMM en su portal web. Estos datos se ordenarán en una tabla por año para su posterior análisis.

Tabla IX. **Tabla de cantidad de energía generada**

		Cantidad de energía generada												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Año	2018													
	2019													
	2020													
	2021													

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En esta fase se hará la comparación de cantidad de energía vendida durante el período estudiado con respecto a otros años y se establecerá el porcentaje de aumento o disminución de la venta de la energía. Se hará una comparación del ingreso neto de la central con respecto a años anteriores para determinar si hubo cambios.

9.5. Resultados esperados

Durante la primera fase se espera determinar la cantidad de carbón utilizado mensualmente por la central y lograr ordenar la información de manera que permita la comparación con años anteriores y visualizar su variación, es decir la cantidad neta de carbón utilizado por la central el año en estudio cuando la central funciona con el sistema de reinyección de ceniza con respecto a los tres años anteriores con la central funcionando sin este sistema.

En la segunda fase se pretende encontrar el valor de la eficiencia energética global de la central térmica y poder determinar el cambio de esta el año en estudio con respecto a los años anteriores.

En la tercera fase se define la fórmula utilizada para el cálculo de los costos variables de generación a su vez, al obtener la fórmula y teniendo los datos de combustible utilizado y eficiencia energética de la central, se pretende encontrar los nuevos costos variables de generación de la central con la implementación del sistema de reinyección de ceniza.

En la cuarta fase se encontrará la cantidad neta de diferencia entre la energía vendida en el mercado de oportunidad de años anteriores con respecto al año en estudio con el sistema de reinyección de ceniza en operación. Esto permitirá establecer una correlación entre la cantidad de energía vendida y la implementación del sistema de reinyección de ceniza.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Durante la primera fase se busca cuantificar la diferencia de la cantidad de carbón utilizado. Para esto se hará un análisis comparativo de la cantidad de carbón utilizado mes a mes de los 3 años anteriores (sin la implementación del sistema de reinyección de ceniza) y el último año (con el sistema de reinyección de ceniza) para lo cual se recolectarán cantidades exactas de carbón utilizado cada mes durante los años en estudio proporcionadas por la central y estos se ordenarán en tablas de datos.

Para esto se calculará el tamaño del efecto entre cada uno de los años en estudio para medir la fuerza de la diferencia de las medias. “El tamaño del efecto es justo la diferencia estandarizada entre las medias de los dos grupos” (Sampieri, 2014, p. 312).

$$\text{Tamaño del efecto} = \frac{\text{Media del grupo 1} - \text{Media del grupo 2}}{\text{Desviación estándar sopesada}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde los grupos en estudio será la cantidad de carbón utilizado en cada uno de los años estudiados.

La desviación estándar sopesada es la estimación reunida de la desviación estándar de los grupos, basada en la premisa que cualquier diferencia entre sus desviaciones es solamente debida a la variación del muestreo.

A su vez, a partir de estos datos se harán gráficos de tendencia de cada uno de los años para ilustrar el comportamiento del uso de carbón en la central térmica por mes y poder analizar el cambio antes y después de la implementación

del sistema de reinyección de ceniza. La gráfica de análisis de tendencia muestra las observaciones en comparación con el tiempo.

En la segunda fase se buscará determinar el cambio de eficiencia en la central, esto se hará mediante el cálculo de la misma mediante las fórmulas descritas en el marco teórico sección 7.2. Este cálculo se hará sacando el promedio de eficiencia de la central cada año y se obtendrá una eficiencia anual. Con esto se hará un gráfico de barras.

Un gráfico de barras es una forma de resumir un conjunto de datos por categorías. Muestra los datos usando varias barras de la misma anchura, cada una de las cuales representa una categoría concreta. La altura de cada barra es proporcional a una agregación específica (por ejemplo, la suma de los valores de la categoría que representa). En este caso se quiere ilustrar la eficiencia en la central durante cada uno de los años en estudio siendo estas las categorías.

En la tercera fase se calcularán los costos variables de generación de la central, estos datos nuevamente se calcularán en períodos de un año a partir de su eficiencia y de su cantidad de carbón utilizado, así como de demás variables que se logren determinar durante la determinación de la fórmula, la cual deberá ser proporcionada por la central térmica durante esta tercera fase.

De igual manera, los valores obtenidos se ordenarán en tablas de datos y se hará un gráfico de barras siendo las categorías de dicho gráfico los costos variables de generación cada uno de los años en estudio y se busca ilustrar si existe un cambio significativo con la implementación del sistema de reinyección de ceniza.

En la cuarta fase se busca determinar la cantidad de energía despachada en el mercado de oportunidad de la central, para lo cual se requerirán datos proporcionados por el AMM que son de uso público. En este caso se tomarán los datos de la central térmica en estudio mes a mes y se ordenarán en tablas de datos que se colocarán en una hoja de cálculo para calcular la diferencia en MWh de energía despachada en el mercado de oportunidad. A su vez se harán gráficos de tendencia para ilustrar la cantidad de energía vendida durante los períodos en estudio y facilitar su posterior análisis.

Durante la fase de análisis de resultados se hará uso de estadística inferencial mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables X y Y medidas en un nivel por intervalos o de razón. Se le conoce también como coeficiente producto-momento. El coeficiente de correlación de Pearson puede variar de -1.00 a 1.00 donde:

- - 1.00. Correlación negativa perfecta. Es decir, a mayor X menor Y.
- 0.00. No existe correlación entre las variables
- 1.00. Correlación positiva perfecta. Es decir, a mayor X mayor Y.

Las variables que se analizarán para determinar su relación de causa-efecto serán los costos variables de generación y la cantidad de energía despachada. Esto debido a que la cantidad de energía despachada se puede deber a muchos otros factores que no necesariamente pueden ser los costos variables de generación. Estos otros factores pueden ser la disponibilidad o indisponibilidad de otras centrales generadoras que ofertan en el mismo mercado, condiciones climáticas, precios de los combustibles, el crecimiento de la demanda, un menor consumo debido a factores externos, entre otros.

En la misma fase de análisis de resultados se hará un análisis costo/beneficio de la implementación del sistema de reinyección de ceniza para la generación de energía eléctrica en la central calculando el Valor Presente Neto (VPN) que es un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder con esa inversión. Y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de interés o de rentabilidad que nos ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que conllevará cualquier inversión.

11. CRONOGRAMA

Tabla X. Cronograma de actividades

Descripción	Enero				Febrero				Marzo					Abril				Mayo				Junio			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
FASE 1: Cuantificación de carbón utilizado																									
Recolección de datos de carbón utilizado																									
Tabulación y elaboración de gráficas de carbón utilizado																									
FASE 2: Determinación del cambio de eficiencia de la central																									
Verificación de fórmulas de eficiencia y pérdidas																									
Recolección de datos para el cálculo de eficiencias y pérdidas																									
Cálculo de eficiencia en la central																									
Elaboración de gráficas comparativas de eficiencia																									
FASE 3: Cálculo de los costos variables de generación																									
Determinación de la fórmula de los costos variables de la central																									
Recolección de datos de los costos variables de años anteriores																									
Cálculo de los costos variables de la central en 2021																									
FASE 4: Recolección de datos de energía vendida en el mercado spot																									
Recolección de datos de la cantidad de energía vendida																									
Elaboración de gráficos de cantidad de energía vendida																									
FASE 5: Análisis e interpretación de datos																									
Comparación y análisis estadístico de datos obtenidos																									
Análisis económico																									

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará con recursos propios del estudiante de maestría para lo cual se tendrán en cuenta los siguientes recursos:

Tabla XI. **Recursos necesarios para la investigación**

Tipo de Recurso	Recurso	Costo
Recursos humanos	Investigador	Q10,000.00
	Asesor	Q2,500.00
Herramientas	Equipo de cómputo	Q. 3,000.00
	Papelería e impresiones	Q. 800.00
	Licencia de Microsoft Office	Q. 600.00
Viáticos	Combustible	Q. 1,500.00
	Alimentación	Q 1,500.00
TOTAL		Q. 19,900.00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo 256-97. Reglamento de la ley general de electricidad . Guatemala: Ministerio de Energía y Minas. 21 de Marzo de 1997.
2. Administrador del Mercado Mayorista. (2020a). *Mercado eléctrico de Guatemala*. Guatemala: Autor.
3. Administrador del Mercado Mayorista. (2000b). *Norma de Coordinación Comercial No. 1 - Coordinación del despacho de carga*. Guatemala: Autor.
4. Administrador del Mercado Mayorista. (2000c). *Norma de Coordinación Comercial No. 6 - Tratamiento de las pérdidas en el sistema de transmisión*. Guatemala: Autor.
5. Administrador del Mercado Mayorista. (2000d). *Norma de Coordinación Comercial No. 7 - Factores de pérdidas nodales*. Guatemala: Autor.
6. Administrador del Mercado Mayorista. (2000e). *Norma de Coordinación Comercial No. 13 - Mercado a término*. Guatemala: Autor.
7. Administrador del Mercado Mayorista. (2021). *Informe Estadístico Mercado Mayorista 2020*. Guatemala: Autor.

8. Alvarez, F. (2010). *Determinar los retos y oportunidades que ofrece el mercado eléctrico regional al mercado eléctrico de Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/5261>.
9. Cañaveral, A. (2018). *Un análisis cuantitativo de precios nodales en Colombia ante fenómenos Del Niño y La Niña* (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11059/9761>.
10. Cedrón, M. (2013). *Chimeneas Industriales*. Argentina: Macedron. Recuperado de <https://assets.todocalderas.com.ar/userfiles/files/chimenea.pdf>.
11. Cengel, Y. y Boles, M. (2007). *Termodinámica*. Mexico: McGrawHill.
12. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. (2021). *Informe Anual 2019-2020*. Guatemala: Autor.
13. Chao, H., Oren, S., Peck, S. y Wilson, R. (octubre, 2000). Flow-Based Transmission Rights and Congestion Management. *The Electricity Journal*, 13(8), 38-58.
14. Chicojay, C. (2010). *Impacto en la matriz energética de Guatemala debido a la generación eólica*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/5260>.

15. Connor, N. (19 de septiembre, 2019). Qué es el condensador principal - Condensador de vapor- Definición. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-condensador-principal-condensador-de-vapor-definicion/>.
16. Connor, N. (09 de enero, 2020). Qué es la turbina de vapor - Descripción y características - Definición. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-turbina-de-vapor-descripcion-y-caracteristicas-definicion/>
17. Dammert, A., García, R. y Molinelli, F. (2010). *Regulación y supervisión del sector eléctrico* (Tesis de licenciatura). Universidad Católica del Perú, Perú. Recuperado de <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/46599>.
18. Decreto 93-96. Ley General de Electricidad. Diario de Centroamérica. Guatemala. 15 de noviembre de 1996.
19. ECOCARBON. (1998). *Calderas a Carbón*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
20. Energiza.org. (2011). *Especial turbinas de vapor*. España: Energiza.org.
21. Fernandez, P. (1996). *Centrales Térmicas*. España: Universidad de Cantabria.
22. Fundación Endesa. (10 de octubre. 2021). Central térmica convencional. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa->

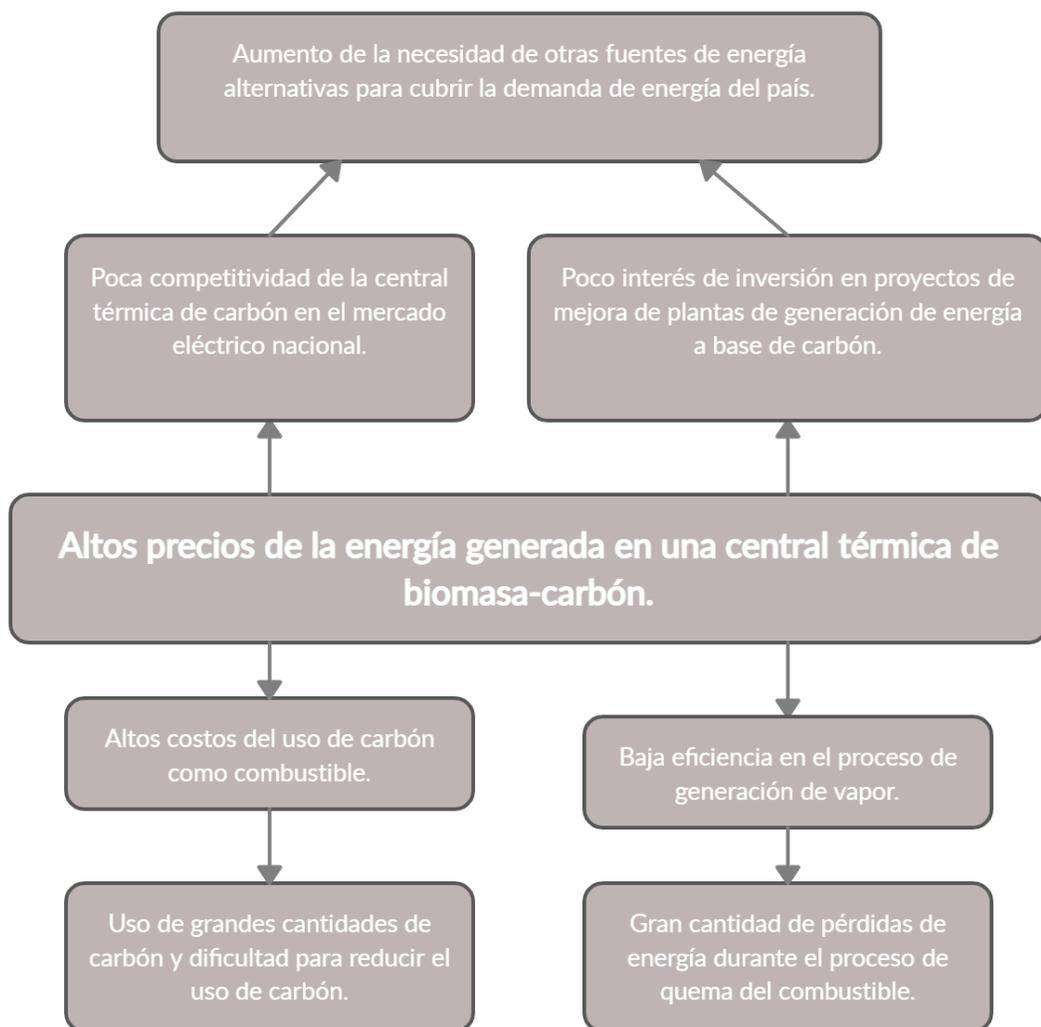
educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional.

23. González, D. (2017). *Análisis de la sostenibilidad de la sustitución de carbón por biomasa en las centrales térmicas convencionales* (Tesis de licenciatura). Universidad de Cantabria, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10902/10532>.
24. Ministerio de Energía y Minas. (1998). *Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista*. Guatemala: Autor.
25. Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Sector eléctrico en Guatemala*. Guatemala: Autor.
26. Muñoz, M. (2015). *Guía para determinar y reducir pérdidas de energía en generadores de vapor*. Guatemala: Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar.
27. Muñoz, M. (2019). *Recirculación de residuos de combustión al horno en calderas carboneras de ingenios azucareros*. Guatemala: Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar.
28. Navarro, D. (2015). *Mejoramiento del proceso de combustión para reducción de inquemados en la generadora de electricidad Duke Energy, Guatemala*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/3186>.

29. Oelker, A. (2018). *Economizadores*. Estados Unidos: Thermal Engineering Ltda. Recuperado de http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/articulo___economizadores.pdf.
30. Ramírez, J. (1995). *Centrales Eléctricas: Enciclopedia CEAC de electricidad*. España: CEAC S.A.
31. Sarceño, R. (2020). *Propuesta de mejora de combustión con la recuperación de ceniza para el aprovechamiento de inquemados planta termoeléctrica de ingenio Santa Ana, Escuintla*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/15728>.
32. Severns, W. (1982). *Energía mediante vapor, aire o gas*. México: Editorial Reverté.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Power Point.

Apéndice 2. Matriz de Coherencia

Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Fases de estudio	Resultados esperados
Altos precios de venta de energía en el mercado de oportunidad de Guatemala en centrales térmicas que utilizan carbón como combustible	Pregunta Principal: ¿Cuál es el impacto económico de un sistema de reinyección de ceniza en una central de biomasa-carbón que oferta en el mercado de oportunidad nacional?	Objetivo Principal: Determinar el impacto económico de un sistema de reinyección de ceniza en una central de biomasa-carbón que oferta en el mercado de oportunidad nacional.		
	Preguntas Auxiliares: ¿Cuánto se reduce la utilización de carbón con la implementación del sistema de reinyección de ceniza? ¿Qué cambios provoca en la eficiencia energética de la central un sistema de reinyección de ceniza? ¿Cuáles son los costos variables de generación de la central con la implementación del sistema de reinyección de ceniza?	Objetivos Específicos: Cuantificar la cantidad de carbón que se reduce con el sistema de reinyección de ceniza. Determinar el cambio en la eficiencia energética de la central con el sistema de reinyección de ceniza. Calcular los costos variables de generación de la central con la implementación del sistema de reinyección de ceniza.	Recolección de datos de la cantidad de carbón utilizado por la central con información de la misma central térmica. Cálculo del cambio en la eficiencia de la central.	Encontrar la diferencia de carbón utilizado antes y después de la implementación del sistema de reinyección. Encontrar la diferencia porcentual de la eficiencia de la central antes y después de la implementación del sistema de reinyección. Encontrar la diferencia en los costos variables de generación antes y después de la implementación del sistema de reinyección.
	¿Cuál es la diferencia en la cantidad de energía vendida en el mercado de oportunidad con la adición del sistema de reinyección de ceniza?	Determinar la diferencia en la cantidad de energía vendida en el mercado de oportunidad con la adición del sistema de reinyección de ceniza.	Recolección de datos de la cantidad de energía despachada por la central térmica en el mercado de oportunidad durante el período de tiempo estudiado	Encontrar la diferencia de cantidad de energía despachada entre los años anteriores y el año que la central funcionó con el sistema de reinyección de ceniza.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.